

Número:

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS**

Juliana Igarashi da Cruz

**DETECÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VINHAÇA NA
RESISTIVIDADE DO SOLO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE
DADOS GEOFÍSICOS: UM ESTUDO DE CASO NO
ASSENTAMENTO SEPÉ - TIARAJÚ- SP.**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências
como parte dos requisitos para obtenção do título de
mestre em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal

Co-orientadora: Prof. Dra. M. Carmen Hernández Lucendo

CAMPINAS, SÃO PAULO

Agosto de 2008

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

Cruz, Juliana Igarashi da.
C889d Detecção da influência da vinhaça na resistividade do solo através da
análise de dados geofísicos: um estudo de caso no assentamento Sepé –
Tiarajú - SP / Juliana Igarashi da Cruz-- Campinas,SP.: [s.n.], 2008.

Orientador: Rodrigo de Souza Portugal, M. Carmen Hernández
Lucendo.

Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto
de Geociências.

1. Vinhaça. 2. Solos contaminados. I. Portugal, Rodrigo de
Souza. II. Hernandez Lucendo, M. Carmen. III. Universidade
Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.

Título em inglês Vinasse influence detection in soil electrical resistivity by geophysics data
analysis: a case study at Sepé Tiarajú settlement of landless agricultural laborers - SP.

Keywords: - Vinasse;

- Soils contamination.

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências

Banca examinadora: - Rodrigo de Souza Portugal;

- Alexandre Campana Vidal;

- José Carlos Dourado.

Data da defesa: 22/08/2008

Programa de Pós-graduação em Geociências



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

AUTOR: JULIANA IGARASHI DA CRUZ

DETECÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VINHAÇA NA RESISTIVIDADE DO SOLO
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DADOS GEOFÍSICOS: UM ESTUDO DE CASO
NO ASSENTAMENTO SEPÉ - TIARAJÚ- SP.

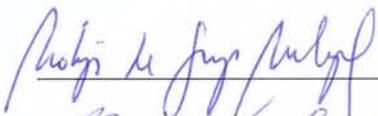
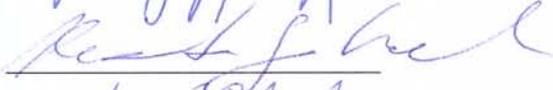
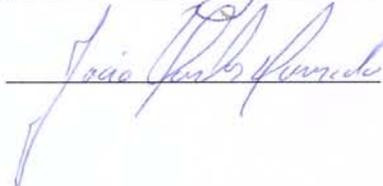
ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal
CO-ORIENTADORA: Dra. Carmen Hernández Lucendo
Aprovada em ___ / ___ / _____

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal

Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal

Prof. Dr. João Carlos Dourado

 - Presidente



Campinas, 22 de agosto de 2008

**Dedico este trabalho aos meus pais
pela batalha, pelo amor e
preocupação, pelos cuidados e mimos e
por serem sempre a base da minha
vida.**

AGRADECIMENTOS

**Aos meus pais por todo esforço e privações que permitiram que tudo isso desse certo,
pelos princípios que me ensinaram e por todo amor que me deram sempre;**

**À professora Maria Carmen, por tudo que me ensinou, pelo cuidado, pela pessoa que
é, por toda ajuda, pela imensa paciência e por todos os bons momentos e boas recordações;**

**Ao meu orientador, Rodrigo Portugal, por acreditar e me guiar para a concretização
deste trabalho, e por ser mais que um orientador;**

**Ao Felipe, que mesmo sem saber, me apoiou e me deu forças, por todos os sonhos, por
tudo que é e por tudo que ainda vai ser;**

**Ao Thiago, por todo carinho, pelo imenso apoio, por toda força e incentivo e por ter
me ensinado a ser uma pessoa melhor;**

Ao meu irmão Daniel, por todo amor;

**Aos amigos da USP, em especial Welitom, Sérgio, Andrea, Vagner e Ernande,
essenciais para este trabalho;**

**Aos amigos da UNICAMP por toda ajuda e companheirismo, em especial Assis, Ari,
Zé e Fernando;**

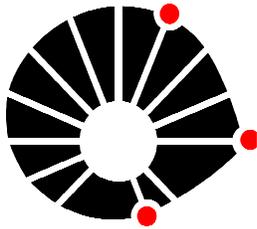
**À USP pelo empréstimo dos equipamentos utilizados e pela construção do
conhecimento;**

À Professora Sueli, por toda ajuda;

Ao CNPq pelo apoio financeiro;

**Ao Banco Santander pela oportunidade de complementar meus estudos na
Universidad Complutense de Madrid;**

À Força Maior que tem me conduzido e me iluminado por esta vida.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS**

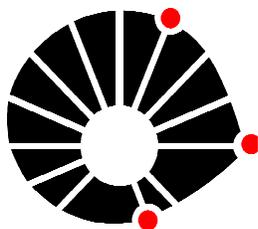
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JULIANA IGARASHI DA CRUZ

RESUMO

**DETECÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VINHAÇA NA RESISTIVIDADE DO SOLO
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DADOS GEOFÍSICOS: UM ESTUDO DE CASO NO
ASSENTAMENTO SEPÉ TIARAJÚ - SP.**

A vinhaça, resíduo gerado na proporção de 13 litros para cada litro de álcool produzido, possui um alto potencial poluidor dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, causa alterações no comportamento do solo e pode gerar problemas de salinização. Este trabalho objetiva avaliar a eficiência do método da eletrorresistividade para a detecção e mapeamento das anomalias causadas pela disposição inadequada de grandes quantidades de vinhaça em um antigo tanque de infiltração localizado no Assentamento Sepé-Tiarajú, Municípios de Serrana e Serra Azul – SP. O trabalho objetiva também caracterizar o tipo de anomalia inerente ao resíduo no local estudado e diagnosticar sua influência dentro e fora dos limites do tanque. Foram executados onze perfis de tomografia elétrica, arranjo dipolo-dipolo radial e espaçamento entre eletrodos de 10 metros. Os ensaios geofísicos mostraram que o método da eletrorresistividade é apropriado para mapear as anomalias decorrentes da disposição de grandes quantidades de vinhaça no solo, apontar suas áreas de influência e concluir que a contaminação extrapola os limites do tanque. A influência da vinhaça pode ser caracterizada por baixos valores de resistividade entre 10 Ohm.m e 90 Ohm.m, podendo o seu comportamento ser comparado ao do chorume, que também é bastante condutivo.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS**

MASTERS THESIS

JULIANA IGARASHI DA CRUZ

ABSTRACT

**VINASSE INFLUENCE DETECTION IN SOIL ELECTRICAL RESISTIVITY BY
GEOPHYSICS DATA ANALYSIS: A CASE STUDY AT SEPÉ TIARAJÚ SETTLEMENT
OF LANDLESS AGRICULTURAL LABORERS - SP.**

The vinasse, a waste produced in the proportion of 13 liters for each liter of alcohol. It has a high potential of polluting groundwater and superficial water resources, changes the soil behaviour and can also develop sanitization problems. This work aims to evaluate the efficiency of the DC-resistivity method in detecting and mapping anomalies caused by inappropriate disposal of vinasse in an inactive infiltration tank located at “Sepé-Tiarajú” settlement of landless agricultural laborers in the Ribeirão Preto region. Besides, as secondary goals, this work aims to characterize the type of anomaly residue as well as to diagnose its influence inside and outside of the limits of the tank. Eleven electrical resistivity tomography profiles were carried out with the dipole-dipole array, 10m of dipoles length and 5 levels of investigation. The geophysical survey enabled us to conclude that the dc-resistivity method is appropriate for mapping the contamination plume caused by intense vinasse disposal and its influence. It enabled also to conclude that the contamination exceeds the tank limits. The vinasse influence can be characterized by low resistivity values between 10 Ohm.m and 90 Ohm.m and its behavior can be compared with the one of the chorume, which is also conductive.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	1
1.3. RELEVÂNCIA DA PESQUISA	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. CONTAMINANTE: VINHAÇA	3
2.1.1. ORIGEM	3
2.1.2. CARACTERIZAÇÃO	4
2.1.3. IMPACTOS AMBIENTAIS	5
2.1.4. LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA	7
2.2. GEOFÍSICA AMBIENTAL	7
2.2.1. MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE	9
Fundamentos do Método	9
Arranjos Eletródicos e Aquisição de Dados	15
Inversão de Dados	30
Os Programas RES2DINV e RES3DINV	30
Os Equipamentos ELREC PRO e SYSCAL R2	34
CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDO	37

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO TANQUE DESATIVADO	37
3.2. GEOLOGIA	45
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	47
4.1. MÉTODOS DE TRABALHO	47
4.2. AQUISIÇÃO	49
4.3. PROCESSAMENTO	55
4.3.1. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA PROCESSAMENTO 2D	56
4.3.2. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA PROCESSAMENTO 3D	57
CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS	59
5.1. LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS - DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE	59
5.1.1. ANÁLISE 2D	59
5.1.2. ANÁLISE 3D	99
5.2. ANÁLISES QUÍMICAS	117
CAPÍTULO 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	119
6.1. INTERPRETAÇÃO 2D	119
6.2. INTERPRETAÇÃO 3D	124
6.3. ANÁLISES QUÍMICAS	126
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES	127
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXO 1 – PSEUDOSEÇÕES DE RESISTIVIDADES APARENTES E MODELO DE RESISTIVIDADES REAIS SEM TOPOGRAFIA	135
ANEXO 2 – RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Eletrodos de injeção de Corrente AB e eletrodos de potencial MN.	10
Figura 2.2 - Principais dispositivos eletródicos.	17
Fonte: Koefoed (1979), Sheriff (1989), Loke (2000)	17
Figura 2.3 – Diferentes técnicas de aquisição de dados: SEV, caminhamento elétricos e tomografias elétricas.	19
Figura 2.4 - Aumento do espaçamento “a” em detrimento do aumento de “n” para manter a força do sinal suficientemente alta.	21
Figura 2.5 - Dispositivos dipolares: a) azimutal; b) radial; c) paralelo; d) perpendicular; e) axial (radial com θ igual a zero); f) equatorial.	23
Figura 2.6 – Exemplo de função sensibilidade: valores mais altos indicam maior peso do bloco de dados na pseudo-seção.	27
Figura 2.7 - modelo padrão de discretização da subsuperfície utilizada pelo programa RES2DINV.	32
Figura 2.8 - Modelo padrão de discretização da subsuperfície utilizada pelo programa RES3DINV.	33
Figura 2.9 - Modelo de discretização da subsuperfície com blocos das camadas superiores divididos pela metade no sentido vertical.	33
Figura 2.10 - Modelo de discretização da subsuperfície com blocos das camadas superiores divididos pela metade no sentido horizontal e vertical.	34
Figura 3.1 - Localização dos Municípios de Serra e Serra Azul, região de Ribeirão Preto – SP e imagem de localização do Assentamento Sepé Tiarajú.	37
Figura 3.2 –a) e b) cano cerâmico que atravessa uma das bordas do tanque; c) e d) antiga área de distribuição (parte de fora do tanque); e) tanque de infiltração (borda e parte interna) e f) tanque de infiltração (parte interna).	41
Figura 3.3 – Mapa Topográfico da área.	43
Figura 3.4 - Descrição geológica do entorno.	46
Figura 4.1 - Estação Total – TCR 305	47
Figura 4.2 – Equipamento utilizado: <i>Syscal – R2 e Elrec Pro</i> .	51
Figura 4.3 - Localização das linhas de caminhamento elétrico	51
Figura 4.4 - Fotos de aquisição de dados em campo: a) TQ-1A b) TQ-1 c)TQ-2d) TQ-RD	53
Figura 5.1 – Localização da Linha TQ-1 ^a	61
Figura 5.2 - Apresentação do perfil TQ-1A (dados não filtrados) com dados topográficos.	61
Figura 5.3 - Gráfico (dados não filtrados) com valores de resistividade aparente mensurados e calculados pelo programa Res2dinv para a linha TQ-1A. A diferença entre os dados mensurados e calculados indica o erro do ajuste do modelo. Cada canal corresponde ao respectivo nível de investigação n.	63
Figura 5.4 -Apresentação do perfil TQ-1A (dados filtrados) com dados topográficos.	63
Figura 5.5 - Gráfico (dados filtrados) com valores de resistividade aparente mensurados e calculados pelo programa Res2dinv para a linha TQ-1A. A diferença entre os dados mensurados e calculados indica o erro do ajuste do modelo. Cada canal corresponde ao respectivo nível de investigação n.	65
Figura 5.6 – Localização da Linha TQ-0.	67
Figura 5.7 - Apresentação do perfil TQ-0 (dados não filtrados) com dados topográficos.	67
Figura 5.8 - Apresentação do perfil TQ-0 (dados filtrados) com dados topográficos.	69
Figura 5.9 – Localização da Linha TQ-1.	69
Figura 5.10- Apresentação do perfil TQ-1 (dados não filtrados) com dados topográficos.	71
Figura 5.11- Apresentação do perfil TQ-1 (dados filtrados) com dados topográficos.	71
Figura 5.12 - Localização da Linha TQ-2.	73
Figura 5.13 - Apresentação do perfil TQ-2 (dados não filtrados) com dados topográficos.	73
Figura 5.14 - Apresentação do perfil TQ-2 (dados filtrados) com dados topográficos.	75
Figura 5.15 – Localização da Linha TQ-3.	75
Figura 5.16 - Apresentação do perfil TQ-3 (dados não filtrados) com dados topográficos.	77
Figura 5.17 - Apresentação do perfil TQ-3 (dados filtrados) com dados topográficos.	77
Figura 5.18 – Pseudo-seção de resistividade aparente medido, pseudo-seção de resistividade aparente calculado e modelo de resistividades reais obtidos por meio de restrições dos valores de resistividade - Dados não filtrados.	79

Figura 5.19 - Modelo de resistividades reais com topografia obtido por meio de restrições dos valores de resistividade - Dados não filtrados	79
Figura 5.20 – Localização da Linha TQ-8.	81
Figura 5.21 - Apresentação do perfil TQ-8 (dados não filtrados e com “outliers”) com dados topográficos.	81
Figura 5.22 - Apresentação do perfil TQ-8 (dados filtrados e com “outliers”) com dados topográficos.	83
Figura 5.23- Apresentação do perfil TQ-8 (dados não filtrados e sem “outliers”) com dados topográficos.	83
Figura 5.24 - Apresentação do perfil TQ-8 (dados filtrados e sem “outliers”) com dados topográficos.	83
Figura 5.25 – Localização da Linha TQ-9.	85
Figura 5.26- Apresentação do perfil TQ-9 (dados não filtrados) com dados topográficos.	85
Figura 5.27- Apresentação do perfil TQ-9 (dados filtrados) com dados topográficos.	87
Figura 5.28 – Localização da Linha TQ-10.	87
Figura 5.29 - Apresentação do perfil TQ-10 (dados não filtrados) com dados topográficos.	89
Figura 5.30 - Apresentação do perfil TQ-10 (dados filtrados) com dados topográficos.	89
Figura 5.31 – Localização da Linha TQ-CS.	91
Figura 5.32- Apresentação do perfil TQ-CS (dados não filtrados) com dados topográficos.	91
Figura 5.33 - Apresentação do perfil TQ-CS (dados filtrados) com dados topográficos.	93
Figura 5.34 – Localização da Linha TQ-BF.	93
Figura 5.35 - Apresentação do perfil TQ-BF (dados não filtrados) com dados topográficos.	95
Figura 5.36 - Apresentação do perfil TQ-BF (dados filtrados) com dados topográficos.	95
Figura 5.37 – Localização da Linha TQ-RD.	97
Figura 5.38 - Apresentação do perfil TQ-RD (dados não filtrados) com dados topográficos.	97
Figura 5.39 - Apresentação do perfil TQ-RD (dados filtrados) com dados topográficos.	99
Figura 5.40 – Figura esquemática da distribuição das seções horizontais e verticais com relação aos eixos X, Y e Z e à direção dos perfis. A origem do sistema de coordenadas está assinalada no ponto de intersecção entre os três eixos (0,0).	101
Figura 5.41 – Representação 3D em seções horizontais com utilização do método de inversão Gauss-Newton incompleto e modelo padrão de discretização da subsuperfície – DADOS NÃO FILTRADOS. As setas em linha pontilhada representam a localização dos perfis e o quadrado em linha contínua representa a posição do tanque de vinhaça.	103
Figura 5.42 - Sentido do fluxo contaminante – DADOS NÃO FILTRADOS. As setas maiores indicam uma intensidade de fluxo maior.	105
Figura 5.43 – Seções verticais em YZ – DADOS NÃO FILTRADOS.	107
Figura 5.44 – Seções verticais em XZ – DADOS NÃO FILTRADOS.	109
Figura 5.45 – Representação 3D em seções horizontais com utilização do método de inversão Gauss-Newton incompleto e modelo padrão de discretização da subsuperfície – DADOS FILTRADOS. As setas em linha pontilhada representam a localização dos perfis e o quadrado em linha contínua representa a posição do tanque de vinhaça.	111
Figura 5.46 - Sentido do fluxo contaminante – DADOS FILTRADOS. As setas maiores indicam uma intensidade de fluxo maior.	113
Figura 5.47 – Seções verticais em YZ – DADOS FILTRADOS.	115
Figura 5.48 – Seções verticais em XZ – DADOS FILTRADOS.	117
Figura A1.1 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1A para dados não filtrados.	135
Figura A1.2 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1A para dados filtrados.	137
Figura A1.3 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-0 para dados não filtrados.	137
Figura A1.4 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-0 para dados filtrados.	139
Figura A1.5 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1 para dados não filtrados.	139
Figura A1.6 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1 para dados filtrados.	141
Figura A1.7- Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-2 para dados não filtrados.	141

Figura A1.8 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-2 para dados filtrados.	143
Figura A1.9 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-3 para dados não filtrados.	143
Figura A1.10 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-3 para dados filtrados.	145
Figura A1.11 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados não filtrados.	145
Figura A1.12 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados não filtrados e sem “outliers”.	147
Figura A1.13 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados filtrados.	147
Figura A1.14 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados filtrados e sem “outliers”.	149
Figura A1.15- Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-9 para dados não filtrados.	149
Figura A1.16 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-9 para dados filtrados.	151
Figura A1.17 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-10 para dados não filtrados.	151
Figura A1.18 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-10 para dados filtrados.	153
Figura A1.19 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-CS para dados não filtrados.	153
Figura A1.20 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-CS para dados filtrados.	155
Figura A1.21 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-BF para dados não filtrados.	155
Figura A1.22 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-BF para dados filtrados.	157
Figura A1.23 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-RD para dados não filtrados.	157
Figura A1.24 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-BF para dados filtrados.	159
Figura A2.1- Localização dos pontos de amostragem com as respectivas nomeações.	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição média da vinhaça para as três origens distintas (caldo, melação e misto).	5
Tabela 2.2 – Valores típicos de resistividade para alguns materiais	13
Tabela 2.3 – Coeficientes para obtenção das profundidades de investigação médias(Z), onde L é o comprimento total do arranjo e a a distância de separação entre eletrodos. A profundidade média de investigação teórica é obtida multiplicando-se a distância a ou L pelo respectivo coeficiente. Como exemplo, se a distância entre eletrodos é de 10 metros e o comprimento L total é de 80 metros para 6 níveis de investigação, tem-se uma profundidade aproximada de 17.30 metros.	29
Tabela A2.1 – Resultados das Análises Químicas. Amostras efetuadas dentro do tanque.	163
Tabela A2.2 – Resultados das Análises Químicas. Amostras efetuadas na zona anômala fora do tanque.	164
Tabela A2.3 – Resultados das Análises Químicas. Amostras efetuadas sobre a linha TQ-CS.	165

LISTA DE SÍMBOLOS

CTC - capacidade de troca catiônica

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

GPR - *Ground Penetration Radar*

ha - hectares

IAG - Instituto de Astronomia e Geofísica (USP)

IMECC- Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica (Unicamp)

IP - Polarização Induzida

MST - Movimento dos Sem-terra

pH – potencial hidrogeniônico

RMS - *root-mean-squared*

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

USP - Universidade de São Paulo

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A intensificação do uso do etanol no Brasil ocorreu em 1975 com a implementação do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), que tinha como objetivo principal a redução da dependência externa do petróleo (Takeshita 2006), no entanto, por volta de 1986 o programa perdeu força, com progressiva desregulamentação do setor e regulação dos preços e da produção comandadas pelo mercado (Marjotta-Maistro 2002).

Atualmente, as preocupações oriundas do efeito estufa e das mudanças climáticas, o reaquecimento do mercado interno pela introdução de carros bicombustíveis, a mistura obrigatória de álcool anidro a gasolina, a inserção do etanol como *commodity*, a liderança tecnológica da indústria alcooleira nacional, o aumento das exportações do etanol brasileiro e o crescente interesse global em reduzir as incertezas quanto ao preço do petróleo e em substituir oxigenantes altamente poluentes da gasolina têm colocado o etanol em destaque no cenário nacional e mundial e aumentado suas perspectivas de crescimento.

A expansão da produção de etanol, no entanto, infere conseqüências no âmbito ambiental e social. No âmbito social pode-se citar a concentração fundiária, a expulsão de pequenos agricultores do campo e a geração de subempregos. No âmbito ambiental, têm-se principalmente os impactos relacionados com o mau gerenciamento dos resíduos gerados na sua produção como o bagaço, a torta de filtro e principalmente a vinhaça, caracterizada como o principal efluente das destilarias de álcool.

A vinhaça, também chamada de vinhoto, calda, restilo, garapão, vinhote, caxixi, mosto, *still bottoms*, *slops*, *vinasse*, *dunder*, *stillage* ou *cachaza* (Freire 2000), constitui um dos grandes problemas da indústria alcooleira em vista do volume de resíduo produzido diariamente e, em conseqüência, dos problemas decorrentes da forma de descarte e do seu elevado potencial poluidor quando disposto em grandes quantidades no solo e nos corpos hídricos.

Em resposta ao problema da disposição final das grandes quantidades de resíduo produzidas, estudou-se a viabilidade de dispor o vinhoto diretamente no solo através da

fertirrigação dos canais por meio de canais condutores, aspersão ou caminhões, bem como a utilização de tanques de armazenamento (também chamados de tanques de infiltração, tanque de disposição ou áreas de sacrifício).

A utilização de tanques de armazenamento foi proibida e a fertirrigação passou então a ser utilizada intensivamente nos canais não só como adubo, mas também como forma de viabilizar o funcionamento das destilarias, lembrando que a entrada de matéria-prima e o descarte dos efluentes resultantes do processo produtivo representam peças-chave no funcionamento de qualquer empreendimento fabril.

A fertirrigação se mostrou uma alternativa viável, com redução significativa dos gastos com adubos e fertilizantes químicos e padrões ótimos de produção, enquanto os tanques de infiltração se mostraram fontes pontuais de contaminação do solo e da água subterrânea.

Entretanto, a aplicação de doses excessivas de vinhaça no solo pode causar alterações nas suas propriedades físicas e químicas e contaminar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos por percolação e/ou lixiviação (Pereira *et al.* 1992).

Acrescentando-se a este contexto a necessidade de buscar formas viáveis de detecção e avaliação de contaminações no meio geradas pela disposição inadequada de resíduos urbanos e industriais, os métodos geofísicos apresentam-se como uma importante ferramenta de investigação indireta da subsuperfície, não-destrutiva e de baixo custo quando comparada com as técnicas diretas de investigação (Reynolds 1997).

Determinados métodos geofísicos permitem obter dados contínuos em grandes áreas de cobertura, minimizando a necessidade de dados diretos e específicos, possibilitando uma análise temporal e espacial detalhada (Reynolds 1997) e permitindo também a identificação mais precisa das variações laterais decorrentes de mudanças litológicas ou variações originadas pela presença de resíduos.

Especificamente na avaliação da contaminação em profundidade, os métodos geofísicos são bastante utilizados para a localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tambores e tanques enterrados e determinação de vazamentos em tanques ou dutos (Cunha 2000).

O método da eletrorresistividade baseia-se no contraste de resistividade elétrica dos materiais em uma dada área de amostragem e sua aplicação em estudos ambientais é possível em

conseqüência do caráter mais resistivo ou mais condutivo de um dado contaminante frente ao terreno.

Estes contrastes dão lugar as anomalias, que podem indicar a presença de contaminação em subsuperfície, oferecendo subsídios para diagnosticar, monitorar a propagação de contaminantes e acompanhar a recuperação de uma área contaminada (Cetesb 2004).

Foram encontrados dois trabalhos na literatura relacionando vinhoto e eletrorresistividade: Mendes (1987) e Hassuda (1989). Ambos os trabalhos obtiveram valores de baixa resistividade relacionados à influência da vinhaça nas zonas saturada e não-saturada. Nestes trabalhos, os autores interpretavam os dados através das curvas de campo obtidas e utilizavam um valor base de *background* para o cálculo da resistividade de um dado ponto.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

- Apresentar um diagnóstico geral do quadro de influência/contaminação do solo no entorno do tanque desativado oriunda da disposição inadequada de grandes proporções de vinhaça;
- Avaliar a eficácia do método da eletrorresistividade com a utilização de tomografias elétricas com arranjo dipolo-dipolo para detecção e mapeamento de anomalias relacionadas à influência de grandes aplicações de vinhaça no solo na área de pesquisa em questão;
- Caracterizar o tipo de anomalia inerente ao vinhoto quanto aos seus valores de resistividade característicos no local estudado;
- Diagnosticar a influência da vinhaça fora dos limites do tanque de infiltração localizado no Assentamento Sepé Tiarajú, cidades de Serrana e Serra Azul – SP;

1.3. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Atualmente, a busca por combustíveis alternativos vem gerando uma considerável demanda da *commodity* etanol, cujo importante produtor é o Brasil. Segundo Macedo (2007), 425 milhões de toneladas de cana foram processadas no Brasil em 2006 produzindo cerca de 30 milhões de toneladas de açúcar e 17 milhões de metros cúbicos de etanol.

Com o crescimento das vendas dos veículos bicombustíveis e a competitividade do etanol frente à gasolina, a expectativa é de que na safra 2012/13 o setor sucroalcooleiro esteja processando aproximadamente 700 milhões de toneladas de cana, produzindo 36 bilhões de litros de álcool e 39 milhões de toneladas de açúcar (Unica 2007). Segundo Cabrini (2007), a quantidade de álcool exportado pelo Brasil no período de 2001 a 2005 cresceu cerca de 652%.

Os dados supracitados permitem imaginar a importância da produção sucro-alcooleira para o país e a relevância dos estudos relacionados a estes temas.

A importância do estudo em questão é notória pelo elevado potencial poluidor da vinhaça e da grande quantidade de resíduo produzida. O aumento das perspectivas de produção e de exportação do etanol eleva as preocupações ambientais e a necessidade de estudos aprofundados no que concerne ao uso e destinação da vinhaça e seu impacto no meio ambiente.

Dessa forma, a pesquisa oferece subsídios para outros estudos e aplicações posteriores referentes à detecção, mapeamento e monitoramento de zonas com alta influência/contaminação por vinhaça utilizando métodos geoeletricos.

A utilização da geofísica aplicada especificamente ao contaminante vinhoto é escassamente relatada na literatura, e não há estudos recentes que agreguem a metodologia e as técnicas atuais à problemática da vinhaça.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONTAMINANTE: VINHAÇA

2.1.1. ORIGEM

A vinhaça é um resíduo da indústria alcooleira resultante da produção de álcool, butanol e aguardente (Longo 1994). A utilização intensiva da vinhaça nos canaviais surgiu pela produção de mais de 150 bilhões de litros desse resíduo por safra (Rodella e Ferrari 1977), resultante do aumento na demanda de etanol pela implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975.

Para a produção do álcool, a cana-de-açúcar é lavada e moída nas moendas para a extração do caldo, que é submetido ao processo de clarificação, concentração e centrifugação, obtendo-se açúcar comercial e mel. O mel, após novo processo de cozimento a vácuo para obtenção do açúcar de segunda, transforma-se em mel final ou melaço. O melaço, após ser diluído, origina o mosto de melaço, que é enviado às dornas de fermentação para a formação do vinho. O vinho é então encaminhado para as colunas de destilação, resultando no álcool hidratado e na vinhaça (Freire 2000).

Existem três tipos possíveis de vinhoto advindos da indústria sucro-alcooleira: aquele oriundo do mosto de caldo de cana, aquele proveniente do mosto de melaço e o resultante da mistura dos dois mostos (Nascimento 2003).

Segundo estudos feitos por Gunkel *et al.* (2006), estima-se que destilarias anexas de álcool produzam, em geral, uma média de 156 litros de vinhaça e 250 quilos de bagaço a cada 1000 quilos de cana para obter 12 litros de álcool e 94 quilos de açúcar.

2.1.2. CARACTERIZAÇÃO

A vinhaça de cana-de-açúcar é um líquido pardo que se torna mais escuro à medida em que é oxidado (Longo 1994), com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, de natureza ácida, elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), corrosivo e altamente poluidor (Freire 2000).

A vinhaça procedente da fermentação do melaço é produzida, em média, à razão de 13 litros por litro de álcool destilado e é composto de 93% de água e 7% de sólidos, dentre os quais 75% são compostos por matéria orgânica e 25% de fração mineral (Ludovice 1997).

Nascimento (2003), por sua vez descreve que a vinhaça é composta por uma fração variável de sólidos totais entre 2% e 8%, dentre os quais a maioria é solúvel e 70% são orgânicos. Dentre os sólidos inorgânicos, o potássio apresenta-se em maior concentração (aproximadamente 10%).

A DBO da vinhaça é da ordem de 12 000 mg/L a 20 000 mg/L o que justifica a alta ação redutora, exigindo uma elevada quantidade de oxigênio para a decomposição da matéria orgânica (Lyra *et al.* 2003 a) e causando grandes prejuízos a vida aquática (Longo 1994).

Quanto à insalubridade, a vinhaça pode poluir os cursos d'água pelo aumento de sua turbidez, pela produção de gases fétidos, além de conferir gosto e odor desagradáveis à água. Pode também agravar problemas relacionados a doenças endêmicas e proliferação de insetos (Freire 2000).

Dentre os principais constituintes da vinhaça estão o potássio, o nitrogênio e grande porcentagem de matéria orgânica. O material orgânico e o baixo pH (3,5 a 4,5) são responsáveis pelo alto poder poluente do vinhoto em cursos d'água (Pereira *et al.* 1992).

A composição química da vinhaça varia segundo uma série de fatores, sendo os principais: a natureza e a composição da matéria-prima, o sistema usado no preparo do mosto, o método de fermentação adotado e o modo de conduzir a fermentação alcoólica, a raça de levedura utilizada e o tipo de aparelho destilatório, maneira como é feita a destilação, o tipo de fleugma separado (Longo 1994), o período de safra (Freire 2000), as condições industriais e as condições climáticas (Prada 1998).

A composição química média da vinhaça para o vinhoto advindo do mosto de caldo de cana, do mosto de melaço e da mistura de ambos pode ser observada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição média da vinhaça para as três origens distintas (caldo, melação e misto).

Parâmetro	Unidade	Melaço	Caldo	Misto
pH		4.4 - 4.6	3.7 - 4.6	4.2 – 5.0
Temperatura	°C	80 – 100	80 - 100	80 - 100
DBO	mg/L O ₂	19800	6000 – 16500	25000
DQO	mg/L O ₂	45000	15000 – 33000	65000
Sólidos Totais	mg/L	52700	23700	81500
Sólidos Voláteis	mg/L	40000	20000	60000
Sólidos Fixos	mg/L	12700	3700	21500
Nitrogênio	mg/L N	480 – 710	150 - 700	450 - 1610
Fósforo	mg/L P ₂ O ₅	9 - 200	10 - 210	100 - 290
Potássio	mg/L K ₂ O	3340 - 4600	1200 - 2100	3740 - 7830
Cálcio	mg/L CaO	1330 – 4570	130 - 1540	450 - 5180
Magnésio	mg/L MgO	580 – 700	200 - 490	420 -1520
Sulfato	mg/L SO ₄ ²⁻	3700 – 3730	600 - 760	6.400
Carbono	(mg/L C)	8700 – 12100	5700 - 13400	11200 - 22900
Relação C/N		16,4 – 16,43	19,7 – 21,07	16 – 16,27
Matéria Orgânica	mg/L	3800	19500	63400
Substâncias Redutoras	mg/L	8300	7900	9500

Fonte: Prada *et al.* (1998).

O vinhoto é um resíduo altamente corrosivo pela presença de ácido sulfúrico nas dornas de fermentação (Goméz e Rodriguez, 2000) e de condutividade elétrica bastante alta (Hassuda, 1989), caracterizada, segundo estudos realizados por Lyra (2003 b) e Brito *et al.* (2007) entre 10 dS^{m-1} e 15 dS^{m-1}.

2.1.3. IMPACTOS AMBIENTAIS

Quando aplicado no solo, o vinhoto modifica certas características físicas e químicas do solo, elevando o pH, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a disponibilidade de alguns íons, além de aumentar a retenção de água pelo solo, modificar sua estrutura física (Glória e Orlando Filho 1983), alterar a porosidade, a condutividade elétrica e afetar diretamente a população microbiana (Pereira *et al.* 1992). Longo (1994) enfatiza ainda que concentrações de potássio em excesso podem levar o solo a uma condição de salinização.

Considerando-se a poluição das águas subterrâneas por vinhaça, Longo (1994) aponta as lagoas de estabilização e os tanques de infiltração como fontes pontuais de poluição ou fontes difusas em áreas superiores a 100 ha.

Estudos realizados por Jesus *et al.* (1983), citado por Longo (1994), em bacias de acumulação de vinhaça de usinas do norte fluminense (RJ) constataram a alta taxa de infiltração do vinhoto no solo em comparação a taxa de evaporação e baixas taxas de redução da DBO.

Gloeden (1994) realizou um estudo para determinar a dinâmica dos constituintes da vinhaça através das zonas saturadas e insaturadas. O projeto foi instalado na Usina da Pedra, Município de Serrana – SP, localizada no Aquífero Botucatu, em área de Latossolo Vermelho-Amarelo. O local estudado foi dividido em três áreas: a primeira área recebeu 150 m³/ha de vinhaça, a segunda não recebeu vinhaça e a terceira recebeu 300 m³/ha. Os resultados obtidos permitiram concluir que para irrigações com vinhaça, o cloro, o carbono orgânico, o amônio e o nitrogênio orgânico aparecem como elementos contaminantes da água subterrânea.

Ludovice (1997) afirma em seu estudo que os solos sob os canais de escoamento de vinhaça não impermeabilizados são excessivamente suscetíveis a contaminação por percolação da ordem de 91,4%, colocando em risco a potabilidade dos lençóis freáticos.

Em sua pesquisa utilizando os métodos geofísicos eletrorresistividade e eletromagnético indutivo, Hassuda (1989) afirma que os métodos aplicados foram importantes na correta localização dos piezômetros utilizados e conclui que a infiltração da vinhaça na água subterrânea prejudica sua potabilidade pela transferência de altas concentrações de amônia, magnésio, alumínio, ferro, manganês, cloreto e matéria orgânica para a água subterrânea.

No Município de Rio Largo, Maceió, foi evidenciada contaminação do Sistema Aquífero Barreiras pelas altas concentrações de potássio (126 mg/L) e magnésio (154 mg/L) (Cavalcante *et al.* 1994).

Em Alagoas, a contaminação da água subterrânea em área cultivada com cana-de-açúcar também foi observada em Parapueira através de análises físico-químicas realizadas entre 1983 e 1996. As análises revelaram valores de pH decrescentes de 6.4 a 4.24 e valores crescentes de nitratos entre 0.20 e 8.25 mg/L (Ferreira Neto et al. 2000).

2.1.4. LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA

A legislação específica relativa à vinhaça pode ser resumida em duas portarias do Ministério do Interior e a norma técnica P4.231:

- *Portaria do Ministério do Interior nº323, de 29 de novembro de 1978* – Proíbe lançamento de vinhoto em coleções de água por destilarias de álcool instaladas ou que venham a se instalar no Brasil;

- *Portaria do Ministério do Interior nº 158, de 3 de novembro de 1980* – Dispõe sobre o lançamento do vinhoto em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar;

- *A Norma Técnica P4.231* dispõe sobre os critérios e procedimentos para aplicação da vinhaça no solo agrícola, especificando as restrições quanto as áreas de aplicação, suspendendo o armazenamento/disposição deste resíduo em áreas de sacrifício, determinando procedimentos para monitoramento, verificação de contaminação, impermeabilização dos tanques e canais, caracterização do solo e da vinhaça e traça exigências e procedimentos para o “plano de aplicação de vinhaça”.

2.2. GEOFÍSICA AMBIENTAL

A prospecção geofísica integra um conjunto de conhecimentos e técnicas multidisciplinares, englobando principalmente ciências da terra, física e matemática aplicadas ao estudo do subsolo.

O termo “geofísica ambiental” é definido, segundo (Reynolds 1997), como:

“Aplicação dos métodos geofísicos para a investigação do fenômeno físico-químico em sub-superfície que tenha

implicações significativas para o gerenciamento ambiental local”.

A geofísica se apóia no contraste entre materiais que ocorre pela variação de uma ou mais propriedades físicas do solo, nos métodos eletromagnéticos, por exemplo, existem três magnitudes principais: a resistividade elétrica, a constante dielétrica e a permeabilidade magnética (Orellana 1982).

O contraste da variação de cada uma destas propriedades físicas em uma determinada área de estudo é que define o método geofísico a ser empregado. Dessa forma, por exemplo, o método eletrorresistivo baseia-se na distribuição da resistividade elétrica ao longo do perfil, enquanto o GPR (*Ground Penetration Radar*) se baseia na variação da constante dielétrica.

As técnicas geofísicas influem vantagens frente aos métodos diretos de investigação como as trincheiras e as perfurações em subsuperfície, já que são não-destrutivas, apresentam maior rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente mais baixo e ainda possibilitam a realização de perfis contínuos de dados que permitem a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea. Nas formas diretas de investigação do solo muitas vezes se utiliza técnicas estatísticas de amostragem, onde áreas-chave de contaminação muitas vezes são perdidas (Reynolds 1997).

Um exemplo prático da vantagem do método indireto e não destrutivo é, segundo o mesmo autor, a localização de tambores contendo resíduos químicos tóxicos, que se perfurados erroneamente podem produzir acidentes ambientais de proporções mais graves. Nesse caso, métodos eletromagnéticos permitem localizar os tambores, isolando-os, de forma que a escavação e retirada dos mesmos possa ser feita de forma segura.

As informações geofísicas são úteis na locação dos poços de monitoramento e podem fornecer estimativas de área e de volume para as atividades de remoção e de remediação de solos contaminados. A geofísica é aplicável às diferentes etapas do gerenciamento ambiental: na etapa de investigação confirmatória, são utilizadas na localização dos pontos de amostragem mais adequados; na fase de remediação, podem ser aplicados na avaliação da eficiência dos trabalhos de recuperação; na fase de monitoramento, podem mapear a evolução da contaminação (Cunha 2000).

Quanto aos métodos elétricos, Loke e Barker (1996) e Loke (2002) acrescentam que o imageamento elétrico é amplamente utilizado para mapear áreas com complexa subsuperfície.

Esses métodos são amplamente utilizados na busca de falhas e fissuras em sub-superfície, localização de artefatos e sítios arqueológicos, localização de cavidades, monitoramento de recursos hídricos subterrâneos (Reynolds 1997) e na obtenção de informações a cerca da litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse (Cunha 2000).

A aplicação de métodos elétricos para estudos ambientais é amplamente relatada na literatura, podendo-se citar Vogelsang (1995), Reynolds (1997), Bernstone *et al.* (2000); Meju (2000); Aristodemou & Thomas – Betts (2000); Ahmed & Sulaiman (2001); Moura & Malagutti Filho (2003).

2.2.1. MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE

Fundamentos do Método

O progresso geral da física no fim do século XIX e princípios do século XX atingiu também os estudos relacionados à estrutura geológica da Terra e ao desenvolvimento da geofísica aplicada em geral e aos métodos elétricos de exploração em particular. Em 1903, o engenheiro russo E. I. Ragozin publicou o estudo “Aplicação da eletricidade para exploração de jazidas minerais”, informando sobre a possibilidade de utilizar os métodos elétricos na prospecção de corpos minerais e na investigação das propriedades elétricas das rochas (Iakubovskii *et al.* 1980).

Em 1910, o francês Conrad Schlumberger aperfeiçoou o método, que mais tarde obteve grande sucesso nas investigações de geologia estrutural (Iakubovskii *et al.* 1980).

O método foi amplamente empregado principalmente na busca de formações aquíferas, em correlações estratigráficas em campos de petróleo e na prospecção mineral (Parasnis 1978).

O objetivo dos levantamentos elétricos é determinar a distribuição dos valores de resistividade em subsuperfície através de medidas indiretas do solo, que permitem estimar sua resistividade real. A resistividade elétrica é caracterizada pela resistência à passagem de corrente elétrica em um determinado meio.

As medidas de resistividade geralmente são feitas a partir da aplicação de corrente elétrica no solo. A injeção de corrente é feita por meio de dois eletrodos (nomeados aqui como eletrodos de corrente A e B) e a diferença de potencial é mensurada em outros dois eletrodos (nomeados aqui como eletrodos de potencial M e N), como pode ser visualizado na Figura 2.1. Os eletrodos de corrente e de potencial podem ser dispostos segundo diferentes arranjos eletródicos, como explicado mais adiante.

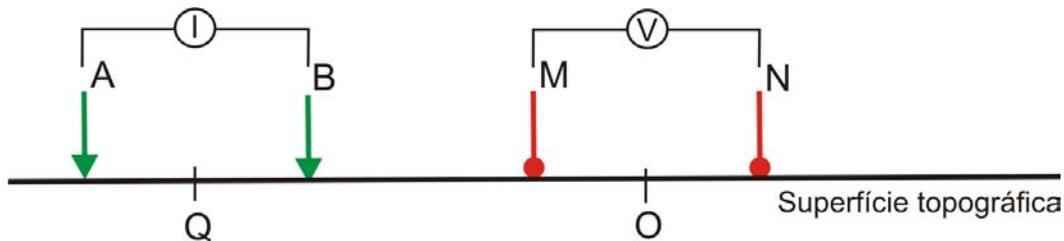


Figura 2.1 – Eletrodos de injeção de Corrente AB e eletrodos de potencial MN.

A resistividade elétrica de um meio homogêneo (ρ) pode ser calculada através dos valores da corrente estabelecida (I), da geometria da disposição dos eletrodos no terreno (K) e do potencial medido entre os eletrodos de potencial (ΔV) (Orellana1982), segundo a seguinte equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}. \quad (2.1)$$

Segundo Orellana (1982), quando os quatro eletrodos estão dispostos sob uma configuração qualquer em uma superfície plana, o coeficiente de dispositivo K é obtido pela equação geral:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}. \quad (2.2)$$

Para o arranjo dipolo-dipolo, utilizado neste trabalho, Orellana (1982) sugere uma aproximação da equação geral (2.2) do coeficiente de dispositivo K , considerando a nomenclatura e as distâncias entre eletrodos conforme a figura 2.1:

$$K = \frac{\pi \cdot \overline{OQ}^3}{AB \cdot MN} \quad (2.3)$$

Como o solo não é um meio homogêneo, a resistividade é dada aparente (ρ_a), e é calculada, segundo Sheriff (1989), através da expressão:

$$\rho_a = K \cdot \frac{V}{I}.$$

(2.4)

O valor de resistividade aparente é obtido, portanto, pelo produto do fator geométrico (K) e da resistência medida (R), enunciada pela Lei de Ohm (2.5), onde V corresponde à diferença de potencial que passa através de um resistor e I , a corrente que passa através deste:

$$R = \frac{V}{I}. \quad (2.5)$$

Os valores de diferença de potencial medidos e da corrente estabelecida variam segundo a resistividade aparente do solo e o arranjo geométrico dos eletrodos, de forma que a profundidade alcançada geralmente aumenta conforme se aumenta o espaçamento entre eletrodos de corrente (Orellana 1982).

A resistividade medida é dada aparente uma vez que os terrenos são meios não homogêneos e por isso o valor representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras de um volume de material em subsuperfície.

É importante lembrar que a resistividade aparente não é uma propriedade física do meio, ao contrário da resistividade real, por conseqüência, todos os dados de resistividade obtidos em campo são dados de resistividade aparente, enquanto aqueles obtidos após inversão são considerados como de resistividade real (Reynolds 1997).

Em solos e rochas, a propagação de corrente elétrica pode ocorrer pela presença de minerais metálicos e grafita em sua matriz, que é denominada condutividade eletrônica, ou pelo deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, que é denominado condutividade eletrolítica. Na maior parte dos casos predomina-se a condutividade eletrolítica, uma vez que raramente os minerais condutores ocorrem em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global (Parasnis 1978).

A resistividade das rochas é uma propriedade que varia dentro de limites amplos: desde 10^{-6} Ohm.m para minerais como grafite até mais de 10^{12} Ohm.m para rochas de quartzo secos. A maioria das rochas é isolante quando não possuem umidade, em seu estado natural, quase sempre contêm água intersticial com sais dissolvidos e adquirem, portanto, uma condutividade iônica que depende do grau de umidade e da natureza e da concentração dos eletrólitos (Parasnis 1978).

Para solos, a resistividade elétrica depende de muitos fatores, como a porosidade, a resistividade elétrica do fluido contido nos poros, a composição do solo, grau de saturação,

orientação e forma das partículas e estrutura do poro (Keller and Fricknecht (1966); Parkhomenko (1967); Abu-Hassanein (1996)).

A resistividade dos solos e das rochas tende a diminuir com o aumento da umidade e do volume de sólidos dissolvidos na água intersticial. A resistividade de sedimentos não-saturados é muito mais alta que a resistividade dos mesmos sedimentos em condições saturadas em água (McNeill 1980).

As rochas metamórficas e ígneas possuem tipicamente altos valores de resistividade. Rochas sedimentares, que em geral são mais porosas e possuem maior conteúdo de água, tendem a ter valores de resistividade mais baixos (Loke 2000).

As rochas e os solos argilosos tendem a ser menos resistivos que seus equivalentes arenosos, uma vez que a superfície de contato por unidade de volume da argila é muito grande e muitos íons são adsorvidos pela sua superfície. Quando a argila é imersa em um fluido, os íons adsorvidos podem se dissociar das partículas de argila e se tornar disponíveis, contribuindo para o aumento da condutividade (McNeill 1980).

A Tabela 2.2 apresenta os valores típicos de resistividade para alguns materiais, no entanto, deve-se ressaltar que muitos dos valores de resistividade são iguais para materiais diferentes. Isso ocorre porque, como mencionado anteriormente, a resistividade de um solo ou rocha em particular depende de um grande número de variáveis (Loke 2000).

A relação entre o solo e a água na zona não saturada está ligada à força matricial, resultante da interação dos fenômenos da capilaridade e da adsorção. A capilaridade é uma força resultante da tensão superficial do fluido em relação à pressão atmosférica enquanto a adsorção é caracterizada como uma forte força de atração entre as moléculas da água e as partículas sólidas, criando uma fina camada de água em torno das partículas dos sedimentos, denominada teor de umidade ótimo. A presença de matéria orgânica intensifica esse processo e aumenta a quantidade de água retida pelo solo (Van Dam 2001).

Parkhomenko (1967) cita a relação entre resistividade (ρ_t) do solo saturado e a resistividade do fluido contido em seus poros (ρ_w), que é dado por Archie (1942) pela relação:

$$\rho_t = \rho_w \phi^{-n}, \tag{2.6}$$

onde ϕ equivale à porosidade e n é uma constante que varia segundo o tipo de solo ou rocha. Por esta lei, geralmente referida como Lei de Archie, a resistividade elétrica de um solo saturado é

sensível à porosidade, a resistividade elétrica do fluido contido no poro, às características dos sólidos e a estrutura dos poros.

Tabela 2.2 – Valores típicos de resistividade para alguns materiais

Material	Resistividade ($\Omega.m$)
Basalto	$10^3 - 10^6$
Granito	$5.10^3 - 10^6$
Areia	$8 - 4.10^3$
Argila	1 - 100
Solo com 40% de argila	8
Solo com 20% de argila	33
Argila seca	50 – 150
Argila arenosa/ Arenito argiloso	30 – 215
Argila, areia, silte	25 – 150
Areia com argila	50 – 300
Areia, cascalho em água subterrânea	200 – 400
Areia, cascalho, seco	800 – 5000
Aluvião	10 – 800
Água subterrânea	10 – 100
Água do mar	0.2
Resíduos	
Lixo doméstico	12 – 30
Lodo industrial	40 – 200
Pluma contaminada por chorume	1 – 10

Fonte: Vogelsang (1995), Reynolds (1997), Loke (2000).

Keller & Frischknecht (1966) citam a equação (2.7) que relaciona a resistividade elétrica de um solo parcialmente saturado (ρ_{pt}) com o mesmo solo saturado com o mesmo eletrólito (ρ_t):

$$\frac{\rho_{pt}}{\rho_t} = S_w^{-n_1}; S_w > S_{wc}$$

(2.7)

onde S_w representa a fração do volume total do poro preenchido com o eletrólito e n_1 é um parâmetro determinado experimentalmente, usualmente, com valor aproximado de 2. A equação 2.7 se aplica quando o conteúdo em água é maior que o teor de umidade ótimo (também chamada de saturação crítica), que corresponde à quantidade mínima de água necessária para manter a fina camada de água em torno das partículas sólidas e que depende da textura da rocha (Keller & Frischknecht, 1966).

Da equação (2.7) se deduz que um aumento no grau de saturação implica em uma redução nos valores de resistividade. Quando o grau de saturação cai a valores menores que o teor ótimo, pequenas perdas no conteúdo de água representam grandes e abruptos aumentos nos valores de eletroresistividade (Parkhomenko 1967; Abu-Hassanien 1996).

Para níveis de saturação abaixo do teor ótimo, a equação que relaciona resistividade ao grau de saturação é dada, segundo Keller & Frischknecht (1966), pela equação (2.8):

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = a S_w^{-n_2}; S_w > S_{wc} . \quad (2.8)$$

Onde a e n_2 são determinados experimentalmente variando, respectivamente, entre 0 a 0.5 (0 para rochas arenosas e aproximadamente 0.5 para rochas ígneas) para o primeiro parâmetro e, entre 4 e 5 para o segundo.

Os levantamentos eletroresistivos são sensíveis também à compactação da argila, às condições de compactação e a composição do solo (Abu-Hassanien 1996).

Quando um solo é compactado abaixo do teor de umidade ótimo, a resistividade elétrica é alta, enquanto a resistividade é baixa se o solo é compactado com teores acima do valor ótimo. A resistividade é bastante sensível ao teor de umidade quando este está abaixo da saturação crítica, no entanto, quando o teor está acima do ótimo, a resistividade é quase independente do teor de umidade (Abu-Hassanien 1996).

Quando a compactação acontece abaixo do teor de umidade ótimo ou em condições de baixa compactação, as partículas de argila têm maior dificuldade em remodelarse e os poros entre

partículas são relativamente grandes. Muitos desses poros são preenchidos com ar e o contato partícula-partícula é muito pequeno em função da baixa umidade, o que resulta em altos valores de resistividade nestes tipos de solo (Abu-Hassanien 1996).

Arranjos Eletródicos e Aquisição de Dados

No método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aquisição de dados, que podem ser divididas basicamente entre sondagens elétricas verticais (investigações unidimensionais em profundidade – variações verticais da resistividade), caminhamentos elétricos (investigações unidimensionais com deslocamento lateral – variações horizontais de resistividade), tomografias elétricas (investigações bidimensionais) e levantamentos tridimensionais.

Cada uma destas técnicas permite o arranjo dos eletrodos em diversas configurações, como os arranjos pólo-pólo, pólo-dipolo, dipolo-dipolo, Schlumberger e família Wenner (alfa, beta e gama). O quadro esquemático dos diversos tipos de arranjos pode ser apreciado na Figura 2.2. Neste trabalho, foi utilizada a técnica de tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo.

Na Figura 2.2, as distâncias na indicam a distância a de separação entre os eletrodos de corrente e de potencial, multiplicado por um número, em geral, inteiro n . No arranjo Schlumberger, O indica o centro do arranjo e L a distância $AB/2$.

Em geral, os levantamentos que utilizam sondagens elétricas são aplicados quando se deseja uma informação pontual, com observação da variação vertical da resistividade. Em contrapartida, levantamentos utilizando caminhamentos elétricos são aplicados quando se objetiva estudar as variações laterais mantendo-se uma profundidade teoricamente constante (Telford *et al.* 1990).

Nas sondagens elétricas verticais (SEVs), o ponto de investigação é idealmente o centro do arranjo eletródico (Figura 2.3). As medições são feitas começando pela menor separação entre eletrodos seguida por separações maiores. Uma medição de resistividade é realizada a cada nova separação entre eletrodos e os valores são plotados em um gráfico bilogarítmico de ρ_a pela distância entre os eletrodos de corrente dividido por dois ($AB/2$) para posterior interpretação (Reynolds 1997).

No caminhamento elétrico, para o arranjo dipolo-dipolo a aquisição de dados é feita aumentando-se a distância a entre os eletrodos de corrente e de potencial através de um fator de

multiplicação n , como pode ser observado na Figura 2.3, dessa forma, esse tipo de aquisição possibilita o estudo das variações de resistividade ao longo de uma linha de observação (Iakubovskii *et al.* 1980).

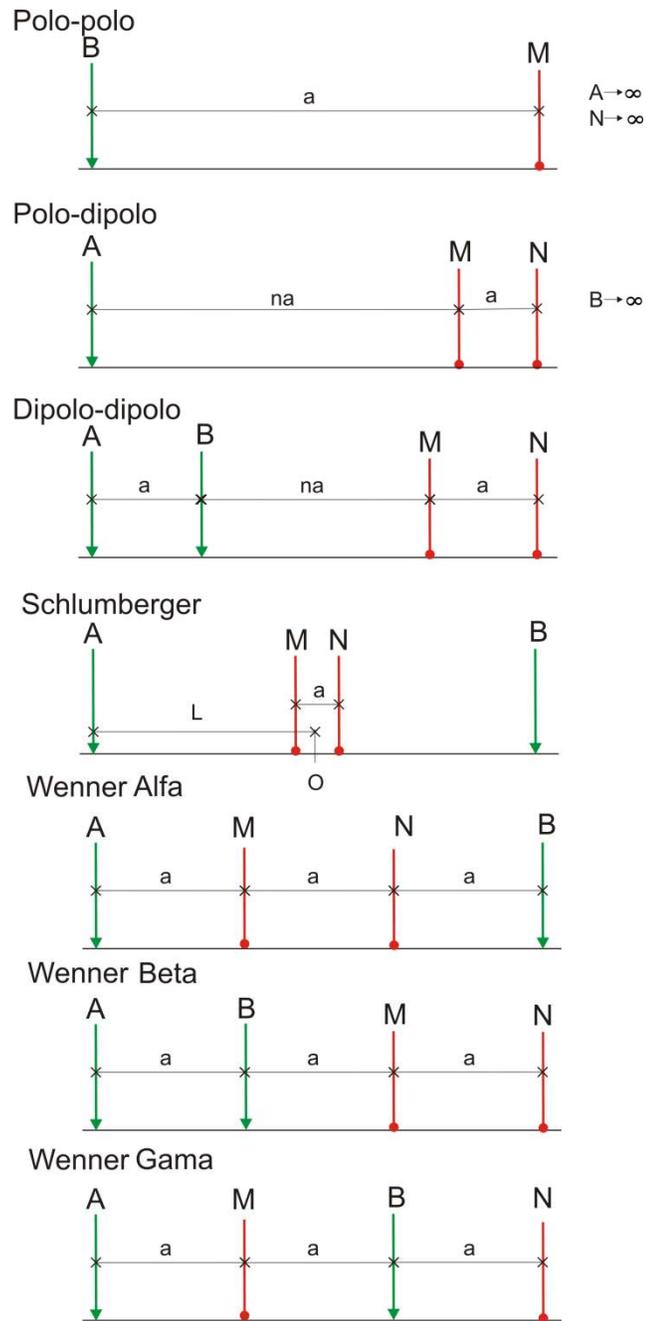


Figura 2.2 - Principais dispositivos eletródicos.

Fonte: Koefoed (1979), Sheriff (1989), Loke (2000)

DIPOLO-DIPOLO

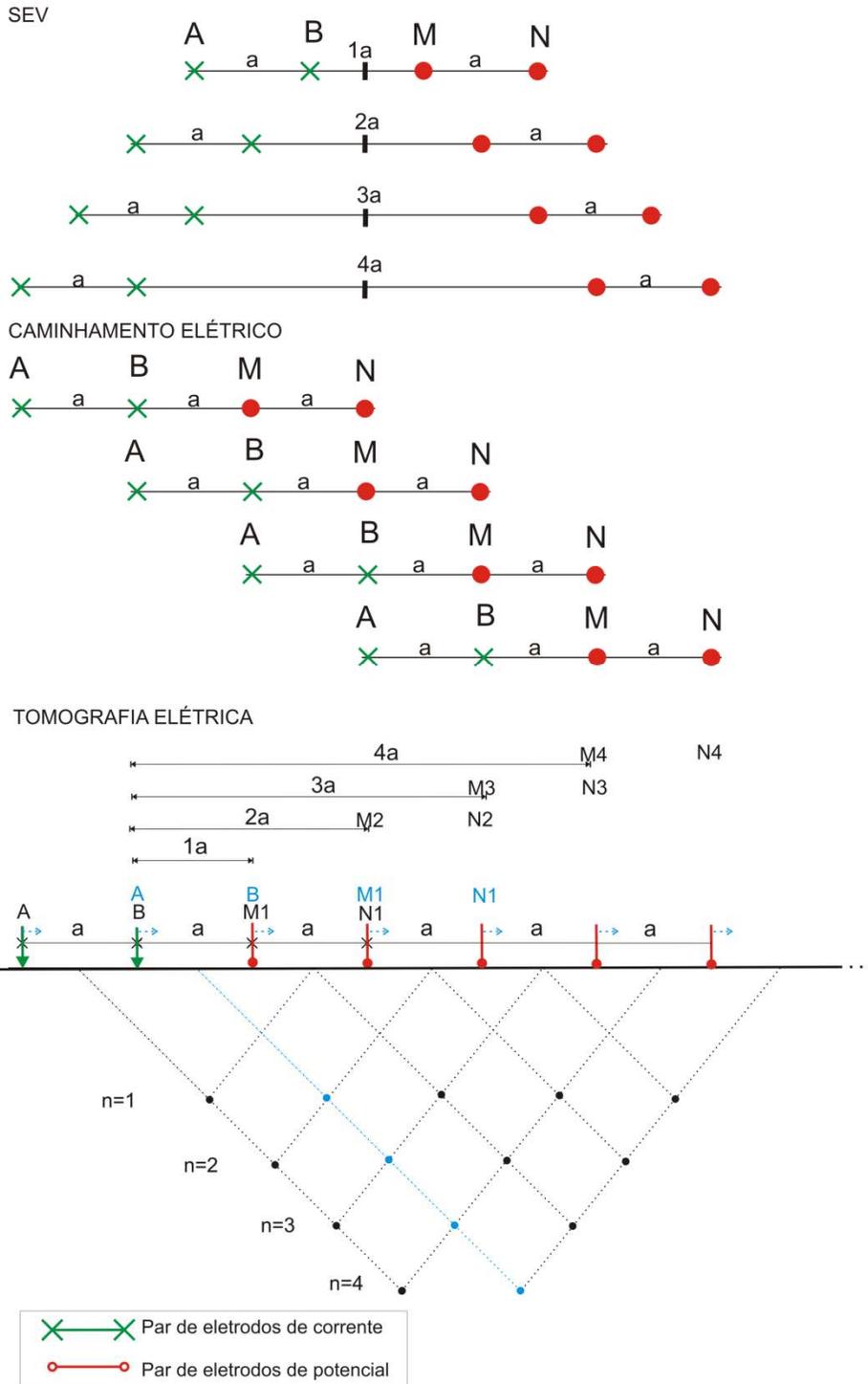


Figura 2.3 – Diferentes técnicas de aquisição de dados: SEV, caminhamento elétrico e tomografias elétricas.

Para espaçamentos de n superiores a 6, a acurácia das medições de potencial ficam comprometidas pelos baixos valores de potencial (Loke 2000). Para valores de n maiores, a força do sinal (*signal strength*) tende a diminuir, uma vez que a voltagem é inversamente proporcional ao cubo do fator n . Uma forma de resolver este problema é aumentar o espaçamento “ a ” entre os eletrodos de forma que o potencial não se reduza em demasiado quando o comprimento total do arranjo for aumentado (Figura 2.4). Para um baixo valor de n a força do sinal é 28 vezes maior que para um fator n maior.

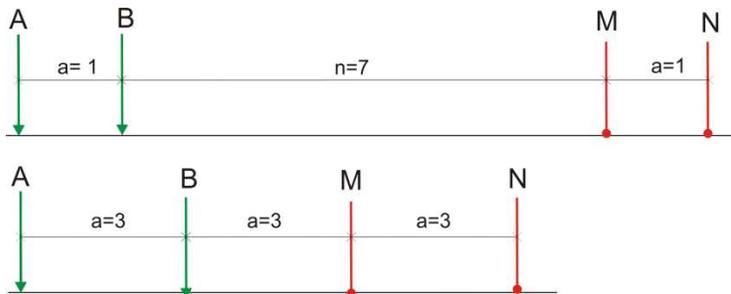


Figura 2.4 - Aumento do espaçamento “ a ” em detrimento do aumento de “ n ” para manter a força do sinal suficientemente alta.

Fonte: Loke (2000) adaptado

Uma das recentes aprimorações do método eletrorresistivo foi a implementação de tomografias elétricas ou imageamento 2-D, que unem as vantagens das sondagens e dos caminhamentos elétricos em um mesmo perfil, e permitem mapear áreas com geologia moderadamente complexas (Loke 2000).

A tomografia elétrica 2D é utilizada para investigações em sub-superfície de alta resolução aplicados principalmente à arqueologia, meio-ambiente e engenharia (Reynolds 1997).

Na tomografia elétrica (Figura 2.3) segundo o arranjo dipolo-dipolo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos em linha, com igual espaçamento entre os eletrodos ($a = AB = MN$). As medidas são feitas caminhando-se com o conjunto de eletrodos ao longo do perfil efetuando medidas de resistividade aparente em vários níveis teóricos de investigação (n).

Os dispositivos dipolares foram desenvolvidos na União Soviética (Koefoed 1979) e têm sido extensamente utilizado por geofísicos russos desde os anos 50, por canadenses visando à exploração mineral, e por norte-americanos para investigações direcionadas à água subterrânea (Reynolds 1997).

Existe uma variedade de configurações dipolares (Figura 2.5), todas com a distância a entre os dois eletrodos de corrente e entre os dois eletrodos de potencial são relativamente pequenas, e a distância na que separa os dois pares de eletrodos é consideravelmente grande (Koefoed 1979).

Neste trabalho, as considerações sobre o arranjo dipolo-dipolo referem-se à configuração axial ou radial com θ igual a zero, que foi a utilizada neste trabalho, a menos que seja especificado o contrário.

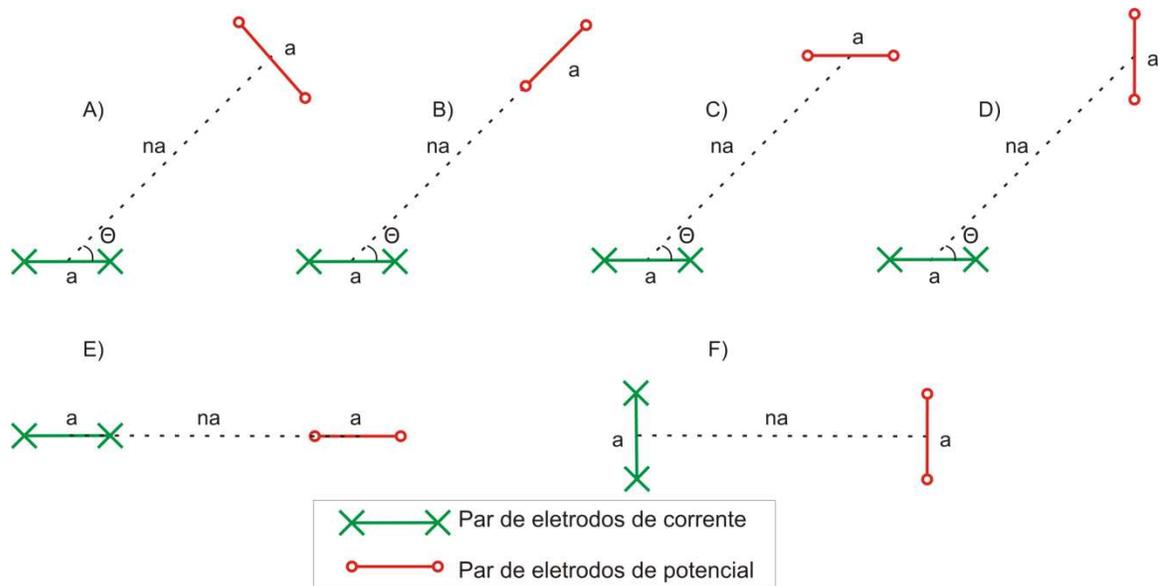


Figura 2.5 - Dispositivos dipolares: a) azimutal; b) radial; c) paralelo; d) perpendicular; e) axial (radial com θ igual a zero); f) equatorial.

Fonte: Koefoed (1979), Sheriff (1989) - adaptado.

O emprego do termo “dipolo” não é correto, uma vez que o significado do termo implica que o espaçamento entre os eletrodos de potencial ou de corrente seja insignificante frente ao comprimento do dispositivo, o que não ocorre, no entanto, a utilização do termo já é corrente (Reynolds 1997).

Segundo Loke (2000), o dispositivo eletródico dipolo-dipolo é mais sensível a mudanças de resistividade horizontais e relativamente insensível a mudanças verticais de resistividade, o que significa dizer que é adequado para mapeamento de estruturas verticais, como dique e cavidades e relativamente fraco para mapeamento de estruturas horizontais como soleiras ou camadas sedimentares.

Koefoed (1979) afirma que as configurações dipolares são aplicadas em investigações em profundidade e acrescenta ainda que, para a mesma profundidade, é necessário um comprimento

de cabo menor se comparado aos arranjos Schlumberger ou Wenner, uma vez que se necessita unicamente de um cabo para conectar os eletrodos de potencial e outro para os eletrodos de corrente. No entanto, para uma mesma profundidade, a diferença de potencial medida no dispositivo dipolar é consideravelmente menor que aquela medida no dispositivo Schlumberger.

Se comparado a outros arranjos eletródicos, o arranjo dipolo-dipolo é caracterizado pela fácil e rápida aquisição de dados. No arranjo Wenner, por exemplo, é necessário movimentar os quatro eletrodos a cada medição, o que implica em um significativo aumento do tempo de aquisição de dados se a mesma não utilizar um cabo multicanal, podendo inviabilizar a aquisição com este tipo de arranjo em alguns casos.

Para as aquisições com o dispositivo dipolo-dipolo em SEVs, como em caminhamentos elétricos e em tomografias elétricas, diferente dos demais arranjos, o aumento da profundidade de penetração da corrente é obtido aumentando-se a separação *na* entre os dipolos (Figura 2.3) e não pelo aumento do espaçamento entre os dipolos de corrente (Reynolds 1997).

Loke (2000) aponta que os níveis teóricos de investigação são aproximados segundo a profundidade média ou pseudo-profundidade do arranjo utilizado, como sugerem os estudos realizados por Edwards (1977). Tais estudos afirmam que a pseudo-profundidade baseia-se nos valores de sensibilidade (*sensitivity values*) para um semi-espaço homogêneo. O autor ressalta ainda que a presença de grandes contrastes na superfície rasa pode alterar a profundidade de investigação e cita que um corpo com baixa resistividade próximo à superfície tende a criar uma “zona de sombra” abaixo do mesmo, onde se torna mais difícil determinar os valores de resistividade.

A função sensibilidade (*sensitivity function*) descreve o peso de cada bloco dentro do seu conjunto e define, portanto, o quanto uma mudança na resistividade de um bloco influenciará no conjunto dos demais (Loke 2000). Dessa forma, os blocos localizados nas laterais inferiores possuem baixo peso e são descartados na construção da pseudo-seção, e os blocos da primeira fileira mais superficial possuem maior peso. Um exemplo desta função pode ser observado na Figura 2.6, onde se observa a pseudo-seção dividida em blocos com cores indicativas da sensibilidade de cada bloco. A figura foi obtida através do programa Res2Dinv para a linha TQ-3 e é igual para os demais perfis.

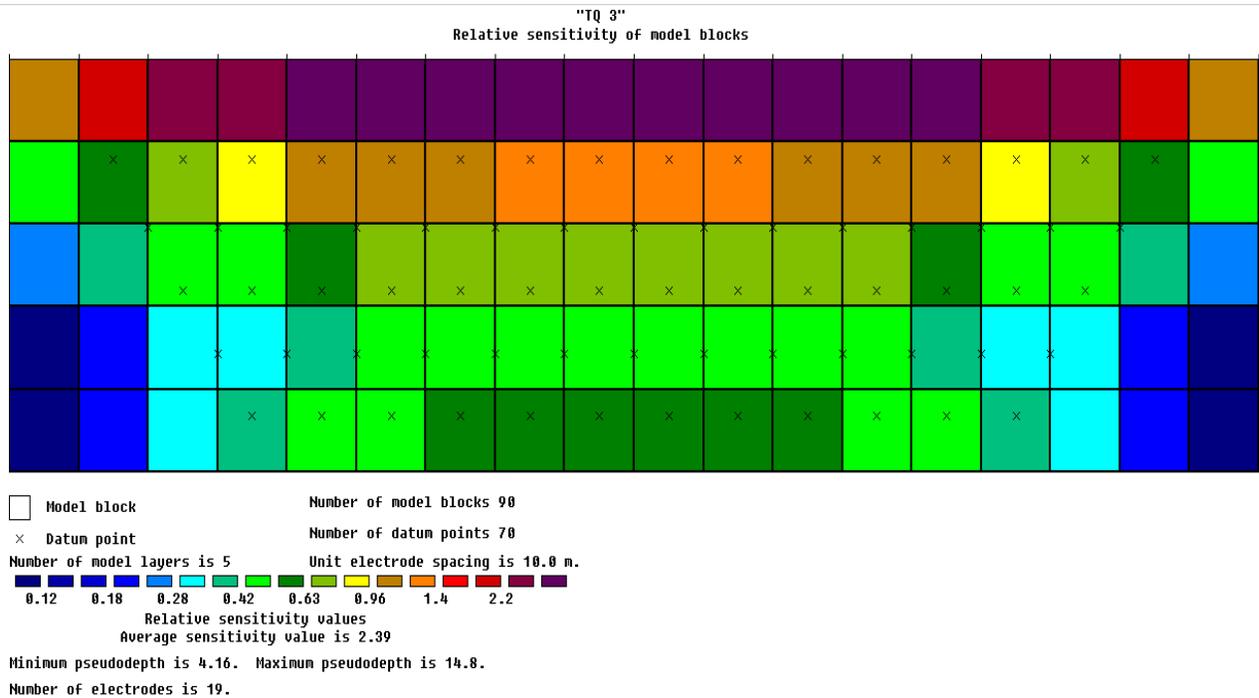


Figura 2.6 – Exemplo de função sensibilidade: valores mais altos indicam maior peso do bloco de dados na pseudo-seção.

Para mapear a profundidade (Z) máxima de alguns arranjos, Loke (2000) apresenta uma tabela (Tabela 2.3) onde se multiplica o coeficiente Z/a ou Z/L pela distância de separação entre eletrodos (a) ou pelo comprimento total do arranjo (L). Parasnis (1978) e Orellana (1982), no entanto, ressaltam que as regras que atribuem os valores observados a uma determinada profundidade, fixando valores segundo a distância entre eletrodos carecem de base, e cita como exemplo a presença de uma camada perfeitamente condutora ou isolante a uma profundidade Z_0 , que impede a passagem da corrente e, por conseqüência, impede também que a profundidade de investigação seja superior a Z_0 .

Com a utilização de um cabo multi-canal é possível a realização de uma série de medições por nível de investigação, mantendo-se os eletrodos de corrente fixos sem que seja necessário alterar a posição dos eletrodos de potencial manualmente: os eletrodos de corrente são conectados ao equipamento normalmente e a série de eletrodos de potencial é conectada ao cabo multi-canal, que então se liga ao aparelho.

A primeira medição é feita com o circuito formado entre os dois eletrodos de corrente e o primeiro par de eletrodos de potencial, separados pela distância $1a$. Para aumentar a profundidade

de investigação, a próxima medida entre os dois eletrodos de corrente e o seguinte par de eletrodos de potencial é aumentada para $2a$ (Loke 2000). O mesmo acontece para as demais distâncias na até que todas as medições para a mesma posição AB de eletrodos de corrente tenham sido concluídas. A comutação de eletrodos é efetuada automaticamente por alguns tipos de equipamentos ou através de comutadores específicos para este fim. O funcionamento desse sistema pode ser facilmente visualizado na Figura 2.3: tomografia elétrica.

Tabela 2.3 – Coeficientes para obtenção das profundidades de investigação médias(Z), onde L é o comprimento total do arranjo e a a distância de separação entre eletrodos. A profundidade média de investigação teórica é obtida multiplicando-se a distância a ou L pelo respectivo coeficiente. Como exemplo, se a distância entre eletrodos é de 10 metros e o comprimento L total é de 80 metros para 6 níveis de investigação, tem-se uma profundidade aproximada de 17.30 metros.

Nível de Investigação	Z/a	Z/L
n =1	0.416	0.139
n=2	0.697	0.174
n=3	0.962	0.192
n=4	1.220	0.203
n=5	1.476	0.211
n=6	1.730	0.216
n=7	1.983	0.220
n=8	2.236	0.224

Fonte: Loke (2000).

Depois de encerradas as medições para uma mesma posição de AB, todo o arranjo eletródico é movimentado em uma distância na (representado na Figura 2.3 pela cor azul ciano), gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente. Pode-se observar então que os dados são adquiridos tanto em profundidade como em deslocamento horizontal, o que caracteriza uma tomografia elétrica.

A pseudo-seção de resistividade fornece um quadro aproximado e distorcido da distribuição das resistividades reais em subsuperfície, uma vez que a forma dos contornos depende do arranjo eletródico utilizado e das resistividades reais em sub-superfície. Dessa forma, sua funcionalidade está na apresentação da resistividade aparente medida de forma a apresentar-se como um guia

inicial para interpretações quantitativas adicionais, além de permitir visualizar, localizar e eliminar os chamados “outliers”, pontos com valores anormais de alta ou de baixa resistividade, notadamente errados (Loke 2000).

Inversão de Dados

Os dados de resistividade aparente obtidos em campo passam por um processo de inversão através de um *programa* específico para obter-se um modelo de resistividades reais.

Segundo Gallas *et al.*(2005), as resistividades aparentes obtidas para uma mesma estrutura podem variar conforme os distintos arranjos eletródicos utilizados, variando como consequência, as pseudo-seções de resistividade aparente obtidas, no entanto, após a inversão dos dados, o modelo resultante deve ser único. Os processos de inversão visam, portanto, estabelecer um modelo da provável distribuição dos valores reais de resistividade de forma a eliminar eventuais distorções nas pseudo-seções resultantes dos arranjos de eletrodos.

Os Programas RES2DINV e RES3DINV

Tanto o programa RES2DINV quanto o programa RES3DINV fundamentalmente visam encontrar um modelo de resistividades em subsuperfície cuja resposta concorde com os dados mensurados, para isso, ambos os programas utilizam um método iterativo a partir de um modelo inicial, que terá seus valores de resistividade aparente recalculados e, por consequência, um modelo melhorado a cada iteração (Loke 2000).

Durante o processo de inversão, adota-se como critério de convergência o valor do erro quadrático médio (RMS – *root-mean-squared*) entre os dados de campo e a resposta do modelo atualizada a cada iteração (Geotomo Software 2003).

Estes *programas* baseiam-se no método de mínimos quadrados por suavização restrita (*smoothness-constrained least-squares method*) para sua rotina de inversão, segundo a fórmula matemática abaixo (Geotomo Software 2003, Geotomo Software, 2007):

$$(J^T J + \mu F)d = J^T g - \mu Fr. \tag{2.9}$$

onde:

J : matriz Jacobiana das derivadas parciais

μ : fator atenuante (*damping factor*)

F : matriz de suavização (*smoothing matrix*)

d : vetor de perturbação do modelo (*model perturbation vector*)

g : vetor de discrepância

r : vetor contendo o logaritmo dos valores do modelo de resistividade

O vetor de discrepância g contém a diferença entre os valores medidos e calculados de resistividade aparente e sua magnitude vetorial é dada pelo valor RMS. O vetor de perturbação d corresponde à mudança dos valores de resistividade aparente do modelo calculados pela equação (2.9). O fator atenuante, por sua vez, controla o peso dado ao modelo de suavização no processo de inversão. Valores mais altos do fator atenuante implicam em modelos com contornos mais suaves e os erros RMS tendem a ser maiores (Loke 2000).

O método de mínimos quadrados por suavização restrita procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente calculados e os medidos em campo, ajustando a resistividade do modelo de blocos (Loke & Barker 1996) e é responsável pela redução do erro RMS, resultando em um modelo com valores de variação de resistividade suavizados. Este tipo de modelo é mais adequado quando os valores de resistividade também variam de forma suave, como é o caso das plumas de contaminação (Geotomo Software 2003).

Para a realização do cálculo da matriz de dados, o programa utiliza os métodos Gauss-Newton e quasi-Newton, onde o primeiro é caracterizado por resultados mais precisos, e o segundo, pela redução do tempo de processamento (Loke e Barker 1996). Os métodos Gauss-Newton e quasi-Newton são explicadas em detalhes por Loke e Dahlin (2002).

O modelo bidimensional é construído através da discretização da sub-superfície em blocos retangulares de forma que os valores de resistividade de cada bloco são obtidos por meio de um algoritmo de inversão e originam uma pseudo-seção de resistividade aparente que devem concordar com os valores medidos em campo (Loke 2002).

O modelo 2D padrão de discretização (Figura 2.7) para arranjos dipolo-dípolo considera que a espessura da primeira fila de blocos seja 0.3 vezes a largura de cada célula, que corresponde à unidade de espaçamento entre eletrodos. Caso não seja alterada manualmente, a

espessura para os níveis posteriores aumenta em 10% para dados com menos de oito níveis (Geotomo Software 2003).

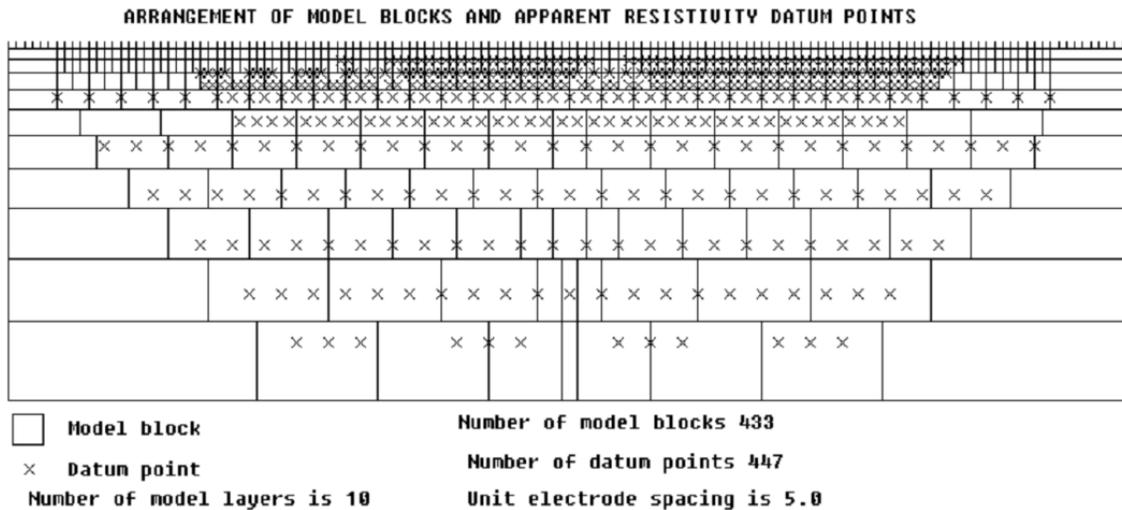


Figura 2.7 - modelo padrão de discretização da subsuperfície utilizada pelo programa RES2DINV. Fonte: Loke (2004).

Os dados ou “*data points*” são plotados segundo a profundidade média de investigação do arranjo eletródico utilizado através de critérios definidos por Edwards (1977).

O programa RES2DINV suporta as técnicas de elemento-finito e diferenças-finitas. Dados sem topografia utilizam a técnica de diferenças-finitas enquanto dados com topografia utilizam o técnica do elemento-finito (Geotomo Software 2003).

Em teoria, como já explicado anteriormente, o conceito de dipolo implica em grandes distâncias separando os pares de eletrodos de corrente e de potencial, o que não ocorre nas primeiras distâncias *na*. Nesses casos, o correto seria considerá-los como um bipolo e utilizar a expressão geral para coeficiente de dispositivo (2.2) que não utiliza as aproximações do dipolo (2.3). Nos programas Res2dinv e Res3dinv é utilizada a expressão geral, minimizando erros de cálculo.

Para a interpretação 3D dos dados, a subsuperfície é dividida em várias camadas, das quais são subdivididas em blocos retangulares. No modelo padrão, o comprimento dos blocos é igual à unidade de espaçamento de eletrodos nas direções x e y (Loke 2000). O modelo de blocos padrão utilizado pode ser apreciado na Figura 2.8.

O programa RES3DINV ainda permite que o usuário escolha entre outros dois modelos de discretização da subsuperfície (Figuras 2.9 e 2.10): em um primeiro modelo, os blocos das primeiras camadas são divididos pela metade na direção horizontal, e em outro modelo, essa divisão ocorre também na direção vertical.

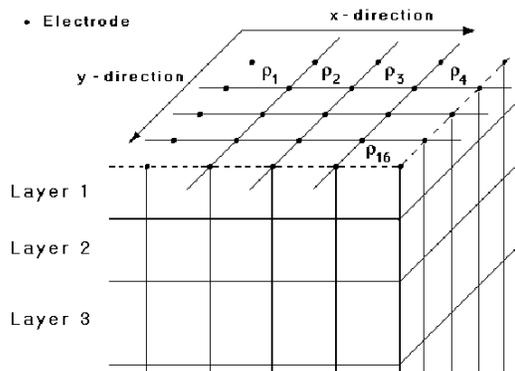


Figura 2.8 - Modelo padrão de discretização da subsuperfície utilizada pelo programa RES3DINV.

Fonte: (Geotomo Software 2007).

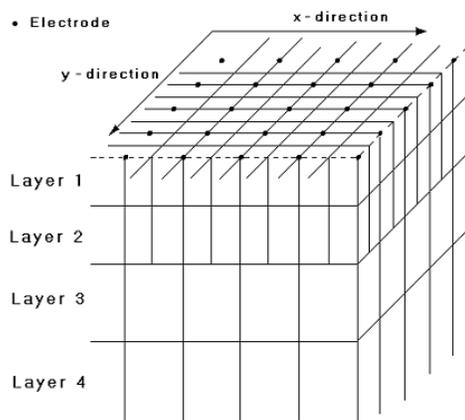


Figura 2.9 - Modelo de discretização da subsuperfície com blocos das camadas superiores divididos pela metade no sentido vertical.

Fonte: (Geotomo Software 2007).

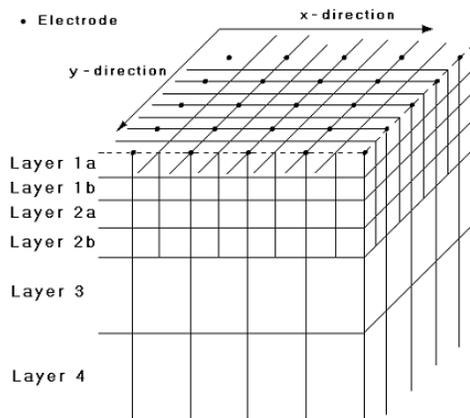


Figura 2.10 - Modelo de discretização da subsuperfície com blocos das camadas superiores divididos pela metade no sentido horizontal e vertical.

Fonte: (Geotomo Software 2007).

O RES3DINV também permite a utilização dos métodos de elemento-finito ou de diferenças-finitas para o cálculo das resistividades. O método das diferenças-finitas é estabelecido como padrão por ser um método mais rápido; se os dados possuem topografia, o método padrão passa a ser elementos-finitos (Geotomo Software 2007).

A espessura da primeira camada do modelo é ajustada segundo a profundidade de investigação do arranjo utilizado. De forma análoga ao RES2DINV, enquanto a resolução do método decai com a profundidade, a espessura das camadas do modelo aumenta. Por *default*, um fator de 1.15 é utilizado, o que significa que a espessura de cada camada subsequente aumenta em 15% (Geotomo Software 2007).

A matriz Jacobiana é recalculada nas três primeiras iterações, quando ocorrem as mudanças mais significativas em seus valores. Em áreas com grandes contrastes de resistividade, onde o valor mais alto é ao menos 10 vezes superior ao valor mais baixo, esse procedimento produz modelos com formas mais definidas que aqueles originados pelo método quasi-Newton (Geotomo Software 2007).

Os Equipamentos ELREC PRO e SYSCAL R2

Syscal R2 e *Elrec Pro* são equipamentos designados para investigações elétricas em corrente contínua. Com estes equipamentos é possível estudar as variações da resistividade com a

profundidade, bem como estudar as variações laterais da resistividade ao longo de uma linha. São amplamente utilizados para exploração de água subterrânea, estudos geológicos, ambientais e de engenharia.

O Syscal R2, neste trabalho, é responsável pela transmissão de corrente, mas também é capaz de medir a voltagem entre os eletrodos de potencial e mostrar os valores de resistividade aparente e cargabilidade. As medições são feitas de forma automática pelo aparelho através de um microprocessador e os potenciais espontâneos são automaticamente compensados (Iris Instruments 1993).

O Syscal R2 pode operar em três modos diferentes segundo o objetivo do trabalho:

- Tx-Rx no domínio do tempo: utilizado quando se deseja medir polarização induzida e resistividade;

- Tx-*only* no domínio do tempo: modo utilizado neste trabalho, onde o aparelho é utilizado apenas como um transmissor. A corrente será gerada e mensurada, no entanto, não serão efetuadas medidas de voltagem ou cargabilidade. Nesta opção, a onda possui o formato LIGADO+, DESLIGADO, LIGADO-, DESLIGADO, sendo os períodos sem injeção de corrente iguais aos períodos com injeção;

- Tx-Rx no domínio da frequência: utilizado quando se deseja obter apenas dados de resistividade.

O fabricante aconselha que a resistência de contato dos eletrodos no solo seja checada antes da aplicação de corrente, para isso, o equipamento dispõe da opção “Rs Check”. O manual do usuário indica $4K\Omega$ como um bom valor, que não deve ultrapassar $20K\Omega$.

O equipamento *Elrec Pro*, por sua vez, é um módulo que trabalha somente como receptor, permitindo a aquisição de dados de resistividade e cargabilidade. Possui 10 canais de dipolos de recepção, o que significa que permite a investigação de até 10 níveis. Os dipolos de potencial são automaticamente alternados, facilitando o trabalho de campo.

Este tipo de levantamento utiliza um grande número de eletrodos conectados a um cabo multi-canal. O equipamento de medição automaticamente seleciona os 4 eletrodos relevantes para cada medida segundo o tipo de arranjo eletródico utilizado.

CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO TANQUE DESATIVADO

O Assentamento Sepé Tiarajú localiza-se na região de Ribeirão Preto, nos Municípios de Serrana e Serra Azul – SP, entre o Km 28 e o Km 31,4 da Rodovia 333 - Abraão Assed (Figura 3.1).

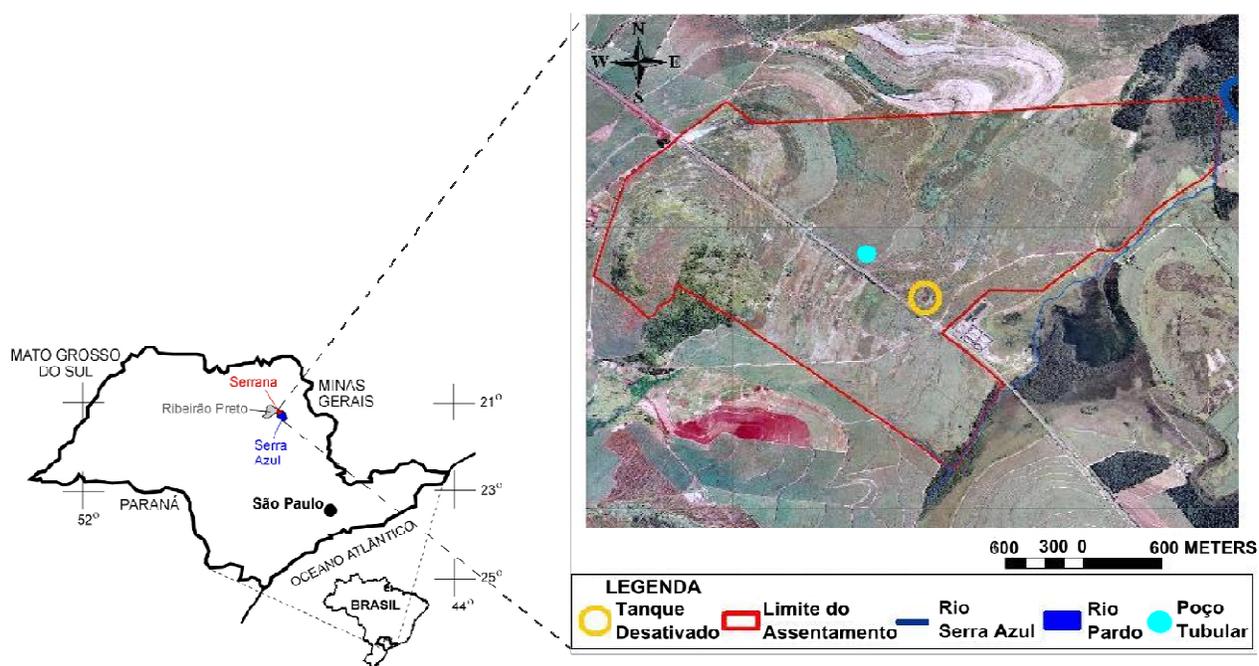


Figura 3.1 - Localização dos Municípios de Serrana e Serra Azul, região de Ribeirão Preto – SP e imagem de localização do Assentamento Sepé Tiarajú.

Historicamente, o uso do solo do Assentamento Sepé Tiarajú foi baseado na cultura do café abrangendo o período compreendido entre final do século XIX até a metade do século XX. No decorrer dos últimos 50 anos o sistema de produção predominante foi alicerçado na cultura da cana-de-açúcar. O Assentamento, criado em 2004, possui 814,4 ha, 80 famílias assentadas, pertencem a Usina Nova União e era uma área de produção canavieira intensivamente fertirrigada com vinhaça.

O tanque de vinhaça desativado, alvo da pesquisa, era utilizado pela usina e tinha a função, segundo os assentados, de servir de centro de distribuição e armazenagem do resíduo. Em uma das suas bordas ainda é possível observar (Figura 3.2 a) e b)) um cano cerâmico que era responsável pela transferência da vinhaça do tanque para os caminhões que a transportavam para áreas mais distantes, onde era então utilizada como adubo pela fertirrigação dos canaviais.

A área de transferência da vinhaça do tanque para os caminhões pode ser visualizada na Figura 3.2 – c) e d).

A vinhaça chegava até o tanque através das curvas de nível, o que significa que, atualmente, o tanque também capta água de uma parte do assentamento. A topografia do assentamento pode ser observada na Figura 3.3.

Infelizmente, não há dados disponíveis sobre a data de construção e ativação do tanque, ou a cerca da quantidade de vinhaça depositada por dia e sua composição exata (que como citado anteriormente, varia segundo inúmeros fatores). A desativação do tanque ocorreu aproximadamente quando da ocupação da área pelo MST.

As informações sobre o uso e manejo do tanque e seu entorno foram obtidas através de conversas informais com os assentados.

O tanque utilizado para a armazenagem do vinhoto (Figura 3.2 - e) e f)) é um quadrado cujo lado externo possui 90 metros, e a parte interna, aproximadamente 70 metros. Não há dados concretos sobre a profundidade real do tanque em sua construção, atualmente, o volume do tanque desativado não ocupado com resíduos é de aproximadamente 19 300 metros cúbicos.

Um poço tubular localizado a cerca de 600 metros do tanque indica o nível estático naquele ponto (Figura 3.1) a 52 metros de profundidade.

a)



b)



c)



d)



e)



f)



Figura 3.2 –a) e b) cano cerâmico que atravessa uma das bordas do tanque; c) e d) antiga área de distribuição (parte de fora do tanque); e) tanque de infiltração (borda e parte interna) e f) tanque de infiltração (parte interna).

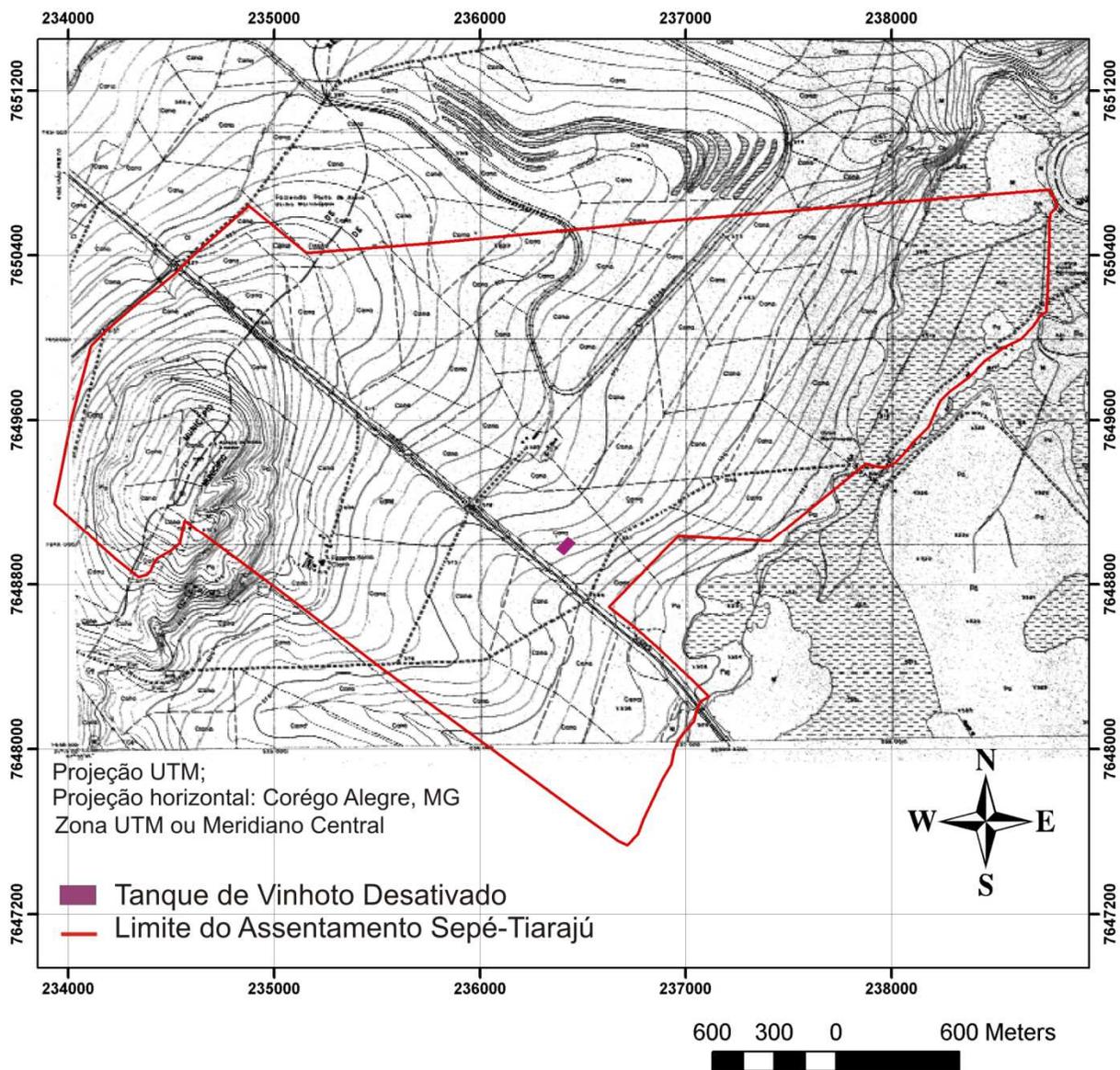


Figura 3.3 – Mapa Topográfico da área.

O tanque não possui qualquer tipo de manta geoimpermeabilizante, tendo em vista que na época de sua instalação não havia as obrigações legislativas e as tecnologias existentes atualmente, dessa forma, a sua impermeabilização é resultante apenas da presença natural de argila no solo.

3.2. GEOLOGIA

A área de estudos está localizada nos domínios da bacia sedimentar do Paraná, ocorrendo localmente rochas do Grupo São Bento. O Relatório Ambiental Preliminar (RAP) solicitado ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP 2006), em estudo obrigatório requerido para a duplicação da pista da Rodovia SP-333 – Abrão Assed do Km 33.8 ao Km 54.8, portanto a cerca de 2Km do Assentamento Sepé-Tiarajú, descreve que a região é constituída pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral, rochas sedimentares das Formações Botucatu e Pirambóia, sedimentos continentais terciários e sedimentos aluvionais quaternários.

Quanto à hidrogeologia do local, o mesmo estudo supracitado considera que a maior parte daquela área de estudo está sobre um aquífero fissurado, representado pelos basaltos da Formação Serra Geral, e em uma parcela inferior, sobre o Aquífero Guarani, representado pelos arenitos da Formação Botucatu e coberturas cenozóicas.

Estudos realizados próximos à área do assentamento (Elis & Zuquette, 1998 e Fachin, 2007), descrevem a presença das Formações Botucatu, Pirambóia e Serra Geral. A Formação Botucatu é caracterizada por solos arenosos avermelhados de granulação fina a média, exibindo estratificações cruzadas de médio a grande porte. A Formação Pirambóia caracteriza-se por uma sucessão de camadas arenosas de granulação fina com maior porção argilosa na parte inferior. Já a Formação Serra Geral ocorre principalmente nas regiões mais elevadas, com espessuras variando de dezenas a centenas de metros, e é caracterizada por solos argilosos, constituída por basaltos intercalados com arenitos da Formação Botucatu.

A zona ocupada pelo tanque desativado e sua influência está inserida, possivelmente, apenas na Formação Serra Geral, que é mais superficial.

Um furo de sondagem realizado dentro do tanque desativado mostra a presença de 0.2 metros de um solo argiloso orgânico, 0.25 metros de um solo argiloso de coloração vermelha, sobrepostos a um solo argiloso de coloração marrom escuro com presença de resíduos até a profundidade de 3.7 metros.

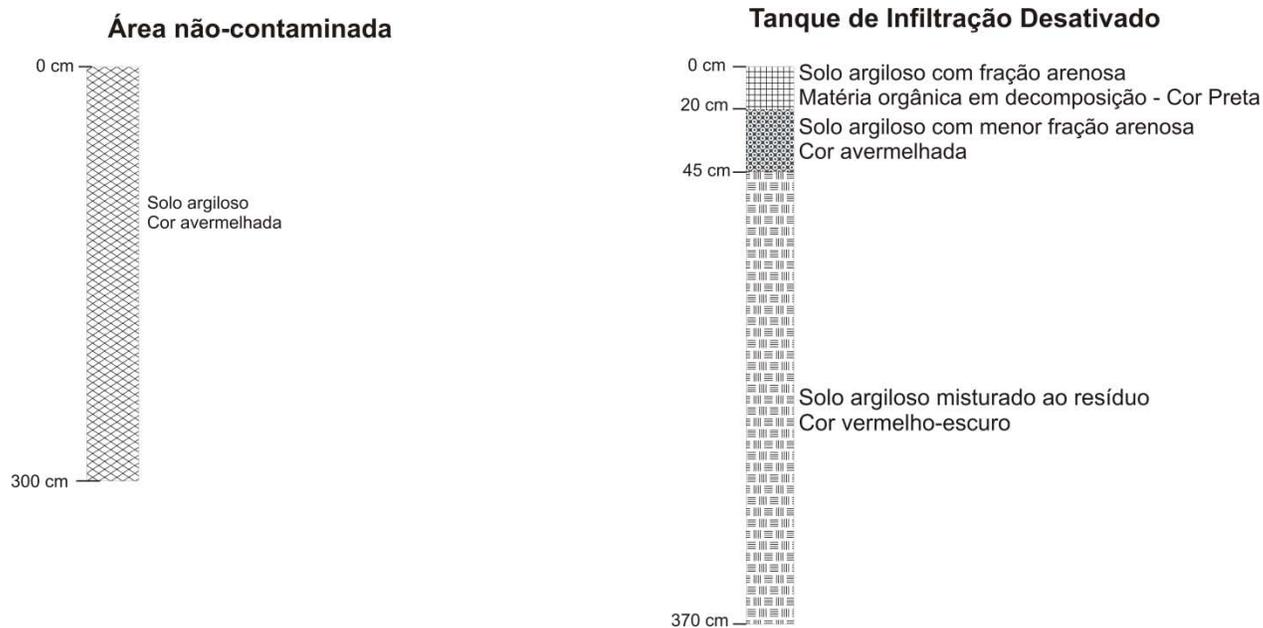


Figura 3.4 - Descrição geológica do entorno.

Outros dois furos de sondagem realizados fora do tanque não apresentam variações no perfil, podendo ser descritos como solo argiloso de coloração avermelhada até a profundidade de 3 metros.

A descrição geológica dos furos de sondagem pode ser visualizada na Figura 3.4.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

4.1. MÉTODOS DE TRABALHO

Conforme o “Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica” e para cumprir com os objetivos propostos neste trabalho foram realizadas 11 linhas de tomografia elétrica dispostas dentro do tanque e em sua área de entorno.

Embora os equipamentos utilizados, *Syscal R2* e *Elrec Pro*, permitam a aquisição simultânea de dados de eletrorresistividade e de polarização induzida (IP), os dados de cargabilidade (dados de IP) foram desprezados em função da baixa confiabilidade dos mesmos. Para resultados satisfatórios recomenda-se o emprego de eletrodos porosos, que não sofrem influência de polarização, diferente do que ocorre com os eletrodos metálicos, reduzindo significativamente o nível de ruído dos dados.

Para melhor descrição e compreensão da área de pesquisa foi realizado um levantamento topográfico nos locais onde foram feitos perfis eletrorresistivos utilizando-se uma *Estação Total – TCR 305* (Figura 4.1), produzido pela *Leica Geosystems* e de propriedade do IAG-USP.



Figura 4.1 - Estação Total – TCR 305

A base da estação foi colocada na posição 20 metros (eixo x) da linha TQ-9, que permitia visualizar toda a área. No total, há 176 pontos de topografia, que permitiram elaborar um mapa

topográfico representativo da área de estudo através do programa *Surfer 8.0* (Golden Software, 2006).

Segundo os resultados obtidos nos levantamentos geofísicos, efetuou-se a análise de solo em três pontos distintos da área de investigação, cada qual com cinco amostras em profundidade: dentro da cava de resíduo (posição 60 metros da linha TQ-3); em um local com altos valores de resistividade, associado a zonas sem contaminação (linha TQ-CS) e em um local com valores de resistividade superficial não tão baixos quanto aqueles encontrados dentro do tanque, e não tão altos quanto aqueles encontrados em TQ-CS (entre 100 Ohm.m e 200 Ohm.m). Os pontos de amostragem podem ser visualizados mais adiante na Figura 4.3.

As análises foram feitas pelo Laboratório de Geoquímica Analítica do Instituto de Geociências da Unicamp utilizando-se o método de fluorescência de raios-x. O método já foi utilizado por Simabuco (1993) para a determinação simultânea da concentração de vários elementos presentes em solos arenosos e argilosos tratados com vinhaça.

4.2. AQUISIÇÃO

Com relação aos perfis de eletrorresistividade, foram realizadas onze linhas de tomografia elétrica utilizando-se o arranjo dipolo-dipolo radial e espaçamento de 10 metros entre os eletrodos. Foram utilizados os equipamentos *Syscal – R2* e *Elrec Pro* (Figura 4.2), ambos fabricados pela empresa francesa *IRIS Instruments* e de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP. O equipamento *Syscal R2* realizou a função de módulo de transmissão de corrente elétrica e o *Elrec PRO* operou como módulo de medição de resistência elétrica.

Todas as linhas, exceto as linhas nomeadas como TQ-BF e TQ-RD, foram posicionadas perpendicularmente ao sentido provável do fluxo subterrâneo, sugerido pela topografia como direção sudeste (Figura 4.3).

As linhas localizadas no intervalo TQ-0 a TQ-9 foram planejadas para cobrir toda a área interna do tanque, segundo espaçamentos de 10 metros entre as linhas, no entanto, em decorrência da presença de uma grande quantidade de água em uma parte do tanque, não foi possível cumprir este planejamento.

A nomeação das linhas, exceto TQ-BF, TQ-CS e TQ-RD, foi feita de forma que o número posterior à sigla TQ indique a distância em metros da linha referência TQ-0, multiplicado por um fator 10 (Figura 4.3). A linha TQ-1A indica uma distância de 10 metros a montante da linha referência TQ-0.

As linhas TQ-1, TQ-2, TQ-3 e TQ-8, todas com 180 metros de comprimento, cobrem também a área interna do tanque e permitem visualizar o contraste de condutividade dentro e fora do mesmo. Estas linhas foram planejadas com o objetivo específico de verificar a presença de anomalias decorrentes da disposição direta de vinhaça no solo e, por consequência, avaliar a eficiência do método da eletrorresistividade aplicado no estudo para a detecção da influência do referido contaminante.

As linhas TQ-10 e TQ-BF, respectivamente com 180 metros e 220 metros de comprimento, foram realizadas paralelamente e imediatamente ao final topográfico das bordas do tanque com o objetivo de verificar se as anomalias ultrapassam os limites da cava.



Figura 4.2 – Equipamento utilizado: Syscal – R2 e Elrec Pro.

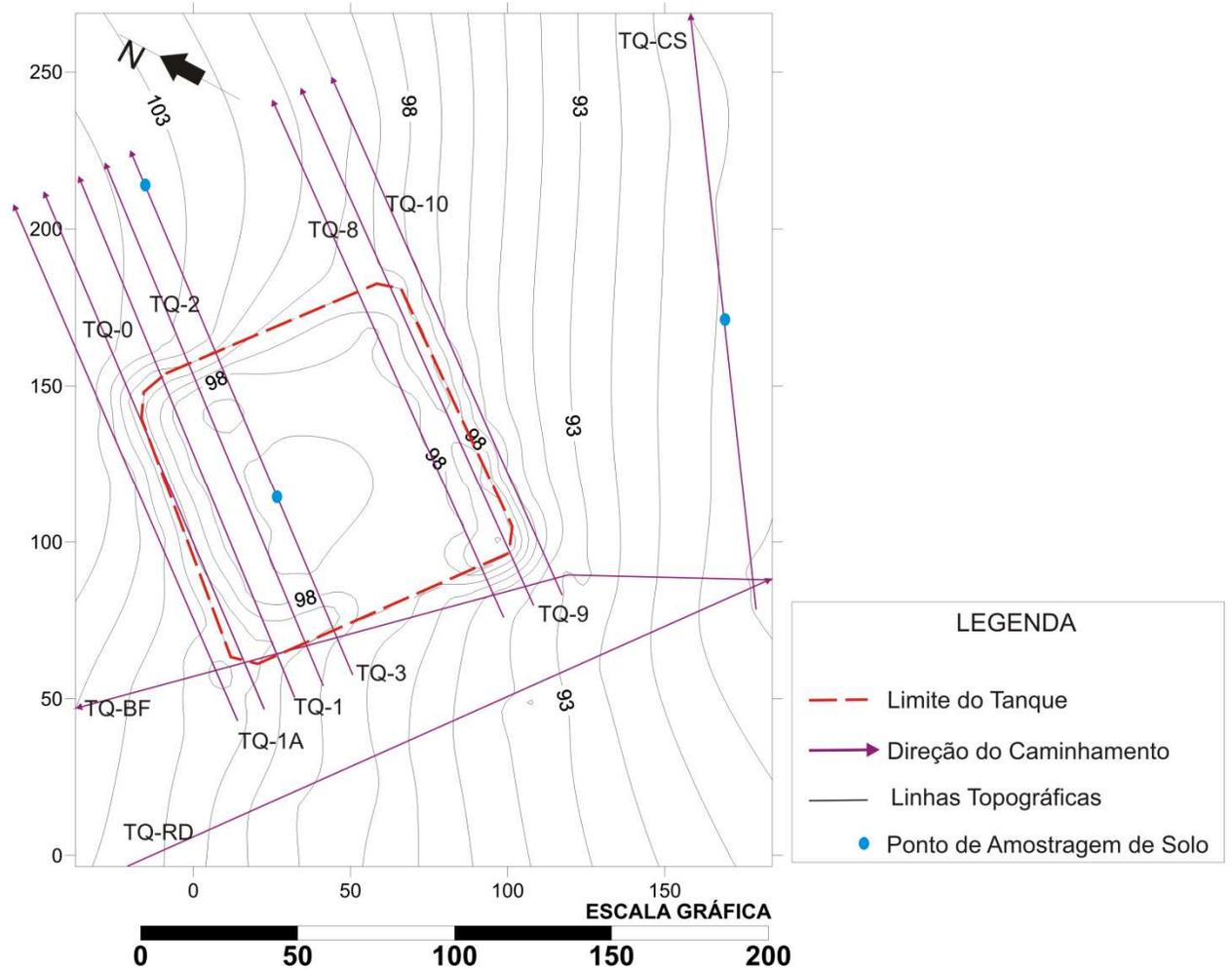


Figura 4.3 - Localização das linhas de caminhamento elétrico

As linhas TQ-1A, TQ-CS e TQ-RD, respectivamente com 180 metros, 190 metros e 300 metros de comprimento, foram feitas com o objetivo de delimitar a região anômala, já que não era esperado qualquer tipo de anomalia nestas áreas.

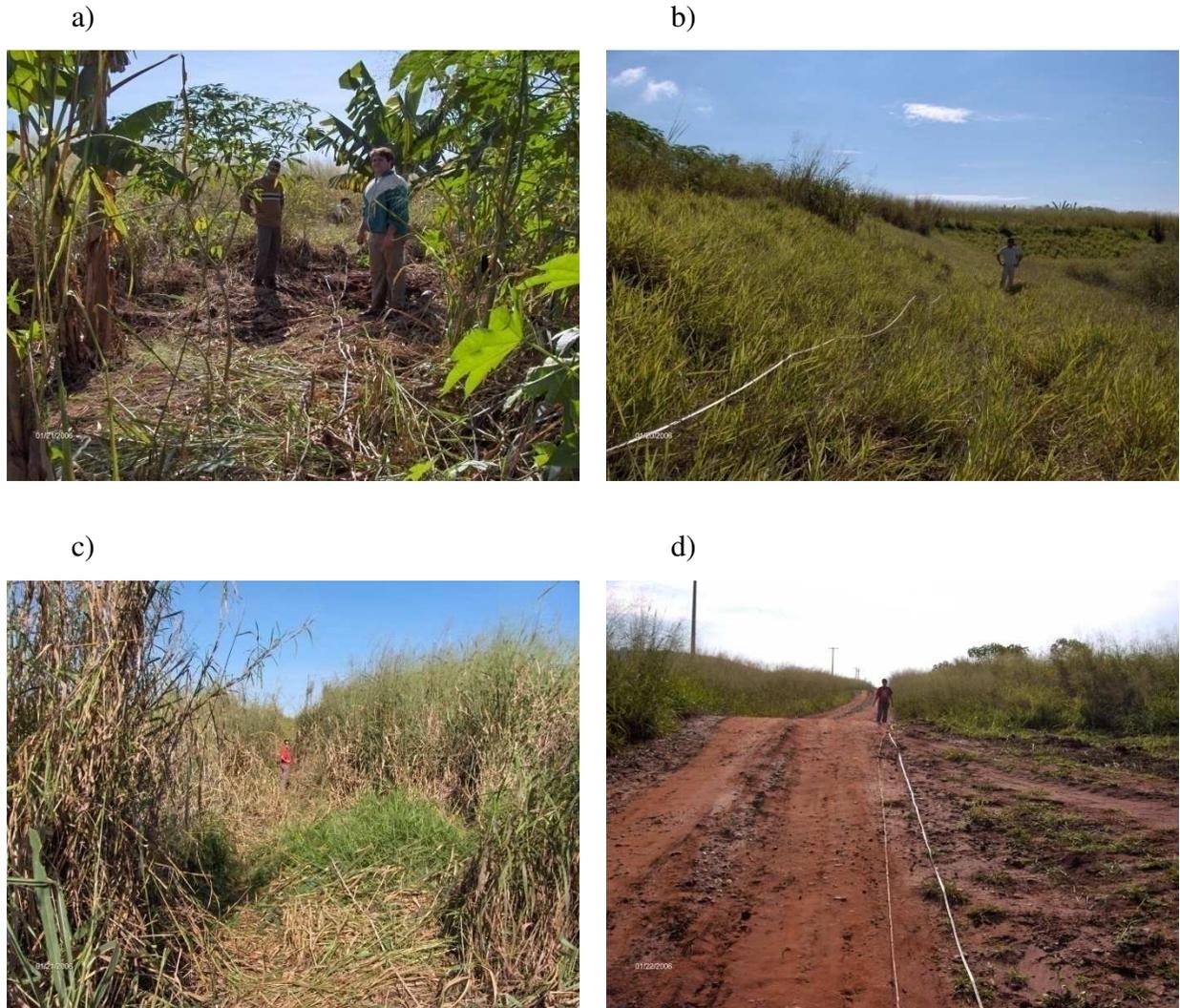


Figura 4.4 - Fotos de aquisição de dados em campo: a) TQ-1A b) TQ-1 c)TQ-2d) TQ-RD

O mapa com a posição, a direção e o nome de todas as linhas pode ser visualizado na Figura 4.3.

Todas as linhas foram feitas utilizando-se o arranjo eletródico dipolo-dipolo radial, espaçamento de 10 metros entre eletrodos e 5 níveis de investigação.

Visando diminuir a presença de ruídos nas medições e aumentar a intensidade de corrente aplicada, a resistência de contato dos eletrodos foi mantida, durante a aquisição, sempre abaixo

de $4k\Omega$, exceto para casos em que não era possível diminuir este valor. Para melhorar a resistência de contato, os eletrodos eram bem clavados na superfície do solo e regados com uma solução saturada de NaCl.

4.3. PROCESSAMENTO

O processamento de dados foi feito através do *programa* comercial Res2dinv (Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, item 2.2.1. Método da eletrorresistividade).

Tendo em vista a oscilação e o grande contraste entre alguns valores obtidos em campo, foram feitos alguns processos para verificação e confirmação dos melhores dados a serem utilizados:

1- Verificação do ajuste entre as curvas obtidas pelo modelo de resistividades aparentes calculado pelo programa Res2dinv e a curva originada através dos valores obtidos em campo para cada nível de investigação, através de uma subrotina criada no *programa MatLab* 5.3;

2- Filtragem dos dados obtidos em campo através de um filtro de três pontos através de uma subrotina criada no *programa MatLab* 5.3. Este filtro foi aplicado com o intuito de suavizar as oscilações dos dados de campo, para tal, foram trabalhados separadamente cada nível de cada perfil. O primeiro e o último dado de cada série eram matidos e uma média entre o dado anterior e posterior para cada posição de dado era realizado;

3- Verificação entre o ajuste das curvas obtidas através dos dados mensurados e calculados pelo *programa* para os dados filtrados e não-filtrados;

4- Inversão dos dados filtrados e não filtrados;

5- Comparação do erro RMS, geometria das anomalias e valores obtidos para os modelos utilizando dados filtrados e não filtrados;

6- Tendo em vista os altos valores de resistividade obtidos para as áreas não contaminadas, foi realizado também o processo de inversão impondo restrições aos valores de resistividade.

Com os dados dos perfis TQ-1A a TQ-10, foi feita uma representação 3D, lembrando que a aquisição não foi feita em 3D, de forma que o resultado é apenas uma forma de representá-los.

Loke (2000) relata que em alguns casos as medições são realizadas em apenas uma direção, através do levantamento de linhas paralelas 2D. As linhas 2D são inicialmente invertidas individualmente e depois, através do programa RES3DINV, são invertidas como um conjunto 3D de dados. Embora os resultados apresentados dessa forma apresentem menor resolução que aqueles obtidos através do “3D completo”, esta talvez seja uma das relações com melhor custo-benefício para se extrair informações 3D de levantamentos 2D.

Para a elaboração dos mapas representativos 3D foi utilizado o *programa* comercial Res3dinv.

A malha 3D foi elaborada com espaçamento entre as linhas de 10 metros (espaçamento real entre os perfis). Entre as posições TQ-3 e TQ-8, como não há perfis, o que se observa são dados interpolados pelo programa.

Esta forma de representação dos dados, mesmo não sendo completamente fiel à realidade, permite visualizar melhor as mudanças laterais e em profundidade das anomalias, e por consequência, permite obter conclusões abrangentes e mais seguras do tema.

As linhas TQ-BF, TQ-RD e TQ-CS não foram representadas nestes mapas por não estarem paralelas àquelas realizadas no tanque e/ou estarem a distâncias relativamente longas aos demais perfis, sendo a área de interpolação, neste caso, muito grande, o que torna a representação irreal.

4.3.1. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA PROCESSAMENTO 2D

Uma vez que os dados de tomografia elétrica possuíam topografia, foi utilizada a técnica de elementos-finitos e o método de mínimos quadrados “*Standard Gauss-Newton*” com utilização de 4 *nodes* entre os eletrodos adjacentes e discretização padrão da superfície. O método supracitado e a utilização de 4 *nodes*, embora necessite de maior capacidade de processamento, é viável pelo tamanho dos perfis e dos níveis de investigação empregados.

Para o processamento dos dados utilizou-se o valor de 0.160 para o fator atenuante inicial (*initial damping factor*) e de 0.015 para o fator atenuante mínimo (*minimum damping factor*). Os valores atribuídos a esses parâmetros são baixos uma vez que os dados são pouco ruidosos. Altos

valores do fator atenuante tendem a produzir modelos suaves com menos estruturas definidas e, portanto, com menor resolução (Loke 2000).

A sub-rotina de inversão diminui o valor do fator atenuante a cada iteração, por isso é necessário um valor para estabilizar o processo de inversão. Para as camadas subseqüentes, os valores do fator atenuante aumentam 1.05 vezes para cada camada mais profunda uma vez que a resolução do modelo decresce exponencialmente com a profundidade (Geotomo Software 2003).

Uma vez que o erro RMS não muda significativamente após a terceira iteração (Loke e Barker 1996), adotou-se três como o número máximo de iterações. O limite de convergência foi definido em 5% e a matriz Jacobiana foi recalculada a cada iteração tendo em vista a maior acurácia dos resultados e o grande contraste de resistividade em alguns dos perfis, onde o maior valor de resistividade aparente é superior a 10 vezes seu menor valor.

4.3.2. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA PROCESSAMENTO 3D

As linhas paralelas TQ-1A, TQ-0 a TQ-10 do levantamento 2D foram utilizadas para fazer uma representação gráfica 3D através do *programa* comercial Res3dinv Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, item 2.2.1. Método da eletrorresistividade), desenvolvido pela *Geotomo Software*.

Para representação 3D, os dados dos levantamentos 2D supracitados foram organizados e combinados em um só arquivo, segundo o formato exigido pelo programa.

Em função do volume de dados e da capacidade de processamento requerida, utilizou-se o método Gauss-Newton incompleto e discretização padrão do terreno. Como a representação 3D não incluiu dados topográficos, adotou-se a técnica de diferenças finitas.

Utilizou-se 0.15 como fator atenuante inicial, 0.01 como fator atenuante mínimo e 0.2 como fator máximo. Como a resolução do método resistivo decresce exponencialmente com a profundidade, o valor do fator atenuante utilizado no método de inversão por mínimos quadrados aumenta a cada camada, neste caso em 1.15 vezes. A espessura da primeira camada é de 0.35. O número de iterações foi igual a 6, a matriz jacobiana foi recalculada a cada 3 iterações e o limite de convergência era de 5%.

Em virtude da grande variação de resistividade (resistividades muito baixas dentro do tanque e muito altas fora do tanque) o programa aplica automaticamente uma suavização dos valores de resistividade e ativa a opção de limitar o range de resistividades do modelo.

CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS

5.1. LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS - DADOS DE ELETORRESISTIVIDADE

Os dados de eletrorresistividade podem ser analisados de duas formas distintas: separadamente, através da análise 2D dos dados e em conjunto, através da representação ilustrativa 3D, apresentados em seguida.

5.1.1. ANÁLISE 2D

A análise 2D será apresentada da seguinte forma:

- os dados estão organizados por tópicos segundo as linhas de perfil realizadas;
- a localização da linha no croqui da área pode ser visualizada no início de cada tópico, de forma que o perfil estudado é marcado com a cor verde;
- para cada linha, são apresentados os modelos de resistividades reais para os dados filtrados e não-filtrados com dados de topografia;
- as pseudo-seções de resistividade aparente medidas em campo, as pseudo-seções de resistividade aparente calculadas pelo programa e o modelo de resistividades calculado podem ser apreciados no “Anexo 1 – Pseudo-seções de Resistividades Aparentes e Modelo de Resistividades Reais Sem Topografia”;
- para a linha TQ-1A foram apresentados os gráficos das curvas obtidas através dos valores de resistividade aparente mensurados e calculados pelo programa Res2dinv. O objetivo destes gráficos é verificar o ajuste entre o modelo de resistividades aparentes calculado pelo programa após a inversão dos dados em relação aos dados adquiridos em campo e, por consequência, avaliar a eficácia do programa na resolução do problema inverso proposto. Tendo em vista a similariedade dos gráficos obtidos para as demais linhas, estes foram suprimidos, visando não tornar o presente trabalho demasiadamente extenso e redundante;

- para a linha TQ-3 foram apresentados os modelos de resistividades reais obtidos através da restrição de valores. Para não alongar demasiadamente este trabalho, os resultados obtidos para estes parâmetros serão apresentados somente para o perfil TQ-3 sem a aplicação de filtros. A escolha desta linha para representação do modelo de resistividades reais com restrições se justifica pela presença de altos e baixos valores de resistividade em um mesmo perfil, além de apresentar a geometria da área de influência da vinhaça bastante clara;

- para a linha TQ-8, são apresentados os dados de duas formas distintas: na primeira, os dados são invertidos tal qual foram adquiridos em campo; na segunda, os dados que estão exageradamente mais altos ou mais baixos que seus vizinhos foram retirados, esses dados são chamados de “*outliers*” e a presença desses dados na pseudo-seção causa alterações relevantes no modelo de resistividades reais obtido. Em ambos os casos, podem ser apreciados também os modelos de resistividades reais com topografia obtidos através dos dados filtrados e não filtrados;

Os resultados das pseudo-seções serão discutidos no “Capítulo 7 – Discussão dos Resultados”. Como se trata de uma análise 2D dos resultados, as posições das anomalias serão referenciadas com relação ao eixo X (distância em metros) e com relação à profundidade em que se encontra no eixo y (em metros), os valores de resistividade podem ser comparados segundo a escala de cores, que se encontra na parte inferior das figuras.

Perfil TQ-1A

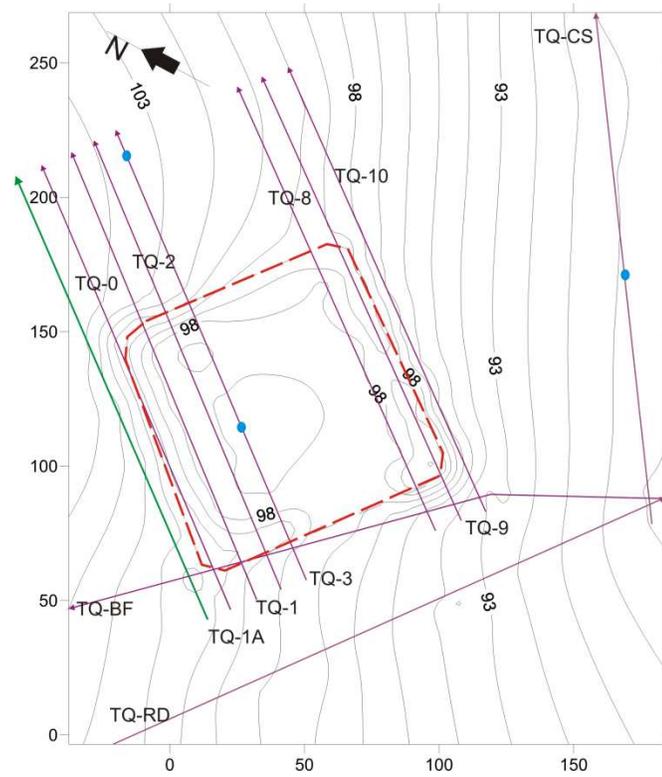


Figura 5.1 – Localização da Linha TQ-1ª

Dados não filtrados

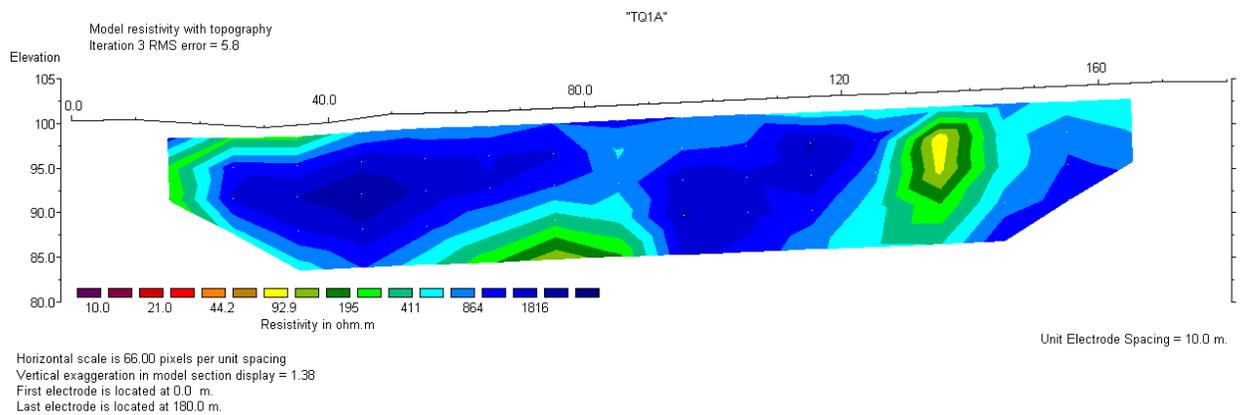


Figura 5.2 - Apresentação do perfil TQ-1A (dados não filtrados) com dados topográficos.

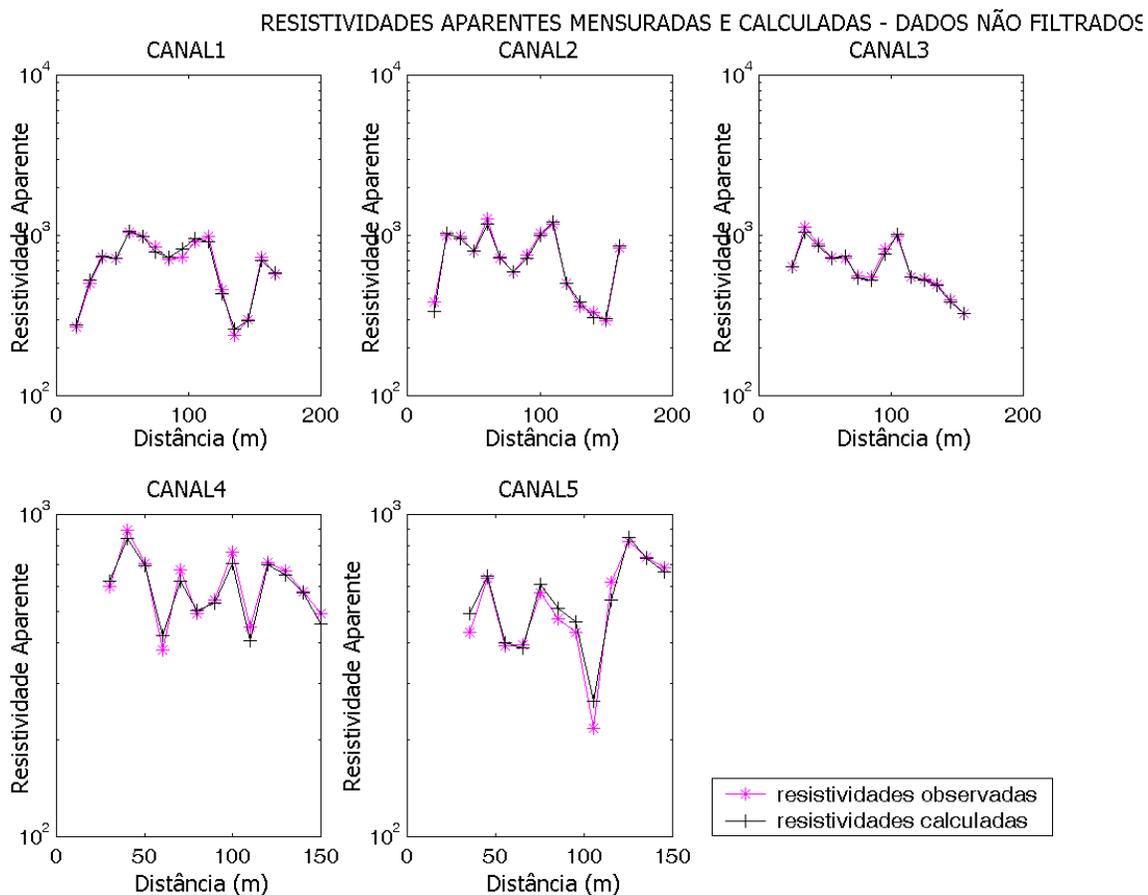


Figura 5.3 - Gráfico (dados não filtrados) com valores de resistividade aparente mensurados e calculados pelo programa Res2dinv para a linha TQ-1A. A diferença entre os dados mensurados e calculados indica o erro do ajuste do modelo. Cada canal corresponde ao respectivo nível de investigação n.

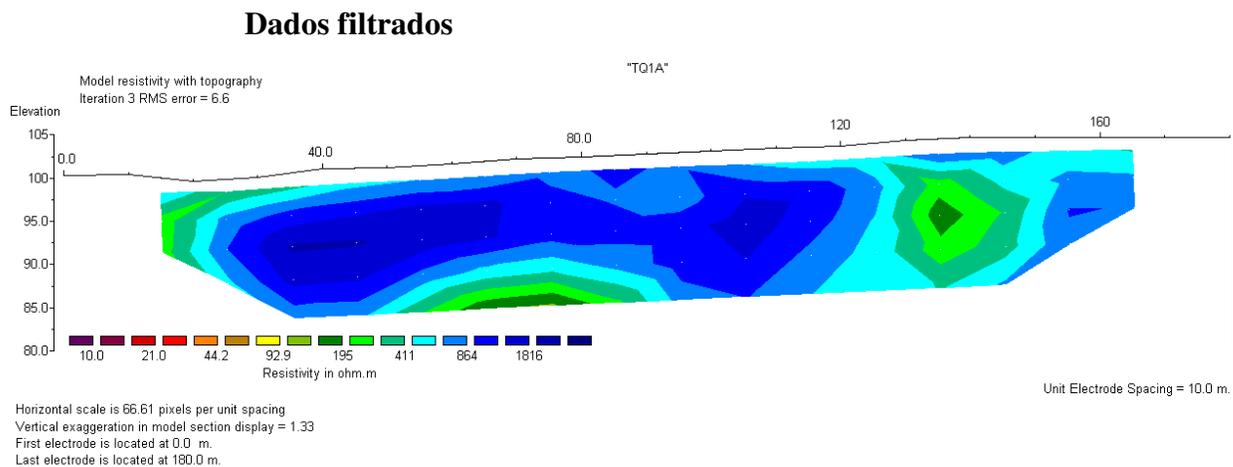


Figura 5.4 - Apresentação do perfil TQ-1A (dados filtrados) com dados topográficos.

RESISTIVIDADES APARENTES MENSURADAS E CALCULADAS - DADOS FILTRADOS

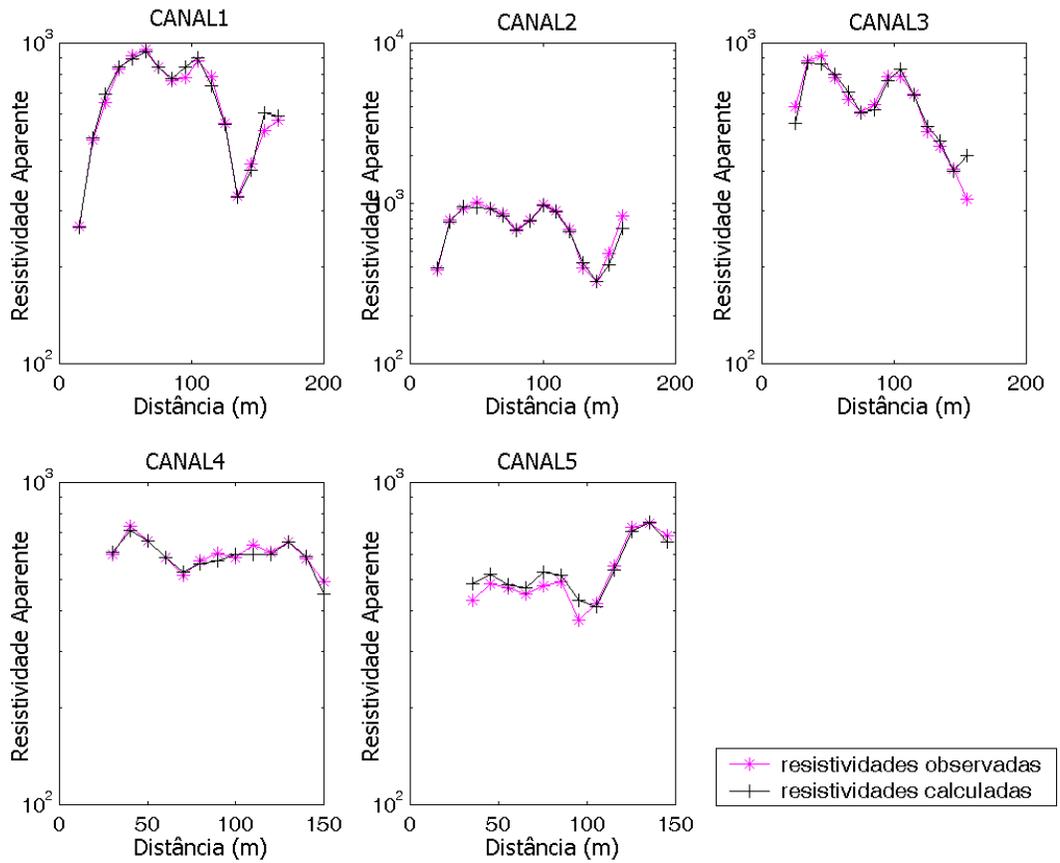


Figura 5.5 - Gráfico (dados filtrados) com valores de resistividade aparente mensurados e calculados pelo programa Res2dinv para a linha TQ-1A. A diferença entre os dados mensurados e calculados indica o erro do ajuste do modelo. Cada canal corresponde ao respectivo nível de investigação n.

Perfil TQ-0

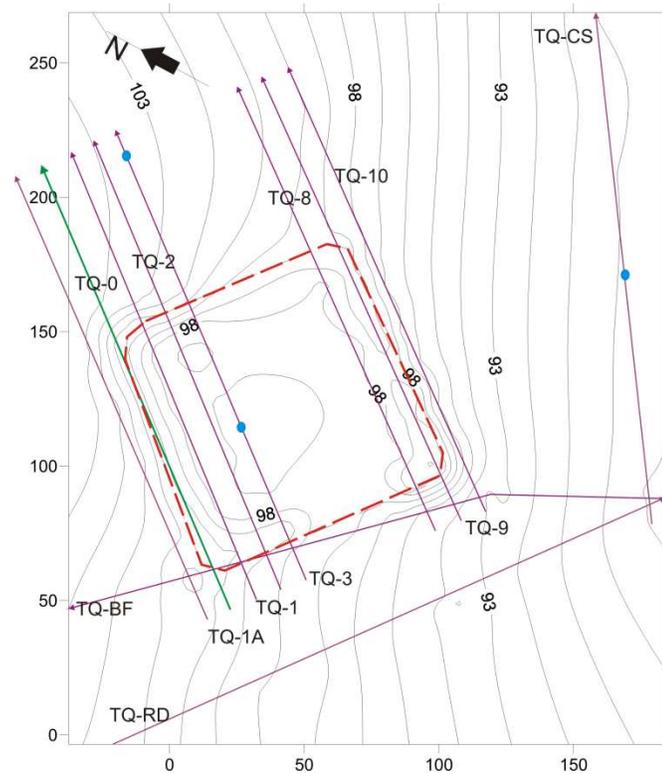


Figura 5.6 – Localização da Linha TQ-0.

Dados não filtrados

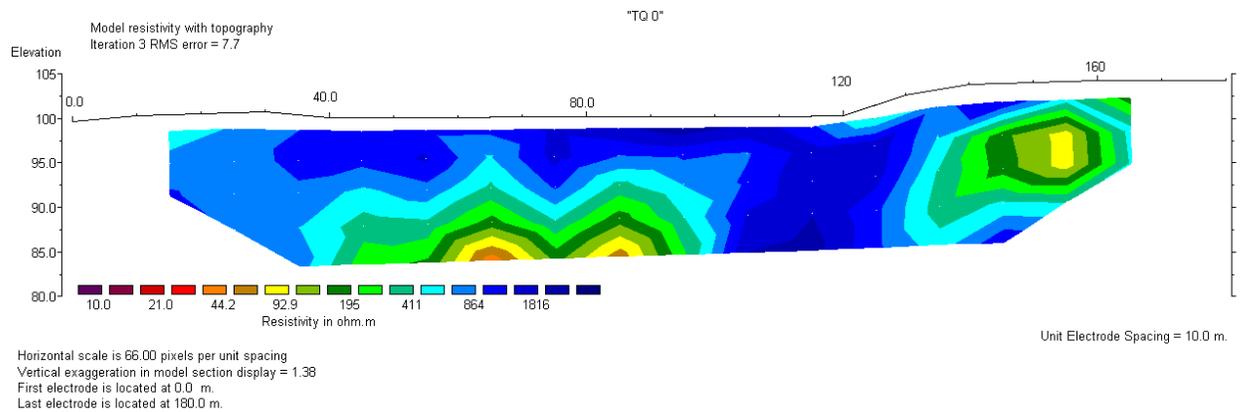


Figura 5.7 - Apresentação do perfil TQ-0 (dados não filtrados) com dados topográficos.

Dados filtrados

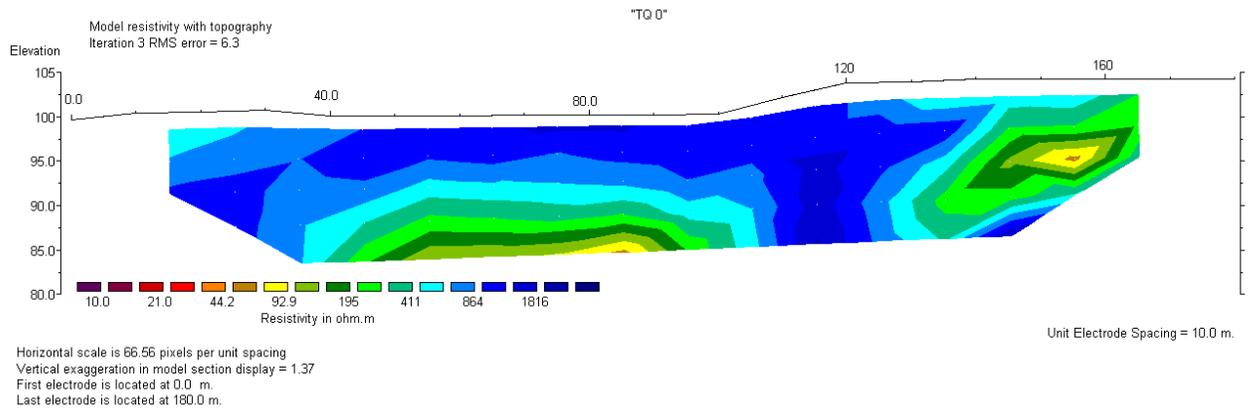


Figura 5.8 - Apresentação do perfil TQ-0 (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-1

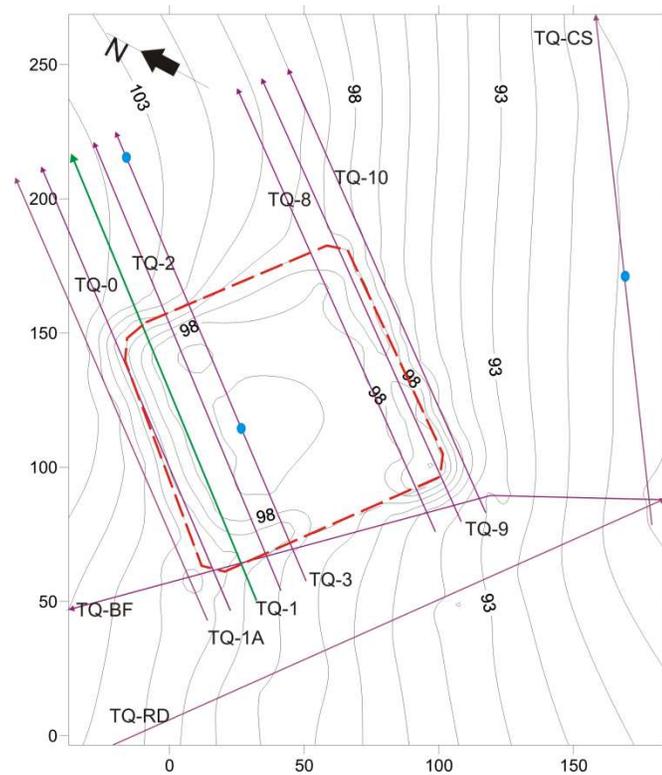


Figura 5.9 – Localização da Linha TQ-1.

Dados não filtrados

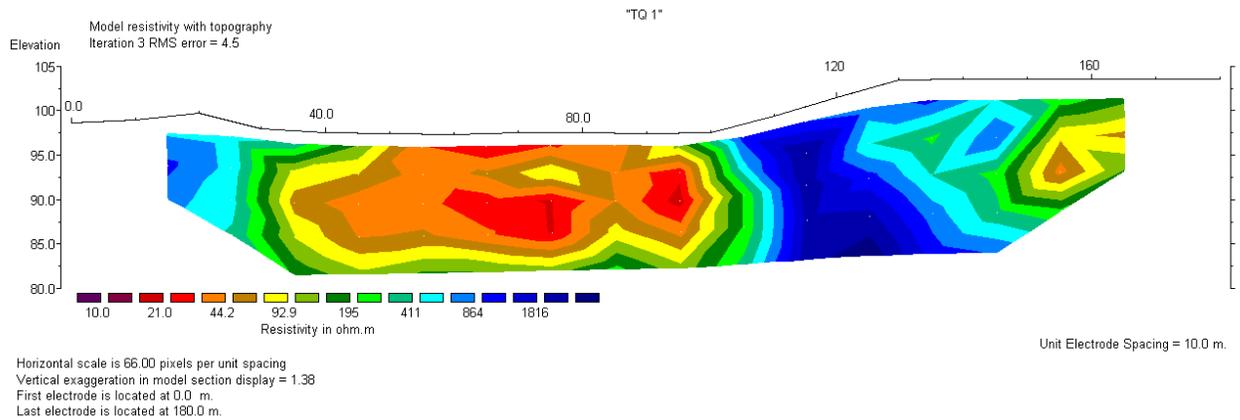


Figura 5.10- Apresentação do perfil TQ-1 (dados não filtrados) com dados topográficos.

Dados filtrados

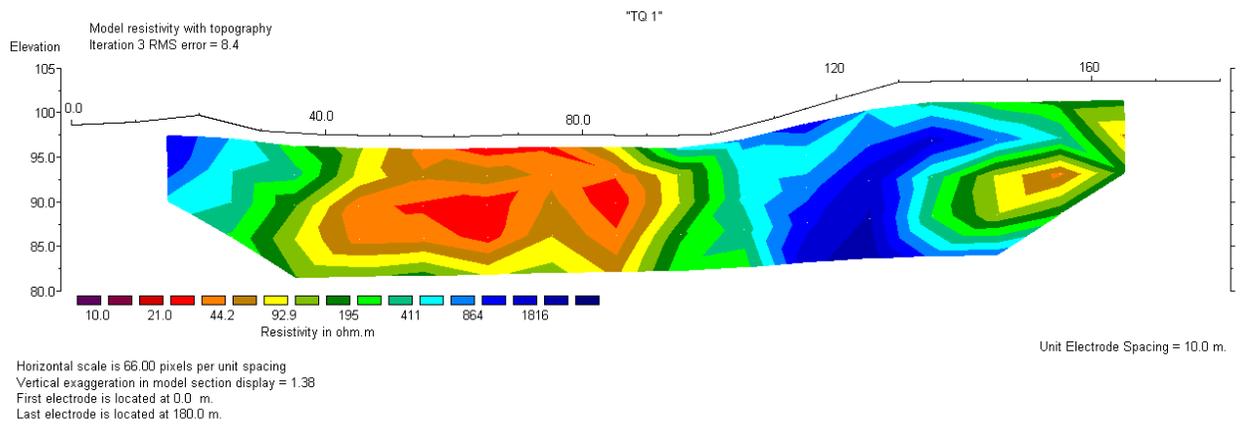


Figura 5.11- Apresentação do perfil TQ-1 (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-2

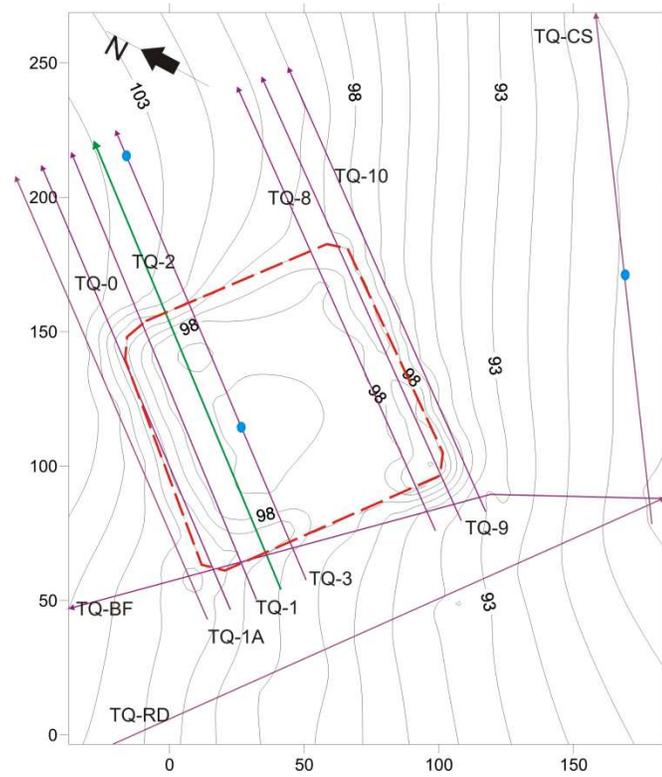


Figura 5.12 - Localização da Linha TQ-2.

Dados não filtrados

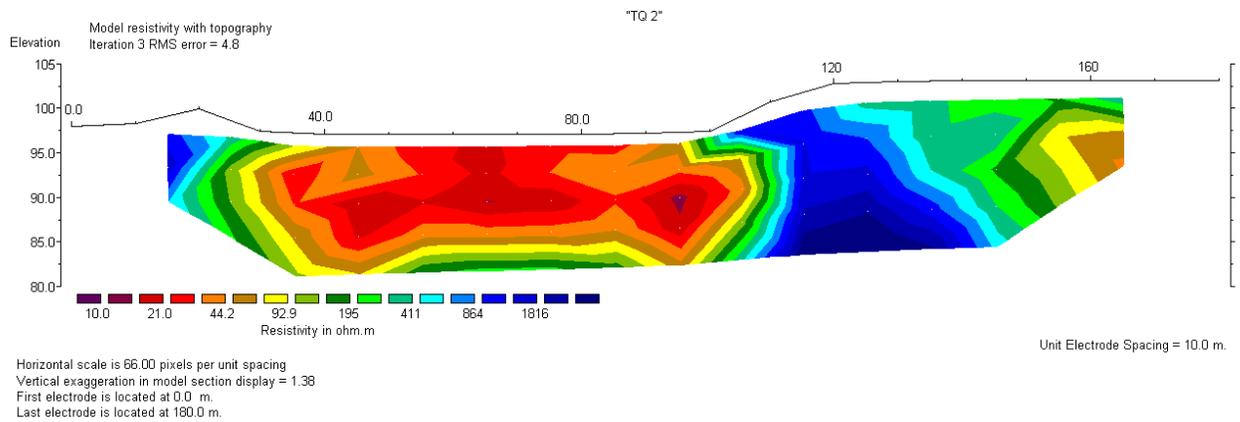


Figura 5.13 - Apresentação do perfil TQ-2 (dados não filtrados) com dados topográficos.

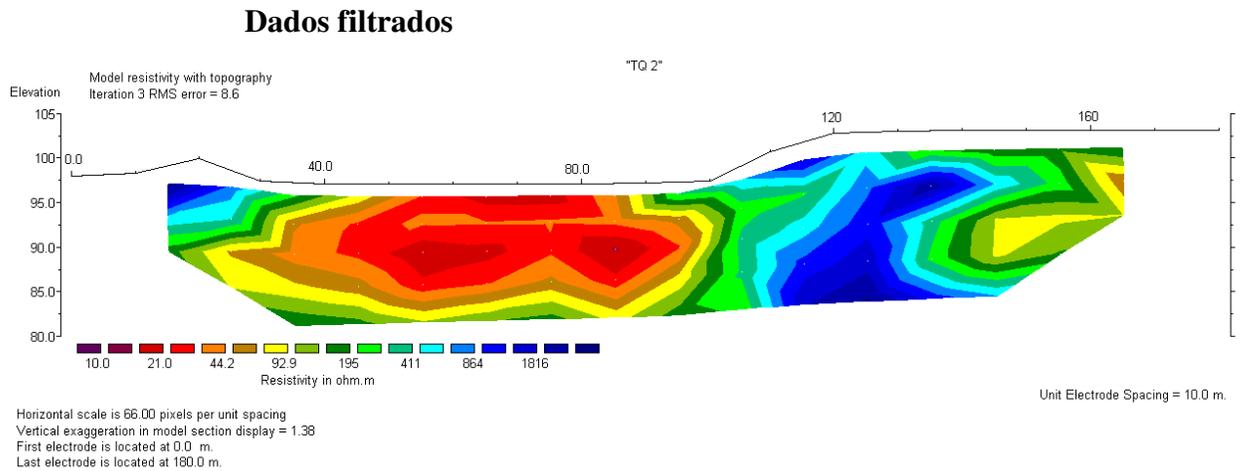


Figura 5.14 - Apresentação do perfil TQ-2 (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-3

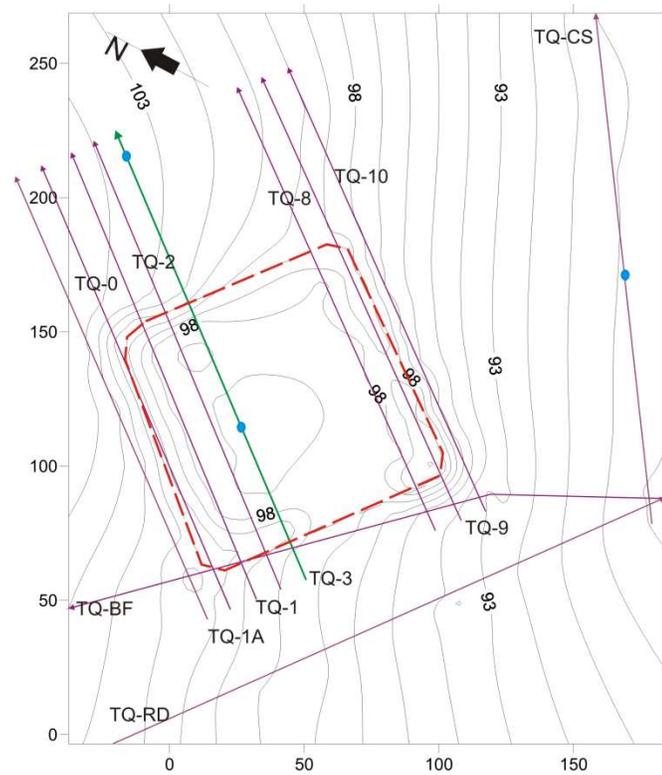


Figura 5.15 – Localização da Linha TQ-3.

Dados não filtrados

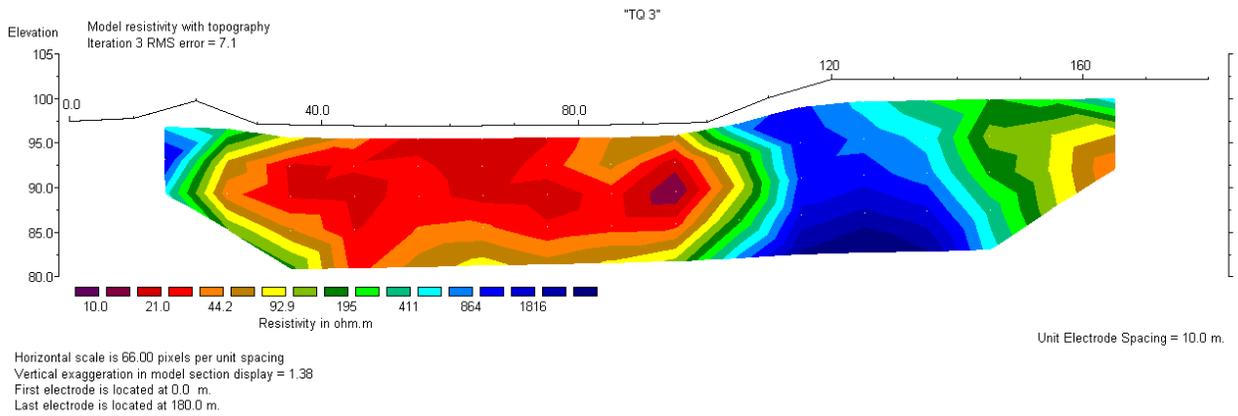


Figura 5.16 - Apresentação do perfil TQ-3 (dados não filtrados) com dados topográficos.

Dados filtrados

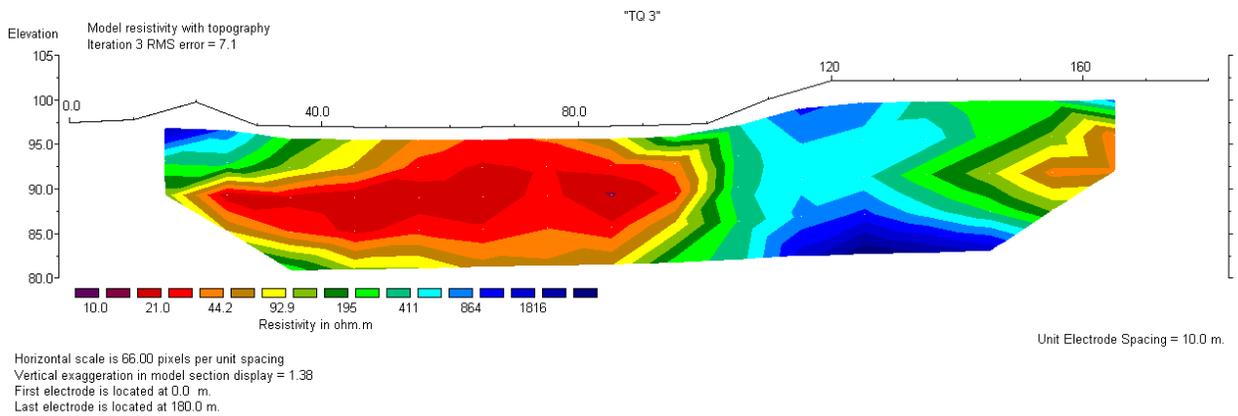


Figura 5.17 - Apresentação do perfil TQ-3 (dados filtrados) com dados topográficos.

Dados com valores restringidos

Com o objetivo de verificar a possibilidade de diminuir os valores de resistividades reais obtidos pelo programa, foram feitos ensaios restringindo os valores máximos obtidos para o modelo. Dentre as tentativas, os parâmetros “fator limite superior” (*upper limit factor*) e “fator limite inferior” (*lower limit factor*) foram alterados, de forma que os melhores resultados foram obtidos, respectivamente, com os valores 8 e 0.07. As pseudo-seções de resistividades aparentes medidas e calculadas bem como o modelo de resistividades reais sem topografia e com topografia para os dados não filtrados podem ser apreciadas, respectivamente, nas figuras 5.18 e 5.19.

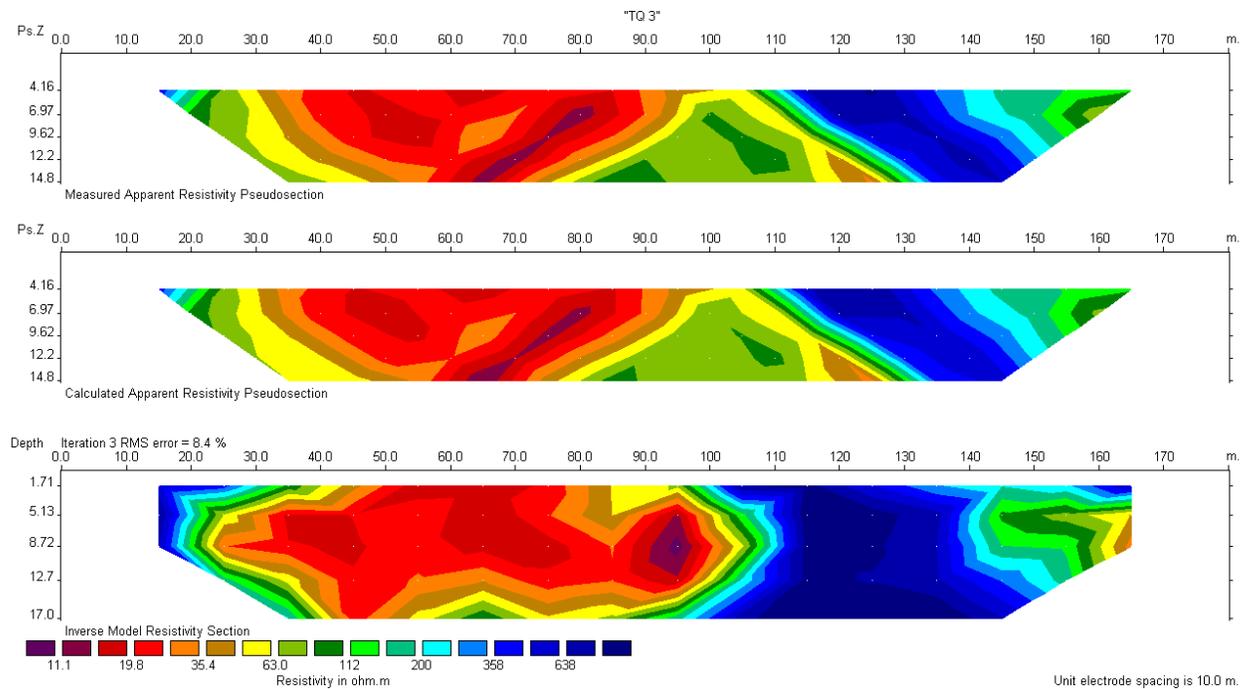


Figura 5.18 – Pseudo-seção de resistividade aparente medido, pseudo-seção de resistividade aparente calculado e modelo de resistividades reais obtidos por meio de restrições dos valores de resistividade - Dados não filtrados.

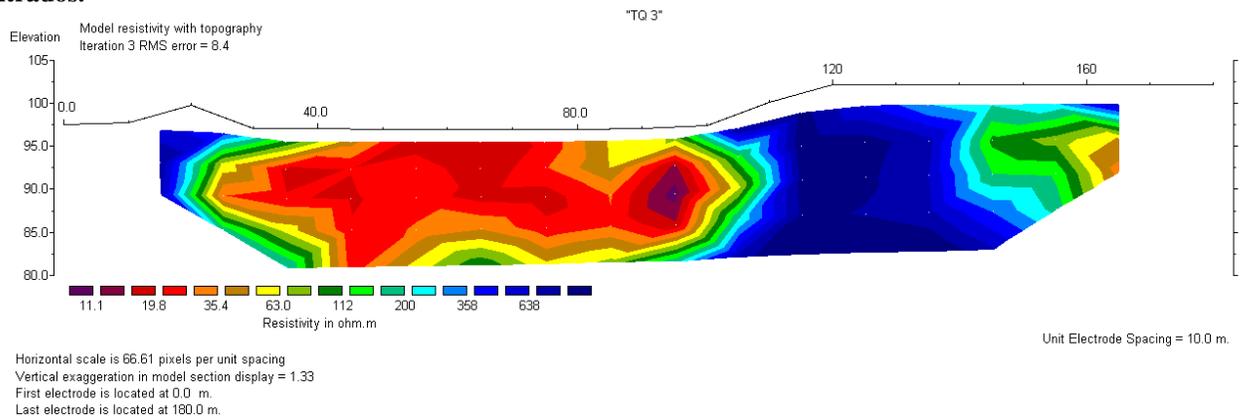


Figura 5.19 - Modelo de resistividades reais com topografia obtido por meio de restrições dos valores de resistividade - Dados não filtrados

Perfil TQ-8

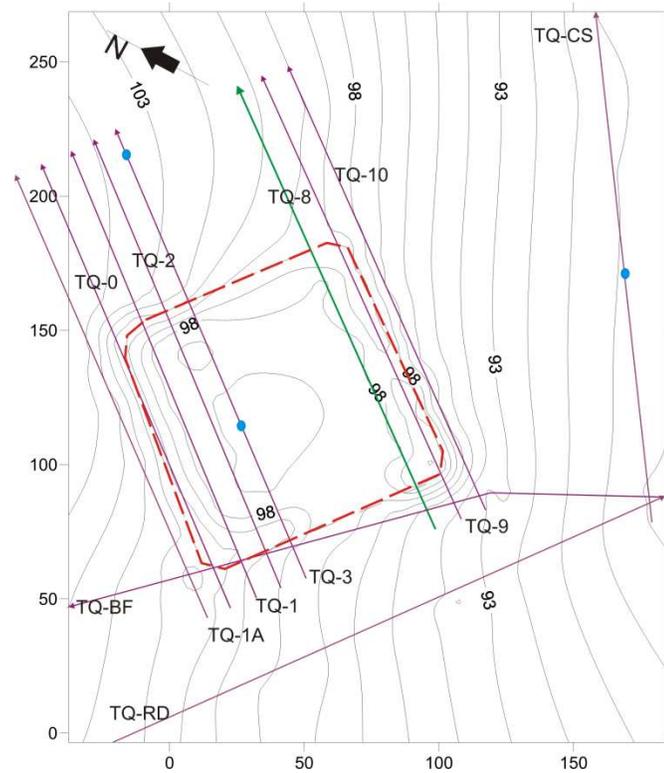


Figura 5.20 – Localização da Linha TQ-8.

Dados não filtrados com “outliers”

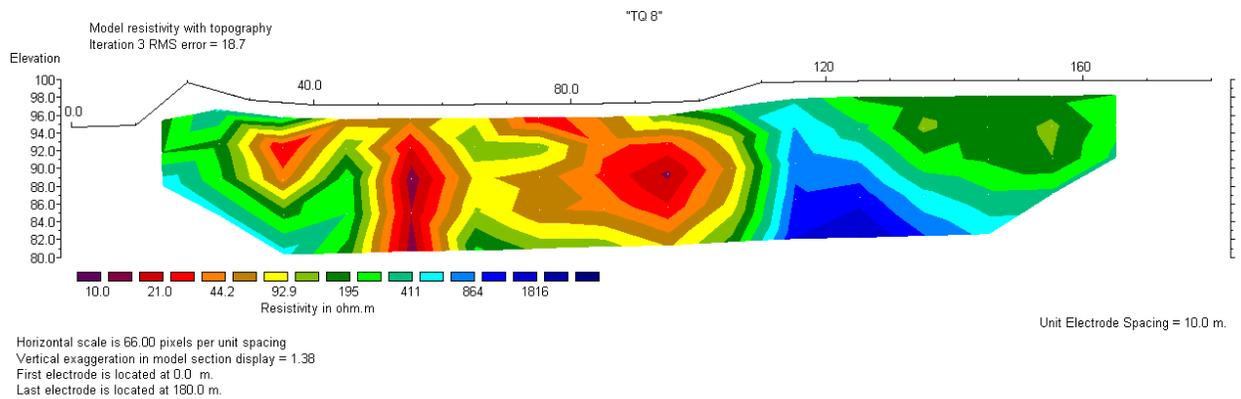


Figura 5.21 - Apresentação do perfil TQ-8 (dados não filtrados e com “outliers”) com dados topográficos.

Dados filtrados com "outliers"

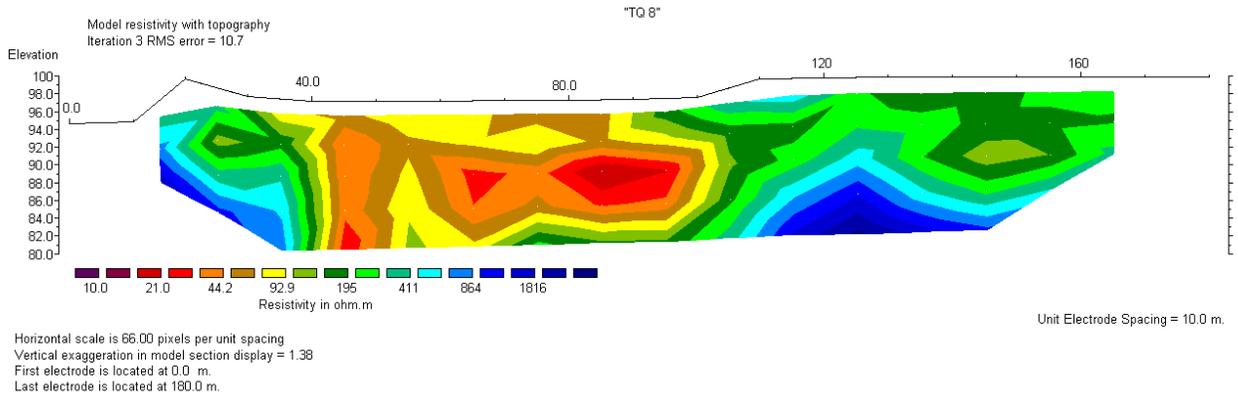


Figura 5.22 - Apresentação do perfil TQ-8 (dados filtrados e com "outliers") com dados topográficos.

Dados não filtrados sem "outliers"

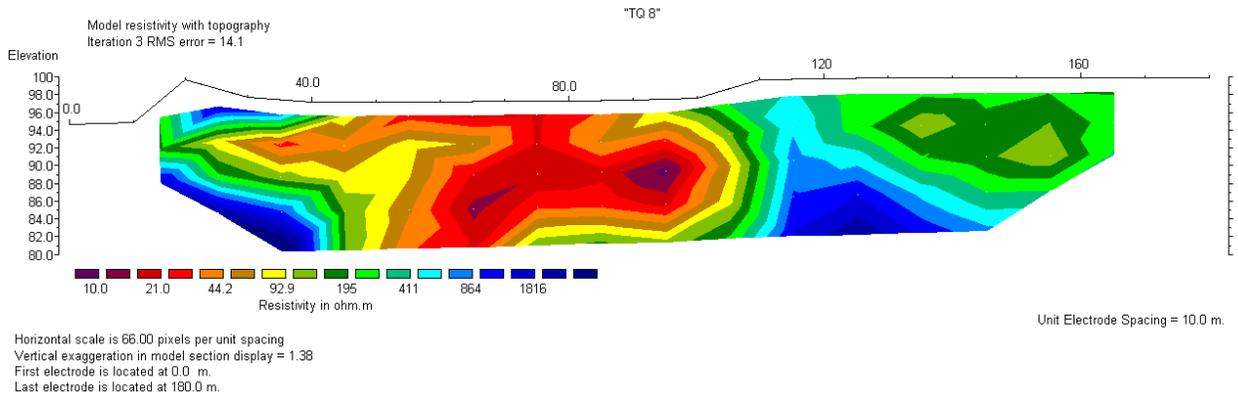


Figura 5.23- Apresentação do perfil TQ-8 (dados não filtrados e sem "outliers") com dados topográficos.

Dados filtrados sem "outliers"

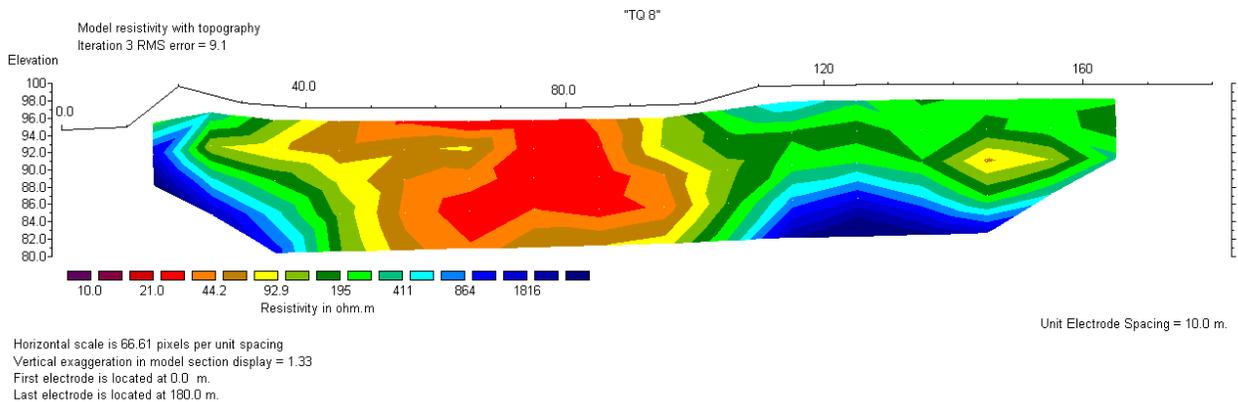


Figura 5.24 - Apresentação do perfil TQ-8 (dados filtrados e sem "outliers") com dados topográficos.

Perfil TQ-9

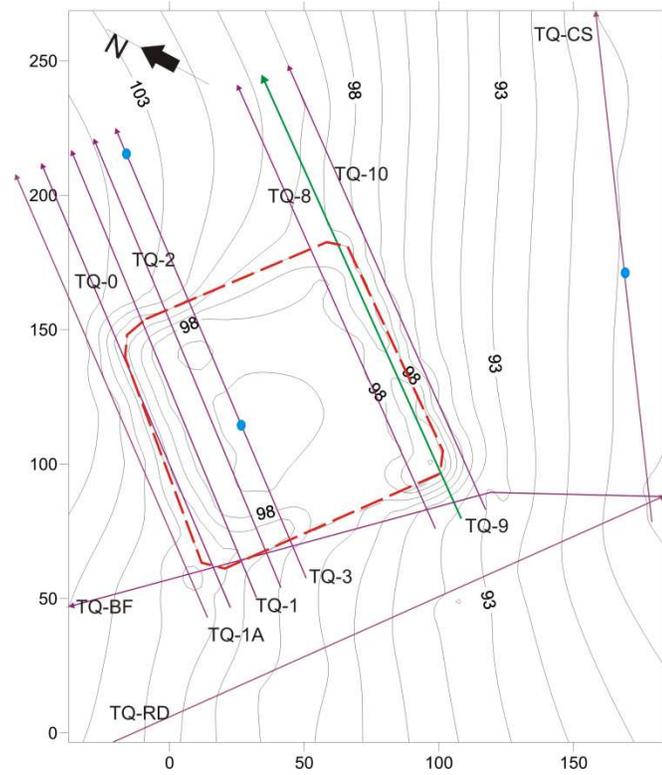


Figura 5.25 – Localização da Linha TQ-9.

Dados não filtrados

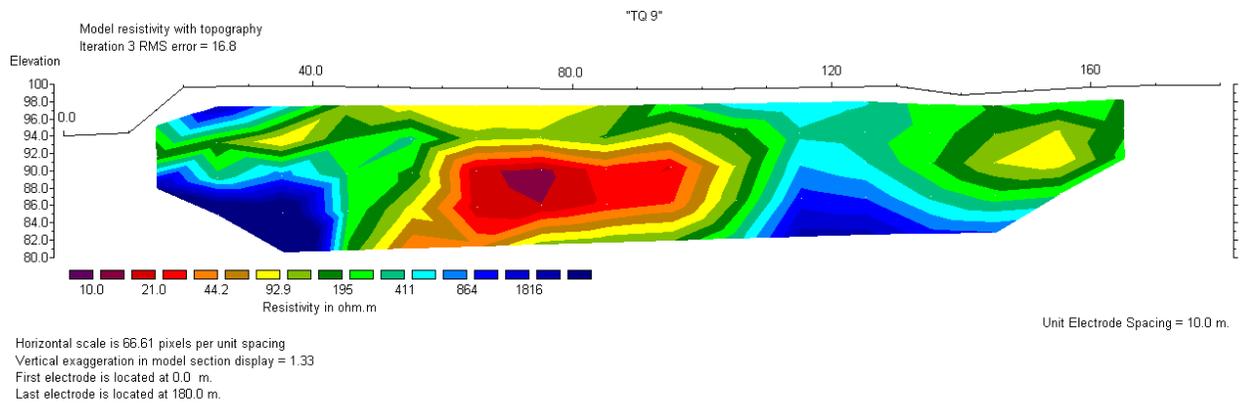


Figura 5.26- Apresentação do perfil TQ-9 (dados não filtrados) com dados topográficos.

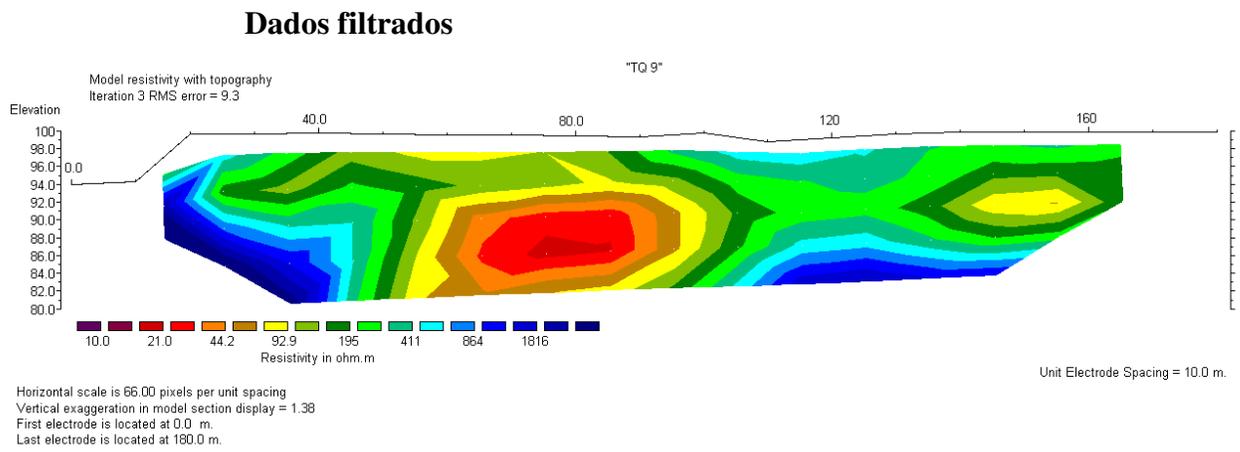


Figura 5.27- Apresentação do perfil TQ-9 (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-10

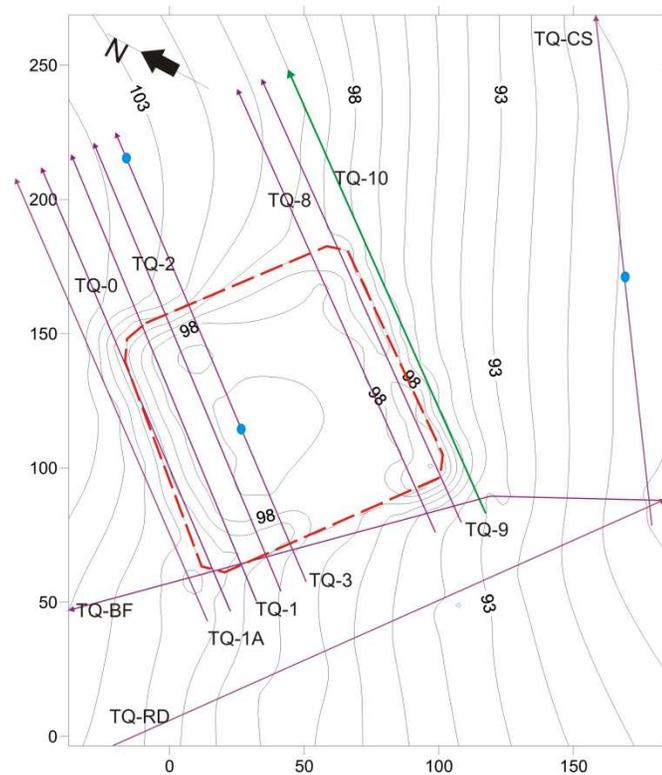


Figura 5.28 – Localização da Linha TQ-10.

Dados não filtrados

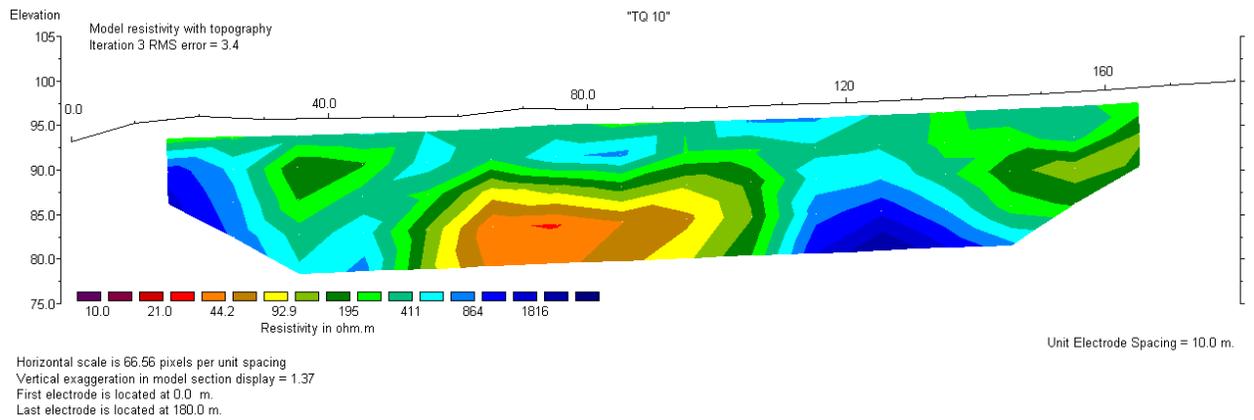


Figura 5.29 - Apresentação do perfil TQ-10 (dados não filtrados) com dados topográficos.

Dados filtrados

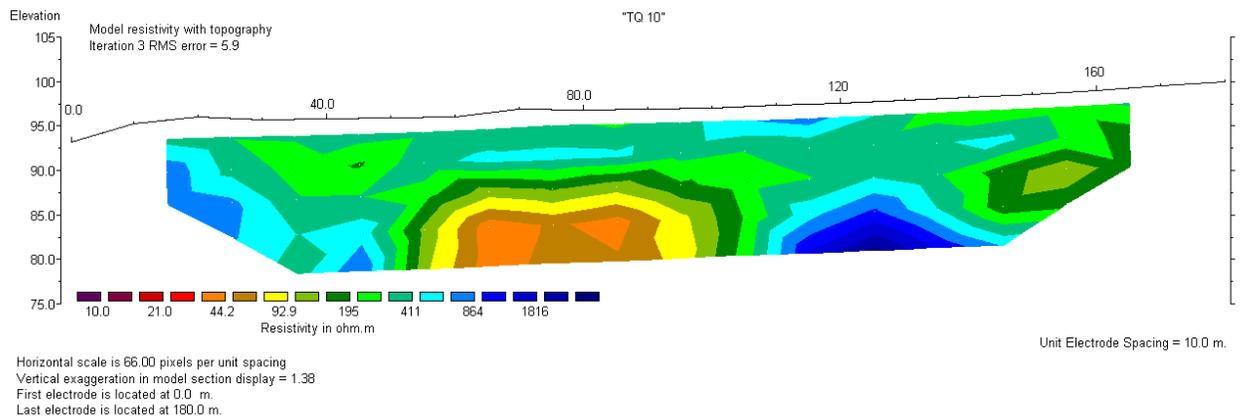


Figura 5.30 - Apresentação do perfil TQ-10 (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-CS

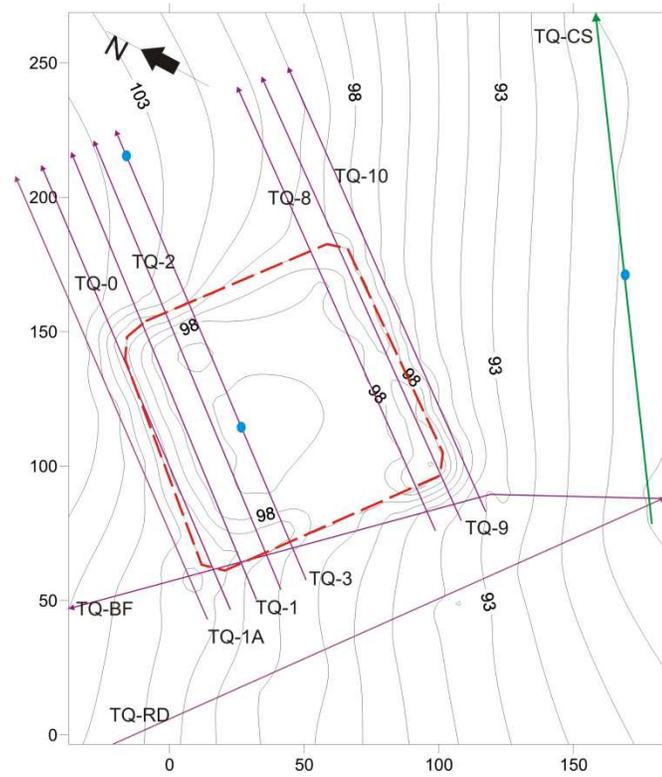


Figura 5.31 – Localização da Linha TQ-CS.

Dados não filtrados

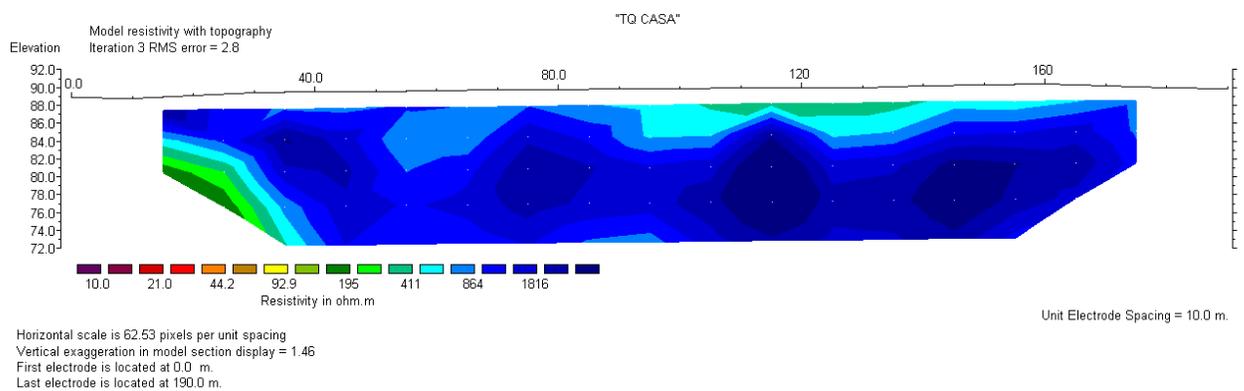


Figura 5.32- Apresentação do perfil TQ-CS (dados não filtrados) com dados topográficos.

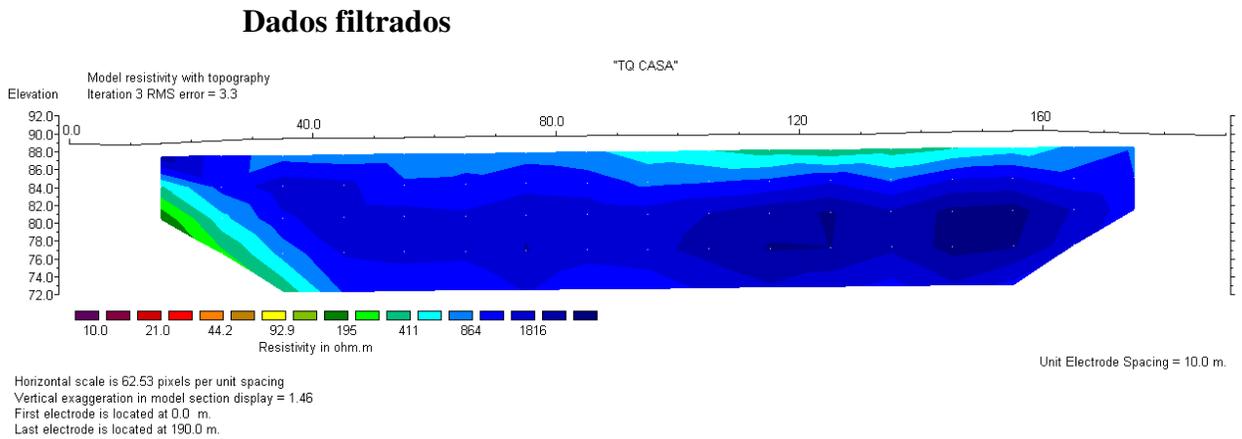


Figura 5.33 - Apresentação do perfil TQ-CS (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-BF

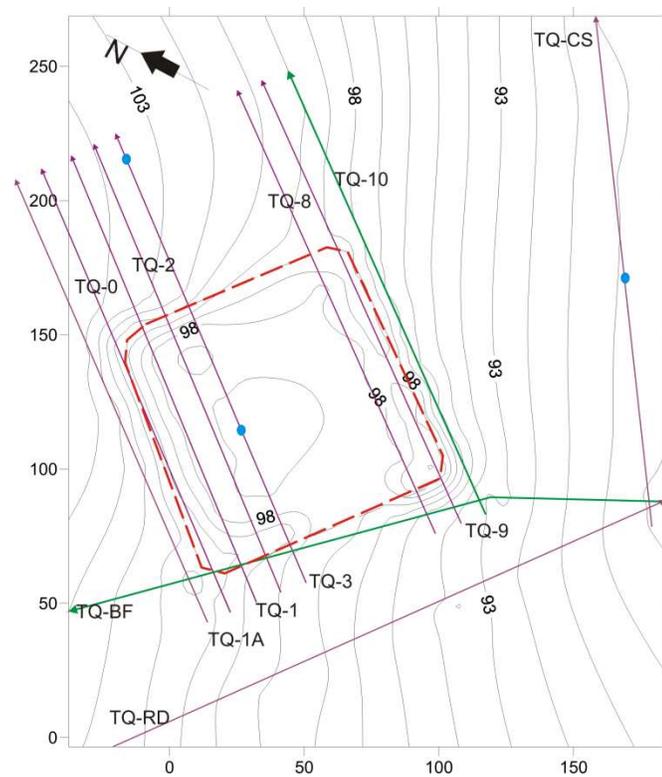


Figura 5.34 – Localização da Linha TQ-BF.

Em virtude do sentido do levantamento das linhas TQ-BF e TQ-RD ser oposto entre si (Figura 4.3), executou-se, dentro do programa RES2DINV e para todas as figuras geradas para

esse perfil, a opção “*reverse pseudosection*”, que, como sugere o nome, consiste em inverter a pseudo-seção.

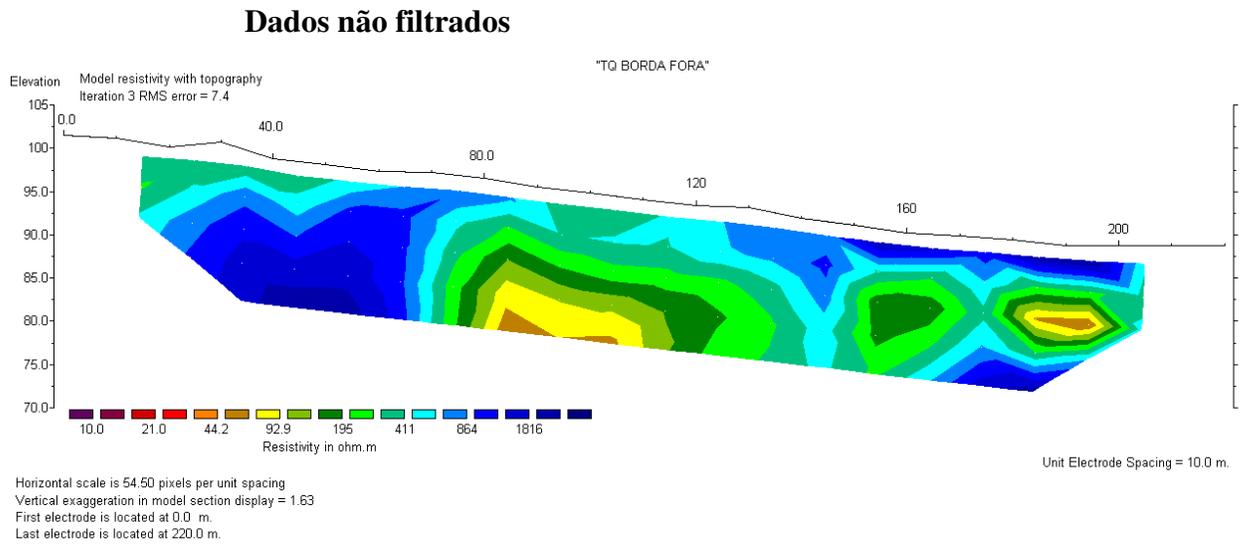


Figura 5.35 - Apresentação do perfil TQ-BF (dados não filtrados) com dados topográficos.

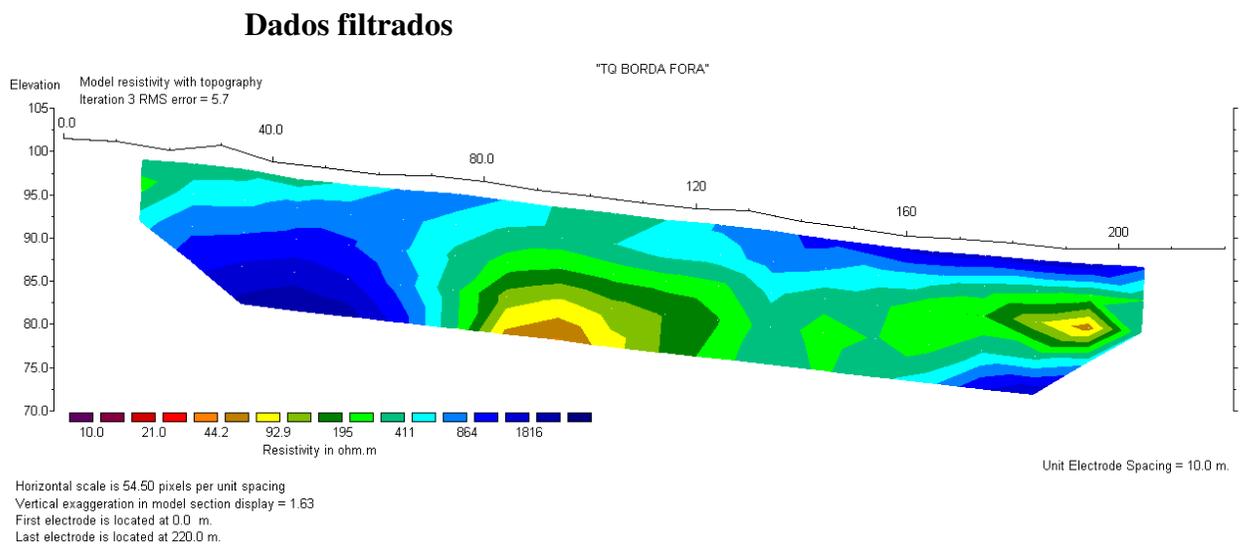


Figura 5.36 - Apresentação do perfil TQ-BF (dados filtrados) com dados topográficos.

Perfil TQ-RD

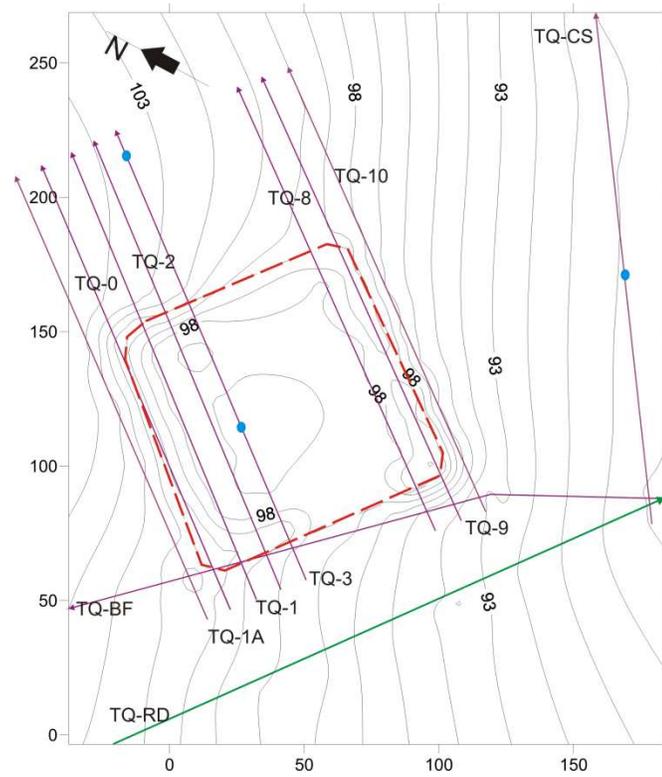


Figura 5.37 – Localização da Linha TQ-RD.

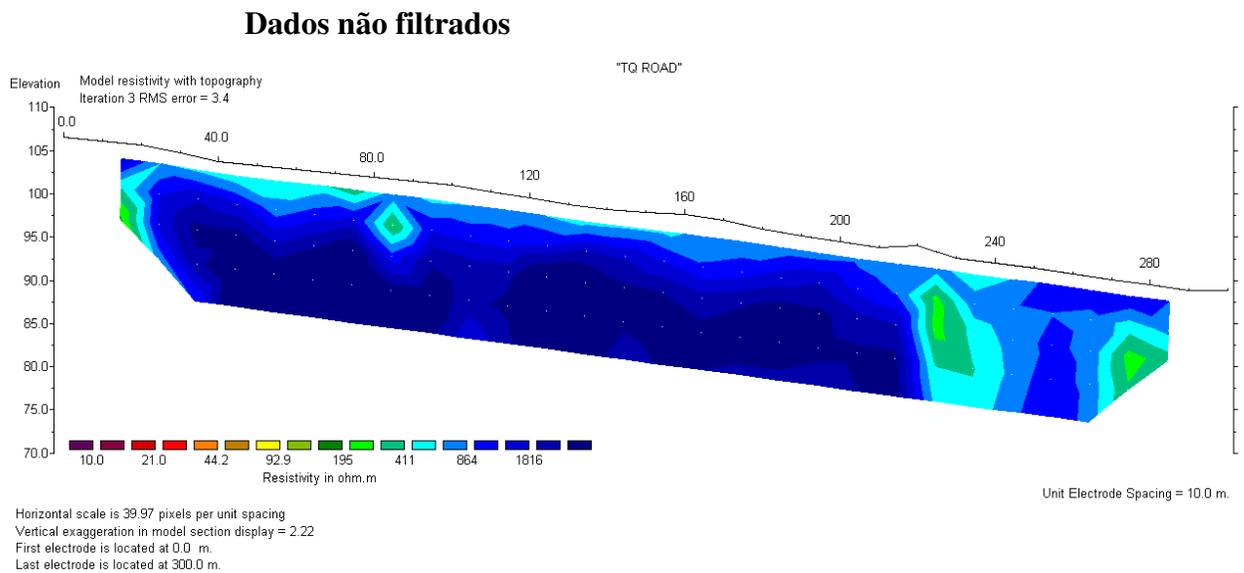


Figura 5.38 - Apresentação do perfil TQ-RD (dados não filtrados) com dados topográficos.

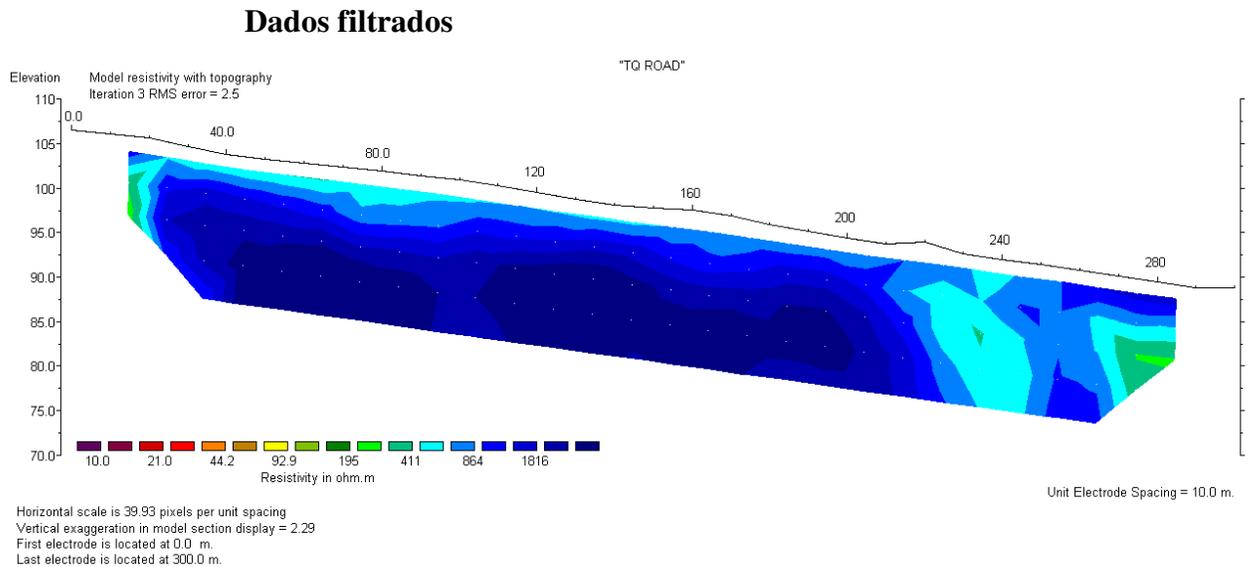


Figura 5.39 - Apresentação do perfil TQ-RD (dados filtrados) com dados topográficos.

5.1.2. ANÁLISE 3D

Como já citado anteriormente, a análise 3D foi feita com base na interpolação dos dados obtidos em campo das linhas TQ-1A a TQ-10 através do programa comercial Res3dinv e é apenas uma forma de melhor representá-los, já que os dados não foram adquiridos no *layout* 3D.

As representações 3D estão organizadas em coletâneas, de forma que a primeira coletânea engloba as seções horizontais, o sentido do fluxo contaminante e as seções verticais em XZ e em YZ, oriundos dos dados não filtrados, e a segunda coletânea, as seções oriundas dos dados filtrados.

A Figura 5.40 apresenta a disposição das seções horizontais e verticais com relação às linhas de geofísica e aos eixos utilizados como referência, de forma a permitir melhor compreensão espacial dos dados apresentados.

As seções horizontais são apresentadas em diferentes intervalos de profundidades: 0.00 m – 3.50 m; 3.50m – 6.53m; 6.53m – 12.2m; 12.2m – 16.5m; 16.5m – 23.6m. Em todas as profundidades, as setas pontilhadas representam os locais onde foram feitos os levantamentos e a localização da parte interna do tanque está assinalada com um retângulo, de forma que se pode acompanhar, em profundidade, a evolução do fluxo contaminante. O fluxo contaminante está

representado nas Figuras 5.42 e 5.46 através de setas que indicam seu sentido, a grossura da seta está relacionada com a intensidade de sua influência com relação ao fluxo.

As seções verticais YZ e XZ estão divididas em intervalos de 10 metros e alcançam a profundidade máxima de 20.5 metros.

A discussão dos resultados aqui é apresentada mais adiante em “CAPÍTULO 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS”.

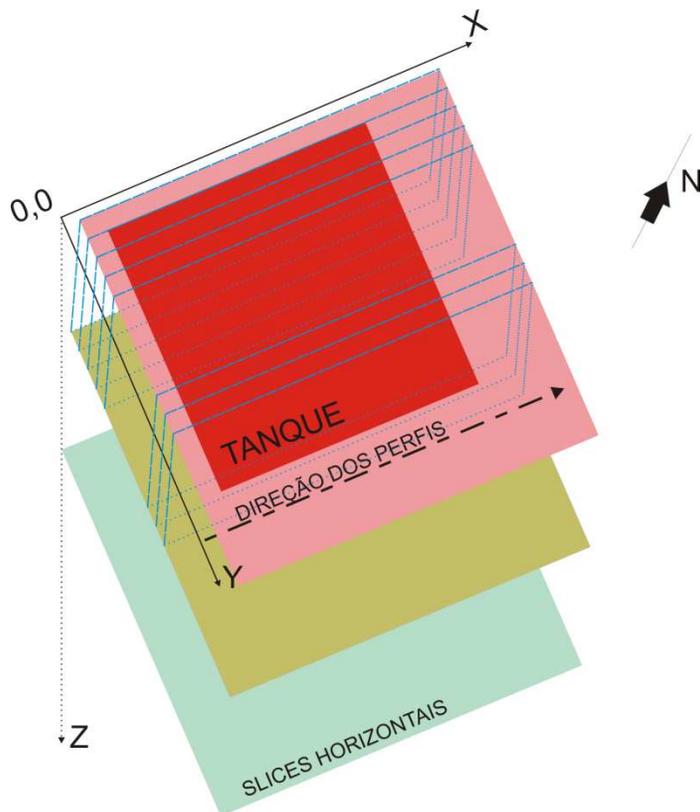


Figura 5.40 – Figura esquemática da distribuição das seções horizontais e verticais com relação aos eixos X, Y e Z e à direção dos perfis. A origem do sistema de coordenadas está assinalada no ponto de intersecção entre os três eixos (0,0).

DADOS NÃO FILTRADOS

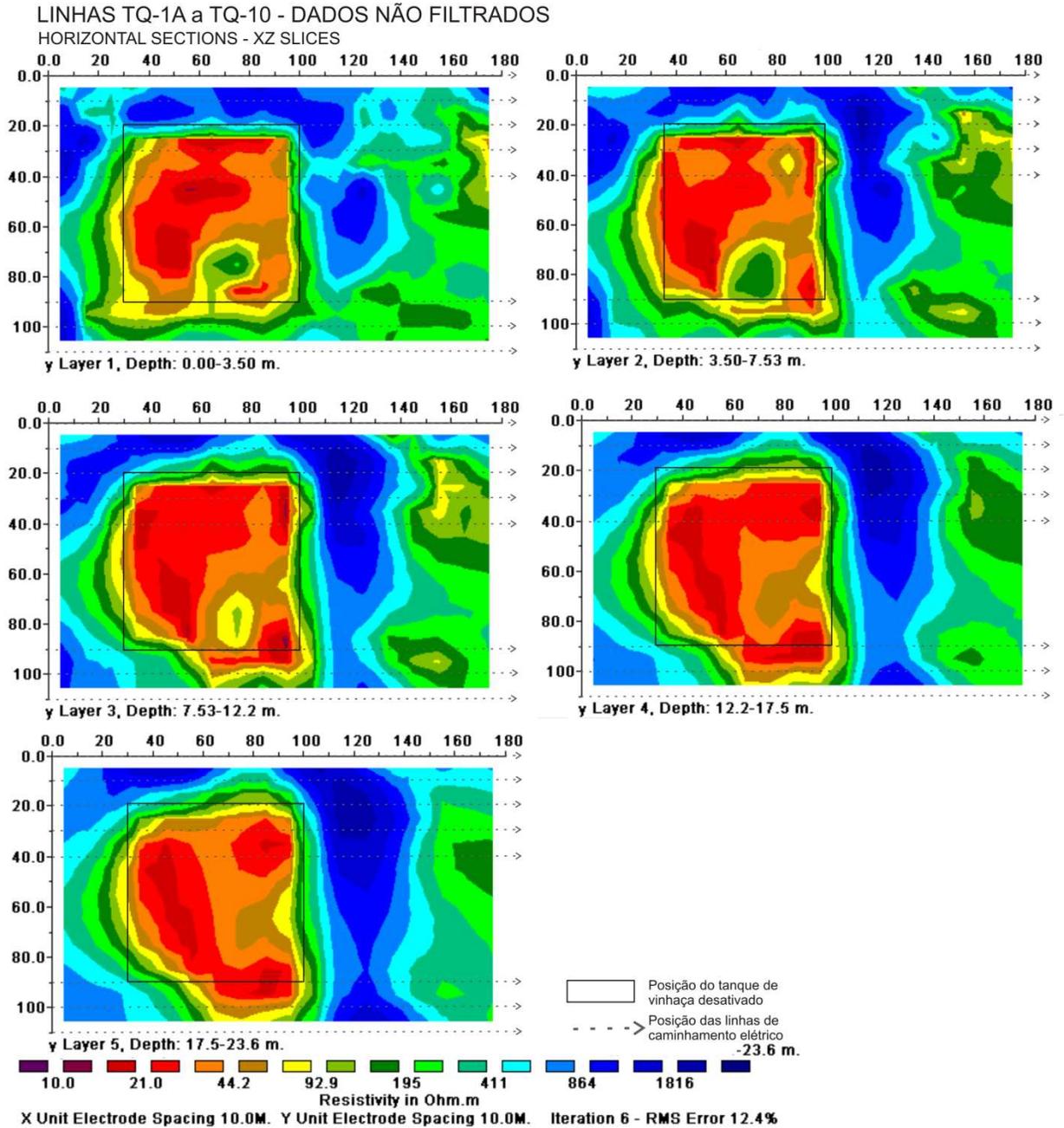


Figura 5.41 – Representação 3D em seções horizontais com utilização do método de inversão Gauss-Newton incompleto e modelo padrão de discretização da subsuperfície – DADOS NÃO FILTRADOS. As setas em linha pontilhada representam a localização dos perfis e o quadrado em linha contínua representa a posição do tanque de vinhaça.

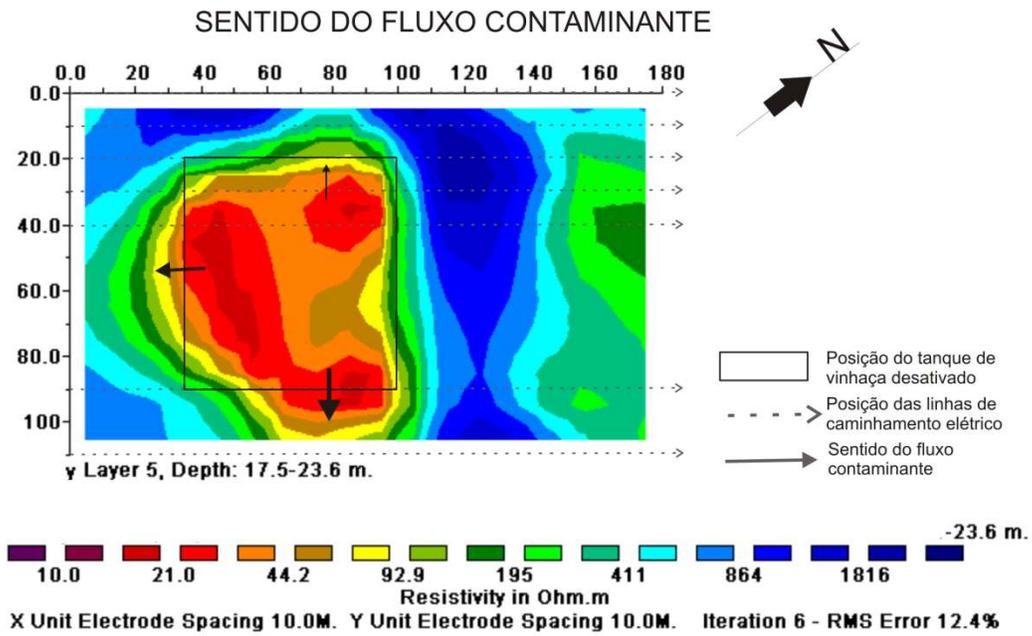


Figura 5.42 - Sentido do fluxo contaminante – DADOS NÃO FILTRADOS. As setas maiores indicam uma intensidade de fluxo maior.

LINHAS TQ-1A a TQ-10 - DADOS NÃO FILTRADOS
 VERTICAL SECTIONS - YZ SLICES

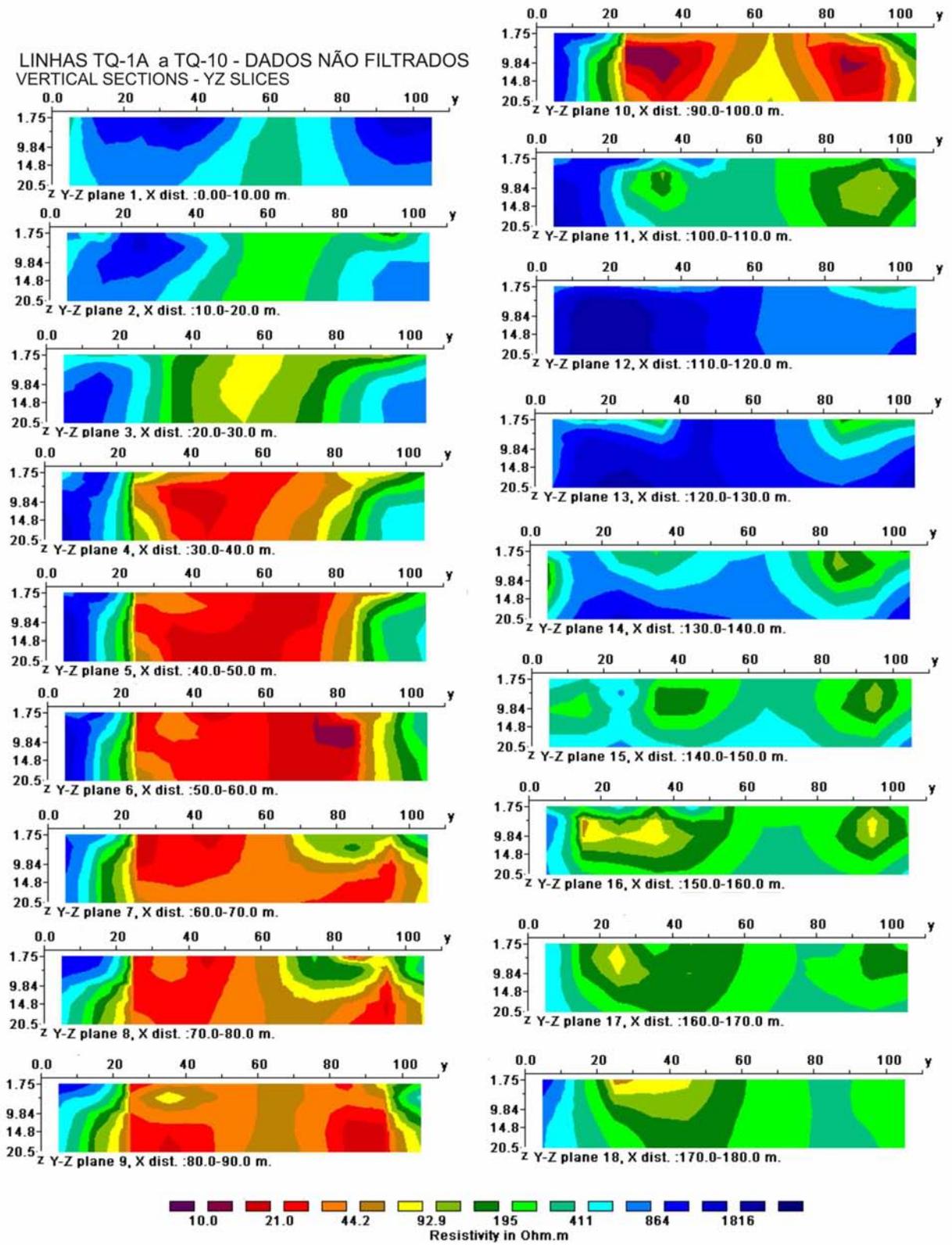


Figura 5.43 – Seções verticais em YZ – DADOS NÃO FILTRADOS.

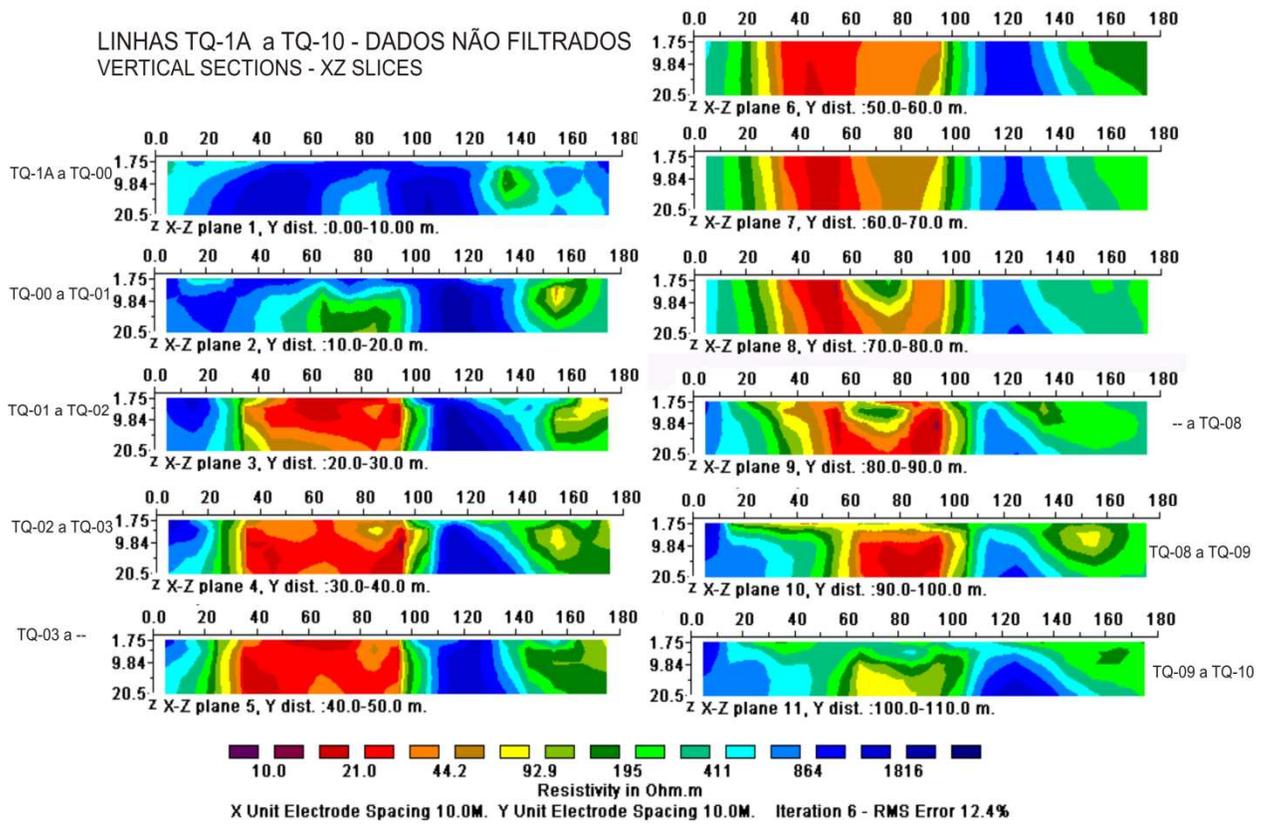


Figura 5.44 – Seções verticais em XZ – DADOS NÃO FILTRADOS.

DADOS FILTRADOS

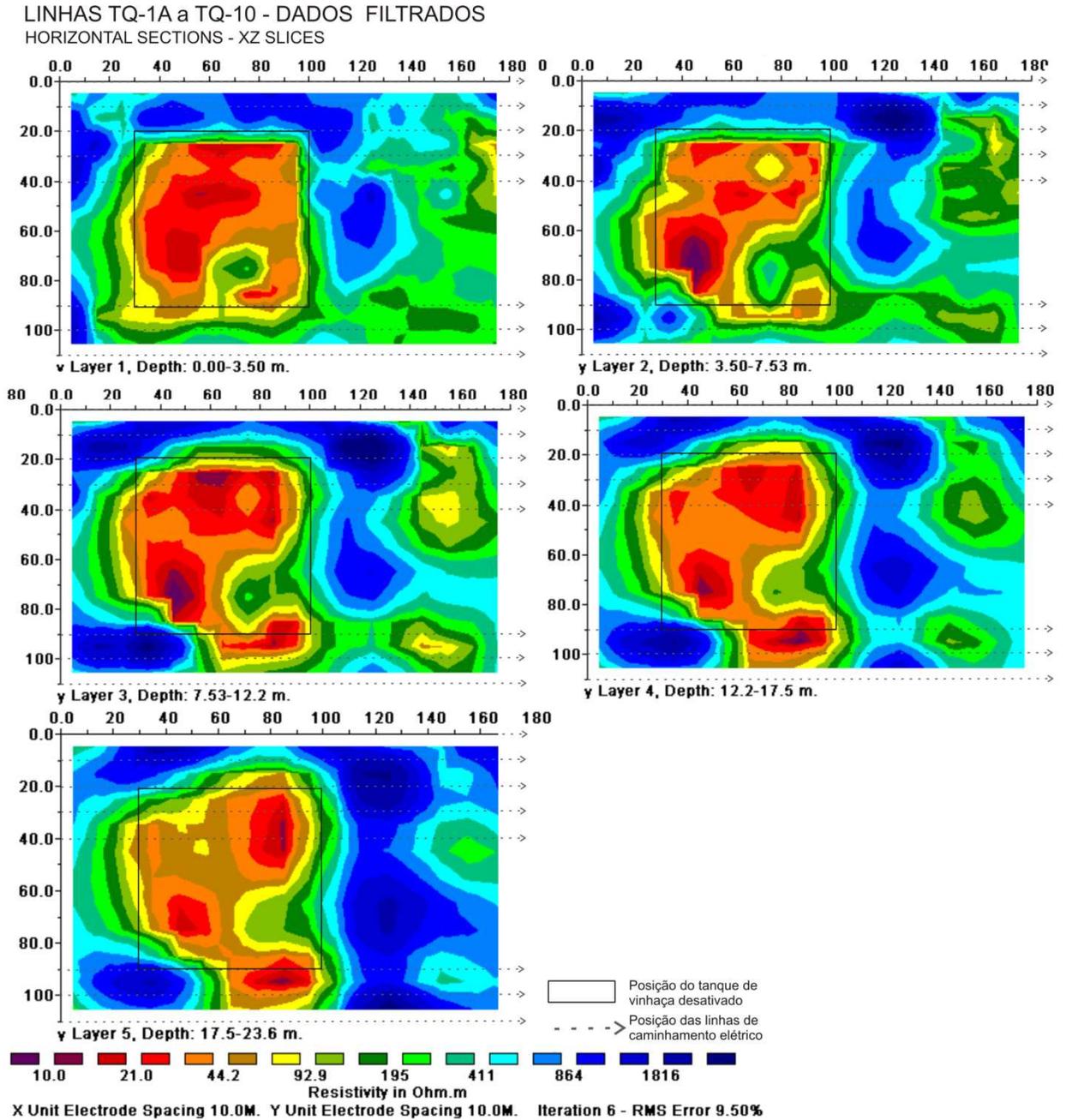


Figura 5.45 – Representação 3D em seções horizontais com utilização do método de inversão Gauss-Newton incompleto e modelo padrão de discretização da subsuperfície – DADOS FILTRADOS. As setas em linha pontilhada representam a localização dos perfis e o quadrado em linha contínua representa a posição do tanque de vinhaça.

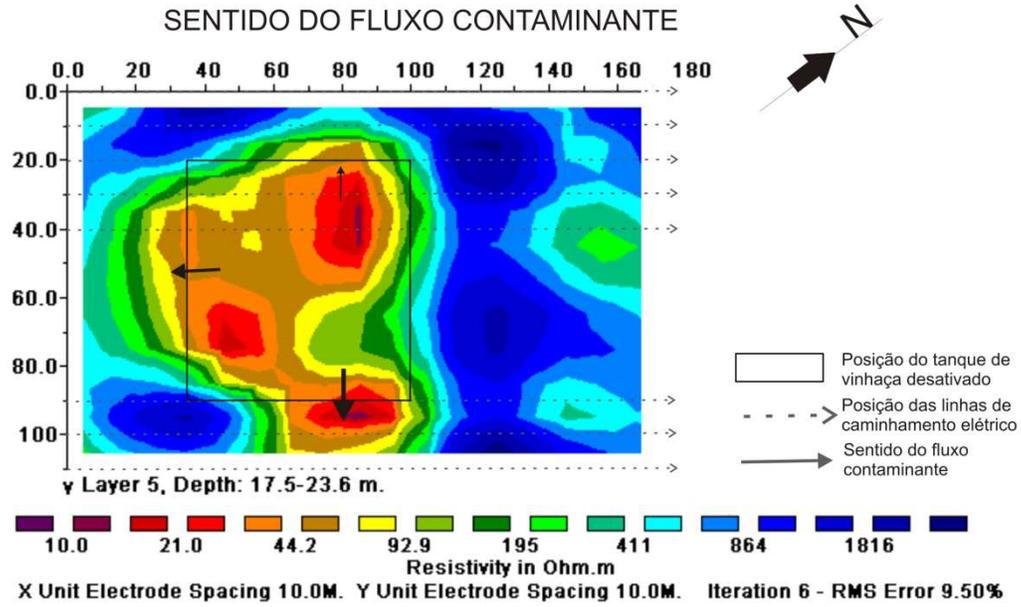


Figura 5.46 - Sentido do fluxo contaminante – DADOS FILTRADOS. As setas maiores indicam uma intensidade de fluxo maior.

LINHAS TQ-1A a TQ-10 - DADOS FILTRADOS
 VERTICAL SECTIONS - YZ SLICES

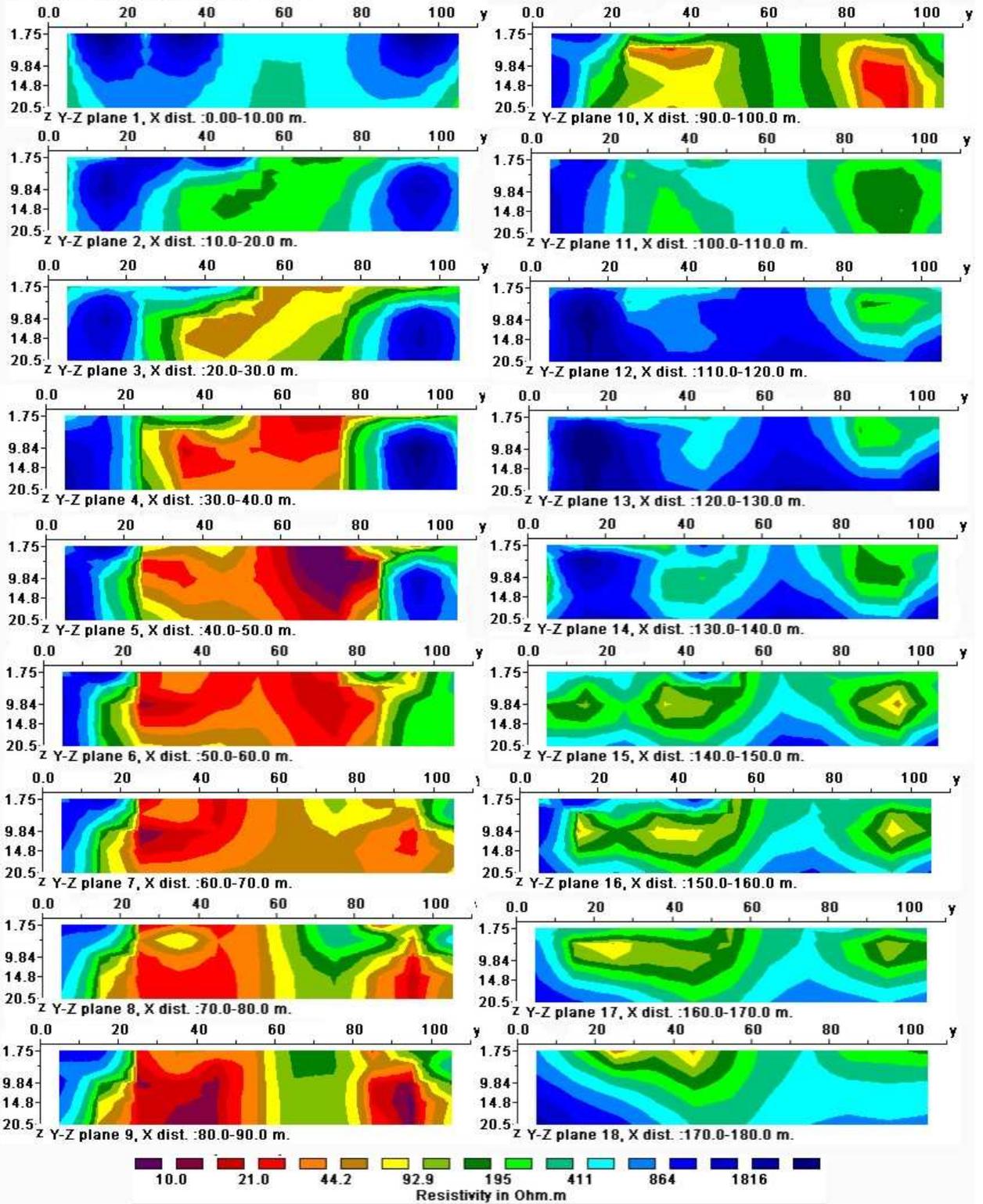


Figura 5.47 – Seções verticais em YZ – DADOS FILTRADOS.

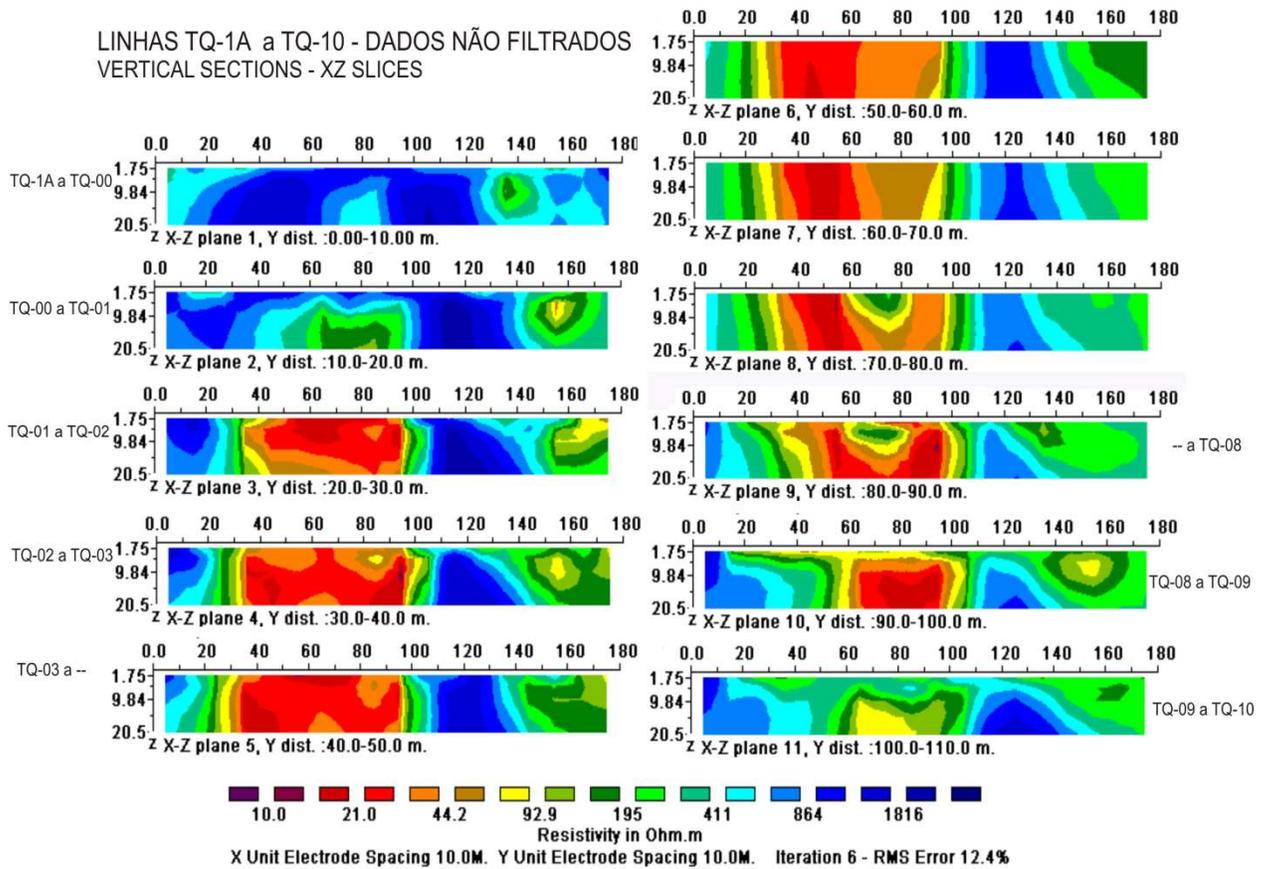


Figura 5.48 – Seções verticais em XZ – DADOS FILTRADOS.

5.2. ANÁLISES QUÍMICAS

Por serem muito extensos, os resultados das análises químicas são apresentados no “Anexo 2 – Resultados das Análises Químicas” e sua discussão pode ser acompanhada no capítulo seguinte. “Capítulo 7 – Discussão dos Resultados”.

CAPÍTULO 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. INTERPRETAÇÃO 2D

Os dados correspondentes às linhas TQ-1, TQ-2, TQ-3 e TQ-8 atravessam a área interna do tanque e marcam claramente a influência do resíduo (Figuras 5.9 a 5.24). Essa influência é sugerida pelos baixos valores de resistividade elétrica (entre 10 Ohm.m e 50 Ohm.m), que, como poderá ser observado mais adiante, possui uma assinatura distinta daquela observada fora do tanque. Vale ressaltar que aqui, quando se fala em assinatura, refere-se a um determinado intervalo de valores de resistividades, uma vez que o método não permite apontar com clareza o ponto exato de separação entre os diversos meios.

Nas linhas supracitadas, a parte interna do tanque está compreendida aproximadamente entre as posições 30 metros e 100 metros do eixo x e as anomalias de condutividade podem ser notadas em praticamente todas as profundidades (de 0 metros a 17 metros).

Os dados da linha TQ-0 indicam uma baixa influência da vinhaça, com valores entre 40 Ohm.m e 100 Ohm.m, a aproximadamente 15 metros de profundidade entre as posições 60 metros e 90 metros para os dados não filtrados (Figura 5.7). Para os dados filtrados, a anomalia é menos significativa, estando aproximadamente entre 80 metros e 90 metros no eixo x e com valores em torno de 90 Ohm.m (Figura 5.8).

A linha TQ-1A foi realizada 10 metros a montante da linha TQ-0 e apresenta baixa influência da vinhaça entre as posições 60 metros e 85 metros, para os dados não filtrados (Figura 5.2) e entre as posições 55 e 85 metros, para os dados filtrados (Figura 5.4). Para ambos os casos os valores de resistividade estão compreendidos entre 150 Ohm.m e 300 Ohm.m.

Os dados não filtrados da linha TQ-9 (Figura 5.26), localizada sobre a borda da cava, a jusante do tanque, mostram ainda forte influência do resíduo (valores de resistividade entre 20 Ohm.m e 50 Ohm.m), no entanto, a anomalia de condutividade se estende por uma área menor e em maior profundidade se comparado aos resultados obtidos em TQ-8. Nota-se que os valores de resistividade são menores em torno de 7 metros até 17 metros de profundidade.

A seção formada pelos dados filtrados da linha TQ-9 (Figura 5.27) possui essencialmente as mesmas características daquela formada pelos dados não filtrados com a diferença de que nesta, os valores filtrados originam formas mais suavizadas e a anomalia encontra-se mais centrada e com valores de resistividade entre 10 e 50 Ohm.m.

Os dados da linha TQ-10 ainda sugerem a influência do contaminante entre as posições 60 metros e 95 metros com uma região anômala em torno de 40 Ohm.m a aproximadamente 12 metros de profundidade para os dados não-filtrados (Figura 5.29). Para os dados filtrados, a região anômala se encontra entre as mesmas posições no eixo x, porém a área ocupada pelas anomalias com valores menores de resistividade é maior (Figura 5.30).

Os modelos de resistividade reais da linha TQ-8 são mostrados sob diferentes formas no “Capítulo 6 – Apresentação dos Dados”, segundo a filtragem ou não dos dados e pela presença ou não de “*outliers*”, como pode ser observado nas figuras 5.21 a 5.24. Os “*outliers*” podem ser caracterizados como dados que estão visivelmente errados, com valores de resistividade muito altos ou muito baixos se comparados aos dados vizinhos.

Por estas figuras pode-se constatar a significativa diferença entre as seções que contêm os chamados “*outliers*” e as seções em que esses dados foram excluídos. A geometria da pluma é significativamente diferente entre os modelos apresentados e a área com valores de resistividade mais baixos é menor para as seções não filtradas. Nas seções sem “*outliers*”, os valores dentro da área de influência da vinhaça (menores que 100 Ohm.m) são mais homogêneos tanto para as seções filtradas como para as não filtradas.

A seção sem “*outliers*” filtrada (Figura 5.24) apresenta traços mais suaves e menos porções de área excessivamente pequenas, que são notoriamente irreais em função do espaçamento entre eletrodos utilizado na aquisição dos dados.

O perfil TQ-CS, de 190 metros de extensão e topografia relativamente constante, não apresenta dados anômalos relevantes de baixa resistividade, sugerindo que não há mais influências significativas do contaminante (Figuras 5.32 e 5.33).

O perfil TQ-RD, de 300 metros de comprimento, foi feito seguindo a estrada de terra, próxima à TQ-BF. Esta linha, como TQ-CS, tem por finalidade delimitar a área de influência do resíduo, estabelecendo os contrastes de resistividade elétrica entre as zonas anômalas e não anômalas. As altas resistividades encontradas nesta linha, superiores, em grande parte, a 1000 Ohm.m, cumprem este objetivo (Figuras 5.38 e 5.39).

A linha TQ-BF corta todas as outras linhas e possui 220 metros de comprimento. Esta linha segue o final da borda lateral externa do tanque e acompanha o declive natural do terreno. Similarmente à linha TQ-10, os dados da linha TQ-BF sugerem uma influência do contaminante através de uma anomalia de condutividade (em torno de 50 Ohm.m) entre as posições 85 e 105 metros a aproximadamente 13 metros de profundidade para os dados não-filtrados e filtrados (Figuras 5.35 e 5.36).

Todas as linhas entre TQ-0 e TQ-10, incluindo a linha TQ-1A, apresentaram valores de resistividade entre 40 Ohm.m e 300 Ohm.m no canto superior direito, aproximadamente entre as posições 130 metros e 165 metros. Para os dados filtrados e não filtrados, as anomalias apresentam ligeira divergência de geometria, mas estão localizadas aproximadamente entre as mesmas posições no eixo x.

Essas anomalias de condutividade também podem ser atribuídas à vinhaça, uma vez que esta chegava ao tanque pelas curvas de nível do terreno.

A linha TQ-BF apresentou uma anomalia de condutividade com valores entre 50 Ohm.m e 100 Ohm.m entre as posições 180 metros e 200 metros em torno de 8 metros de profundidade. Esta anomalia possivelmente pode ser atribuída à área onde os caminhões costumavam ser abastecidos com vinhaça.

Em complemento a essas anomalias condutivas, ressalta-se a presença de valores menores de resistividade (entre 150 Ohm.m e 500 Ohm.m) no canto esquerdo da linha TQ-CS e no canto direito da linha TQ-RD, ponto de intersecção entre esses três perfis. Embora esses valores sejam bastante altos, ainda são significativamente menores que aqueles apresentados no resto dos três perfis mencionados.

A zona saturada e a base da área de influência da vinhaça não foram detectadas em nenhum dos ensaios.

Dentre os 11 perfis executados, sete apresentaram valores de RMS menores ou iguais para os dados filtrados frente aos não-filtrados; dois apresentaram valores RMS ligeiramente maiores para os dados filtrados e dois apresentaram valores RMS muito maiores para os filtrados.

Pela comparação entre as seções produzidas por dados filtrados e não filtrados é possível perceber ainda formas mais suaves para os dados filtrados e alguma diferença entre a área, a geometria e as posições ocupadas pelas anomalias.

Com exceção das linhas TQ-1 e TQ-2, os demais perfis apresentam picos mais angulosos para os dados não filtrados tanto para a seção de resistividades reais como para os gráficos das curvas de resistividades medidas e calculadas.

Se comparado aos dados não filtrados, a influência da vinhaça a partir do modelo construído com os dados filtrados tende a se alongar em profundidade e longitudinalmente, de forma que a área ocupada pela anomalia é maior. Logicamente, os valores de resistividade para os dados filtrados não são tão baixos quanto nos dados não-filtrados.

Para as linhas TQ-2 e TQ-3, a influência do vinhoto se alonga em profundidade para as seções a partir de dados não filtrados, e se alonga longitudinalmente para os dados filtrados.

Para as linhas não filtradas TQ-8 sem “*outliers*” e TQ-9, as anomalias de condutividade se estendem tanto em profundidade como longitudinalmente, e possuem valores significativamente mais baixos de resistividade se comparados com os modelos construídos a partir dos dados filtrados.

Como se sabe, o bom ajuste das curvas dos dados mensurados e calculados é importante, uma vez que está relacionado com a eficácia do programa em resolver o problema inverso. O bom ajuste pode ser facilmente notado pela proximidade/superposição das citadas curvas nos gráficos das figuras 5.3 e 5.5.

O ajuste entre as curvas de campo e as curvas calculadas nos últimos níveis (ou canais) de investigação apresenta um comportamento, na maior parte das vezes, menos satisfatório que nos níveis superiores. Uma explicação possível para essa diferença entre os ajustes dos níveis superiores e inferiores é a menor quantidade de dados nos últimos canais.

O ajuste entre os valores de resistividade calculados e mensurados dentro da cava, no entanto, é melhor para os dados filtrados mesmo nos perfis em que o erro RMS é maior. Sendo essa a região de maior relevância nesse estudo, considera-se que os dados filtrados apresentam melhores resultados.

De qualquer forma, mesmo com as diferenças existentes entre os dados filtrados e não filtrados, a influência da vinhaça excede os limites do tanque e se faz presente também na porção direita de todas as linhas que cortam a cava.

Os baixos valores de resistividade relacionados às zonas de influência da vinhaça podem ser atribuídos à grande quantidade de sais presentes no resíduo e à retenção de água em solo argiloso explicada pelas forças matriciais. Dentro do tanque, a quantidade de água retida é maior, já que

além de possuir maior concentração de material orgânico, o tanque ainda serve como captador de água de uma parte do assentamento, que chega até o tanque através das curvas de nível (da mesma forma que a vinhaça chegava até o tanque quando este ainda estava em uso). Esta última parte explica a diferença de umidade dentro e fora do tanque.

Os altos valores de resistividade encontrados nos perfis que cruzam o tanque e nas linhas TQ-CS e TQ-RD sugerem ausência da influência da vinhaça. Como o pacote de solo estudado é essencialmente composto por argila, não eram esperados valores tão altos de resistividade para as áreas sem influência da vinhaça.

É importante lembrar que os resultados apresentados aqui constituem apenas uma das possíveis soluções, uma vez que o problema inverso possui infinitas soluções plausíveis. Isso significa dizer que as seções de resistividade obtidas possuem coerência entre si e coerência com os dados observados em campo, no entanto, é apenas uma das soluções com sentido matemático e baixo erro RMS.

Neste contexto, as figuras 5.18 e 5.19 mostram outras possíveis soluções para o problema inverso. Tendo em vista os valores exageradamente altos de resistividade atribuídos a área sem influência da vinhaça, foram feitas novas inversões restringindo o intervalo de valores do modelo de resistividades.

Por não se tratar do foco deste trabalho e para que este não seja demasiadamente extenso, foi apresentada apenas uma linha com valores restringidos ao modelo de resistividades. Pela observação das figuras com e sem restrição de valores, pode-se perceber que a geometria da área de influência da vinhaça é fundamentalmente a mesma para os dois modelos.

Essa semelhança de geometria implica em duas observações importantes: nos dois casos apresentados (para modelos com e sem restrições) a influência da vinhaça ultrapassa os limites da cava; os altos valores de resistividade apresentados nos modelos sem restrição não significam que sejam de fato reais, uma vez que o modelo com valores restringidos apresentou valores significativamente mais baixos para a área sem influência do contaminante, e valores igualmente baixos de resistividade dentro do tanque, mantendo a coerência entre o conjunto de dados adquiridos na área de investigação.

Como resoluções matematicamente satisfatórias, obtiveram-se duas soluções coerentes com a realidade: em um dos casos, os valores de resistividade dentro do tanque são da ordem de 20 Ohm.m a 50 Ohm.m e os valores nas áreas não contaminadas são excessivamente altos,

excedendo 1500 ohm.m. No segundo caso, os valores de resistividade dentro e fora do tanque são significativamente menores com respeito ao caso anterior (10 Ohm.m dentro do tanque e valores em torno de 650 Ohm.m na parte não contaminada), mas ainda apresentam valores altos se comparados aos valores encontrados na literatura para argila.

Os valores encontrados para argila parecem demasiadamente altos, mas são bastante coerentes. Todas as linhas apresentaram o mesmo padrão de valores: resistividades altas nos locais sem influência da vinhaça e resistividades baixas dentro do tanque e nas zonas de influência do contaminante. Os altos valores de resistividade podem ser atribuídos a algumas possíveis explicações:

- Os altos valores encontrados nas bordas do tanque (entre as posições 100 metros e 120 metros) podem ser atribuídos a uma possível compactação abaixo do teor ótimo de umidade, conforme explicado no “Capítulo 02 – Revisão Bibliográfica”.

- Os altos valores encontrados fora das bordas do tanque, em especial nas linhas TQ-CS e TQ-RD podem ser atribuídos a um solo argiloso seco, e sem compactação, onde o espaço preenchido com ar, que separa os sedimentos, é suficiente para que não ocorra condução de corrente entre as partículas.

As seções apresentadas possuem coerência matemática, são racionais dentro do conjunto de dados adquiridos e se adéquam às percepções de campo e aos conhecimentos que se detêm da área, além de enfatizar as múltiplas soluções possíveis inerentes aos métodos indiretos. Dessa forma, mesmo com soluções ambíguas quanto aos altos valores de resistividade, as seções permitem mapear e monitorar a influência do contaminante.

6.2. INTERPRETAÇÃO 3D

As diferenças entre as seções horizontais oriundas dos dados filtrados e não filtrados são mais aparentes a partir da segunda camada, como pode ser observada nas figuras 5.41 e 5.45. A partir dessas figuras observa-se também que, nas duas últimas camadas, os dados não filtrados são mais suaves.

No caso das seções horizontais, os dados não-filtrados parecem produzir resultados mais apreciáveis, uma vez que as seções são mais suaves, as pequenas porções de distintos valores de

resistividade (notoriamente irreais pelo espaçamento entre eletrodos) são menores. Outro aspecto importante é que, nas seções construídas a partir dos dados filtrados, é marcante a presença de dados significativamente baixos e altos na zona de interpolação entre as linhas TQ-3 e TQ-8, onde não há dados reais, a mesma não ocorre para as seções produzidas a partir de dados não-filtrados.

Quanto à contaminação, segundo as seções horizontais 3D, o sentido do fluxo contaminante pode ser observado nas figuras 5.42 e 5.46, e é maior no sentido sudeste e sudoeste, e menos expressivo no sentido noroeste.

Os limites do tanque são extrapolados e a zona de influência do resíduo é maior com a profundidade tanto para os dados filtrados como para os dados não filtrados. No sentido sudeste, a zona de influência mais intensa, com valores entre 20 e 50 Ohm.m, se estende por pelo menos 20 metros além do limite interior do tanque e permitem estimar que o volume de influência da vinhaça, considerando valores de resistividade até 100 Ohm.m , é superior a 90 000 m³.

No sentido sudoeste a influência do contaminante é maior nas camadas superiores, tendo a maior área extrapolada nas seções 3 e 4. A área extrapolada é relativamente maior para os dados filtrados, se estendendo por aproximadamente 7 metros além dos limites da cava com valores de resistividade em torno de 50 Ohm.m. Para os dados não filtrados, a área de extrapolação com valores de resistividade em torno de 50 Ohm.m é muito pequena, predominando uma faixa de aproximadamente 5 metros com valores em torno de 90 Ohm.m.

Para os dados não filtrados, a influência do contaminante no sentido noroeste é muito baixa, mas para os dados filtrados essa influência é bastante significativa, se estendendo por aproximadamente 5 metros além do tanque nas camadas 4 e 5, com valores de resistividade em torno de 90 Ohm.m na camada 4 e entre 50 Ohm.m e 90 Ohm.m para a camada 5.

Quanto às anomalias presentes no lado direito das seções horizontais, nota-se que os menores valores de resistividade são apresentados nas camadas 1, 2 e 3. A camada 3 , em especial para dados filtrados, possui a maior região anômala com valores em torno de 90 Ohm.m. Nesse caso, a influência da zona condutiva decresce com a profundidade.

As seções verticais em XZ e em YZ podem ser observadas nas figuras 5.43, 5.44, 5.47 e 5.48 e permitem visualizar as variações laterais com maior clareza.

As seções em XZ apresentam o intervalo de linhas que representam em uma caixa de texto ao lado de cada seção. As seções entre 40 metros e 90 metros (posições das linhas TQ-3 e TQ-8,

respectivamente) não representam dados reais, sendo apenas uma interpolação das demais linhas, e portanto, não são dados confiáveis.

Para a apresentação dos dados em XZ, percebe-se que o intervalo espacial entre 30 metros e 100 metros do eixo X das seções dos dados não filtrados, que corresponde aproximadamente a posição do tanque, apresenta valores de resistividade mais baixos e homogêneos.

Nesse tipo de representação dos dados também se vê que a contaminação extrapola a marca dos 30 metros (posição inicial do tanque) para os planos 4, 5 e 6, dentre os quais somente o plano 6 não possui dados reais.

6.3. ANÁLISES QUÍMICAS

As amostras de solo foram coletadas dentro do tanque, sobre a linha TQ-3, onde a condutividade era alta; sobre a linha TQ-CS, onde os valores de resistividade eram elevados, e no final da linha TQ-3, onde os valores de resistividade superficiais variavam entre 100 Ohm.m e 200 Ohm.m.

Como as análises químicas (Anexo 2- Resultado das Análises Químicas) apresentam valores com concentrações praticamente idênticas nas amostras realizadas dentro da cava com relação àquelas realizadas em TQ-CS e considerando-se o contraste apresentado pela geofísica, elas foram desconsideradas neste trabalho, sugerindo a necessidade de outros métodos de análise.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

O método da eletrorresistividade mostrou-se adequado para detectar e mapear a influência da vinhaça no solo.

Os levantamentos eletrorresistivos, tanto nos modelos de resistividades oriundos de dados filtrados, quanto de dados não filtrados ou com valores de resistividade restringidos mostraram um aumento da condutividade elétrica dentro da área do antigo tanque de disposição de vinhoto e a zona de influência do resíduo, bem como altos valores de resistividade para as zonas sem influência da vinhaça.

A influência da vinhaça pode ser caracterizada por baixos valores de resistividade entre 10 Ohm.m e 90 Ohm.m.

Os baixos valores de resistividade encontrados dentro do tanque podem ser atribuídos à influência dos sais presentes na vinhaça e à retenção de água em solo argiloso intensificada pelas forças matriciais e pela grande quantidade de matéria orgânica presente no contaminante. Em contrapartida, os altos valores de resistividade sugerem ausência de influência do contaminante e podem ser atribuídos à argila seca.

As linhas TQ-1, TQ-2, TQ-3, TQ-8, TQ-9 mostraram grande influência da vinhaça no solo, permitindo mapeá-la e permitindo também comprovar a eficiência do método por comparação/contraste com as áreas não contaminadas (TQ-CS e TQ-RD).

Na análise 2D, as linhas TQ-10 e TQ-BF sugeriram grande influência da cava na contaminação do solo e permitiram concluir que a contaminação extrapola os limites do tanque; a linha TQ-1A sugeriu baixa influência do resíduo no último nível de investigação.

As linhas TQ-CS e TQ-RD não apontaram anomalias significativas de baixa resistividade no solo e permitiram delimitar a zona de influência do contaminante.

A linha TQ-BF sugere uma influência da vinhaça ocasionada, possivelmente, pela antiga área de abastecimento dos caminhões com o resíduo oriundo do tanque, a posição do perfil onde se encontra esta anomalia de condutividade sugere que a área a jusante de TQ-10 também possa apresentar anomalias de condutividade. Nestes termos, sugere-se, para estudos posteriores na área, a realização de perfis elétricos que englobem também esta região.

As seções de resistividade alcançaram aproximadamente 17 metros de profundidade e não detectaram a base da área de influência do contaminante, sugerindo profundidades superiores a esta.

As seções horizontais e verticais 3D permitem avaliar com maior clareza a influência do contaminante na resistividade elétrica da subsuperfície e, tanto para as seções produzidas a partir dos dados filtrados como para não filtrados, exibem um fluxo contaminante significativo nas direções sudeste e sudoeste e menos intenso na direção noroeste.

Tendo em vista as seções horizontais obtidas, aconselha-se a realização de ensaios geofísicos com maior espaçamento entre eletrodos em estudos futuros visando detectar a profundidade total da zona de influência da vinhaça.

Aconselha-se também a utilização de outros métodos geofísicos que possam complementar os resultados obtidos como a sísmica de refração e a magnetometria.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Hassanein, Z.S.; Benson, C.H.; Blotz, L.R. 1996. Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 397-406.
- Ahmed, A.M.; Sulaiman, W.N. 2001. Evaluation of groundwater and soil pollution in a landfill area using electrical resistivity imaging survey. *Environment Management*, **28**:5:655-663.
- Aristodemou, E.; Thomas-Betts, A. 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, **44**:275-302.
- Bernstone, C.; Dahlin, T.; Ohlsson, T.; Hogland, W. 2000. DC – resistivity mapping of internal landfill structures: two pre- excavations surveys. *Environmental Geology*, **39**:3-4.
- Brito, F.L.; Rolim, M.M.; Silva, J.A.A.; Pedrosa, E.M.R. 2007. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **11**:3:318-323.
- Cabrini, M.F.; Marjotta-Maistro, M.C. 2007. Mercado internacional de álcool: os recentes programas de uso do produto como combustível. *Agroanalysis*, p36.
- Cavalcante, A.T.; Barros, C.M.R.; Wanderley, P.R.M.; Santos, R.C.; Santos, R.Q. 1994. Impactos ambientais sobre os aquíferos na Grande Maceió – AL. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8., Recife, 1994. Anais. Recife: ABAS, p. 190-199.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2004. Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001 – 2003. São Paulo Série Relatórios/CETESB.
- Cunha, L.F.J. 2005. Mapeamento da pluma de contaminação em depósitos de resíduos da indústria de couro, através de métodos geofísicos – dois casos em Mato Grosso. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, 118p.
- DER/SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. 2006. Duplicação e melhoramentos da pista existente da Rodovia SP-333 – Abrão Assed, do km 33,800 ao km 54,800, entre os Municípios de Ribeirão Preto e Serrana. Relatório Ambiental Preliminar –

- RAP, 2006. Disponível em: <www.cmdca.ribeiraopreto.sp.gov.br/splan/comdema/aero/abraoassed.pdf>. Acesso em: 25/06/07.
- Edwards, L. S. 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, **42**:3:1020–1036.
- Elis, V.R.; Zuquette L.V. 1998. Aplicação de técnicas geofísicas no estudo de área de disposição de resíduos urbanos. *Revista Geotecnia*. Lisboa – Portugal, **84**:5-22.
- Fachin, S.J.S. 2007. Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP – SP, 165pp.
- Ferreira Neto, J.V.; Santos, R.J.Q.; Wanderley, P.R.B.; Wanderley, P.R.M.; Cavalcante, A.T. 2000. Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas em área do Tabuleiro do Martins – Maceió – Alagoas – BR. In: Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, 1. e Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 11., Fortaleza: ABAS/AHLSUD/IAH.
- Freire, W. J. 2000. Vinhaça de Cana-de-açúcar. *Série Engenharia Agrícola*, vol 1.
- Gallas, D.F.; Taioli, F.; Silva, S.M.C.P.; Coelho, O.G.W.; Paim, P.S.G. 2005. Contaminação por choroume e sua detecção por resistividade. *RBGF* **23**:1: 51-59.
- Geotomo Software. 2003. RES2DINV ver.3.53 for Windows 98/Me/2000/NT/XP– Rapid 2-D resistivity & IP Inversion using the least-squares method. Disponível em: www.geoelectrical.com. Acesso em: 29/06/07.
- Geotomo Software.2007. RES3DINV ver.2.16 for Windows 98/Me/2000/NT/XP- Rapid 3-D resistivity & IP Inversion using the least-squares method. Disponível em: www.geoelectrical.com. Acesso em: 29/06/07.
- Gloeden,E. 1994. Monitoramento da qualidade da água das zonas não-saturada e saturada em área de fertirrigação com vinhaça. Tese de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo (USP).
- Glória, N.A.; Orlando Filho, J. 1983. Aplicação de Vinhaça como Fertilizante. São Paulo: *Coopersucar*. 38p.
- Golden Software INC. 2006. Surfer 8.0 for Windows. *User guide*. 340p.
- Gómez, J.; Rodríguez, O. 2000. Effects of vinasse sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. **17**:318-326.

- Gunkel, G.; Komol, J.; Sobral, M.; Rohm, H.; Montenegro, S.; Aureliano, J. 2006. Sugar cane industry as a source of water pollution – case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. *Water Air Soil Pollut.* DOI 10.1007/S11 70-006-9268-X.
- Hassuda, S. 1989. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no Aquífero Bauru. São Paulo. 1989. Tese de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- Iakubovskii, Iu. V.; Liajov, L.L. 1980. Exploración eléctrica. Edição original em língua russa publicada por Editorial Nedra, Moscú, 3ª edição, 1980.
- IRIS Instruments. 1993. Syscal R2 operating manual. Revised 9.3.
- Keller, G.V.; Frischknecht, F.C. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. international series of monographs in electromagnetic waves. Pergamon Press, first edition Vol.10. 519p.
- Koefoed, O. 1979. Geosounding principles, 1 – resistivity sounding measurements. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 276p.
- Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies – A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Disponível em: www.geoelectrical.com. Acesso em: 29/06/07.
- Loke, M.H. 2002. The Use of Constraints in 2D and 3D Resistivity Modeling. 8th EEGS-ES Meeting, Portugal. Disponível em: www.geoelectrical.com. Acesso em: 29/06/07.
- Loke, M.H.; Barker, R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**: 131-152.
- Loke, M.H.; Dahlin, T. 2002. A comparison of Gauss-Newton and Quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*. **49**: 149-162.
- Longo, R.M., 1994. Efeito da vinhaça in natura e biodigerida em propriedades de um solo cultivado com cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- Ludovice, M.T.F. 1997. Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre lençol freático. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- Lyra, M.R.C.C.; Rolim, M.M.; Silva, J.A.A.; Oliveira, L.A.A.; Souza, L.F.C.; Cristovam, M.J.; Queiroga, G.M. 2003 a. Avaliação da qualidade de água de lençol freático em uma área

- fertirrigada com vinhaça. In: *22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Joinville, Santa Catarina, Brazil. Disponível em: < <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/abes22/dii.pdf>>. Acesso em 10/10/2005.
- Lyra, M.R.C.C; Rolim, M.M.; Silva, J.A.A. 2003 b. topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **7**:3:525-532. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG – Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em 10/10/2005.
- Macedo, I.C. 2007. Situação atual e perspectivas do etanol. *Estudos Avançados*, **21**:59.
- Marjotta-Maistro, M.C. 2002. Ajustes nos mercados de álcool e gasolina no processo de desregulamentação. Tese (Doutorado em Ciências). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 180p.
- McNeill, J.D. 1980. Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Technical Note TN-5. Geonics Limited.
- Meju, M.A. 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics* **44**:115-150.
- Mendes, J.M.B. 1987. Técnica geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade de São Paulo (USP).
- Moura, H.P.; Malagutti Filho, W. 2003. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro – SP. UNESP, *Geociências*, **22**: n. Especial:129-139.
- Nascimento, C.L. 2003. Avaliação econômica do aproveitamento do vinhoto concentrado como fertilizante. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia). Universidade Estadual do Norte Fluminense. 87p.
- Orellana, E. 1982. Prospección geoeléctrica en corriente continua. Ed Paraninfo, 2ed. 576p.
- Parasnis, D.S. 1978. Principles of applied geophysics. Third edition , Chapman and Hall, New York, 275p.
- Parkhomenko, E. 1967. Electrical properties of rocks. Translated from russian:, G. V. Keller, translator, ed., Plenum Press, New York, N.Y., 314p.

- Pereira, J.P.; Alvarenga, E.M.; Tostes, J.R.RP.; Fontes, L.E.F. 1992. Efeito da adição de diferentes dosagens de vinhaça a um solo vermelho-amarelo distrófico na germinação e vigor de sementes de milho. *Revista Brasileira de Sementes*, **14**:2:147-150.
- Prada, S.M.; Guekezian, M.; Encarnación, Suárez-IhA, M.E.V. 1998. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. *Química Nova*, **21**:3.
- Reynolds, J.M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. Ed. John Wiley and Sons. 796p.
- Rodella, A.A.; Ferrari, S.E. 1977. A composição da vinhaça e efeitos de sua aplicação como fertilizante na cana-de-açúcar. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, **90**:1:380-389.
- Sheriff, R.E. 1989. Geophysical methods. Prentice Hall, New Jersey, 605p.
- Simabuco, S.M. 1993. Emprego da Fluorescência de Raios X por dispersão de energia no estudo da dinâmica da vinhaça. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 133p.
- Takeshita, E.V. 2006. Adulteração da gasolina por adição de solventes: análise dos parâmetros físico-químicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. 113p.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E., 1990. Applied geophysics. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.
- UNICA - União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. 2007. Produção e uso do etanol combustível no Brasil. Respostas às questões mais frequentes. São Paulo. 70p.
- Van Dam, R. L. 2001. Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment. Amsterdam: Vrije Universiteit, Faculty of Earth Sciences, Doctoral Thesis, 110p.
- Vogelsang, D. 1995. Environmental geophysics – A practical guide. Springer-Verlag, New York, 173p.

ANEXO 1 – PSEUDOSEÇÕES DE RESISTIVIDADES APARENTES E MODELO DE RESISTIVIDADES REAIS SEM TOPOGRAFIA

PERFIL TQ-1A

DADOS NÃO FILTRADOS

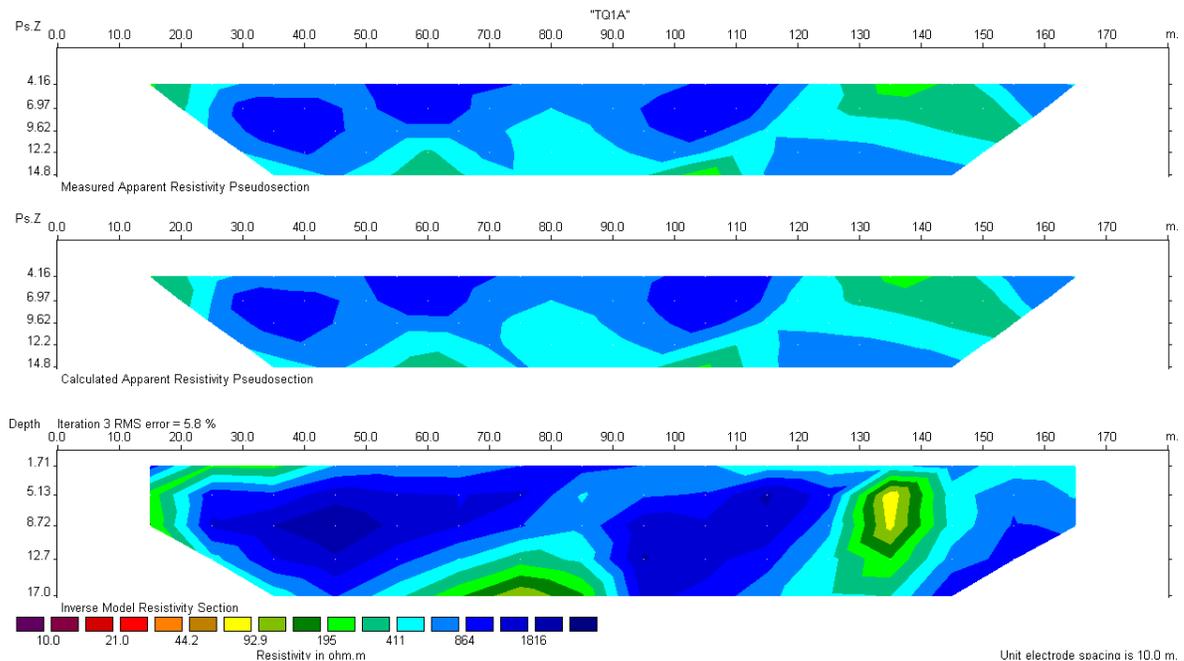


Figura A1.1 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1A para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

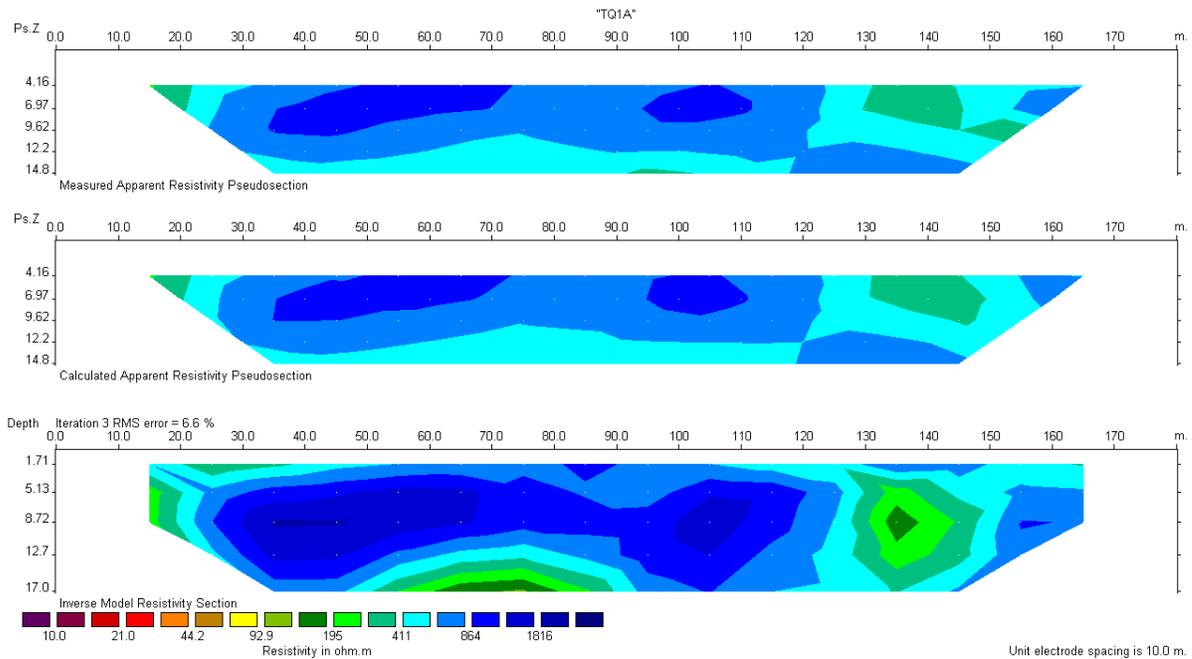


Figura A1.2 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1A para dados filtrados.

PERFIL TQ-0

DADOS NÃO FILTRADOS

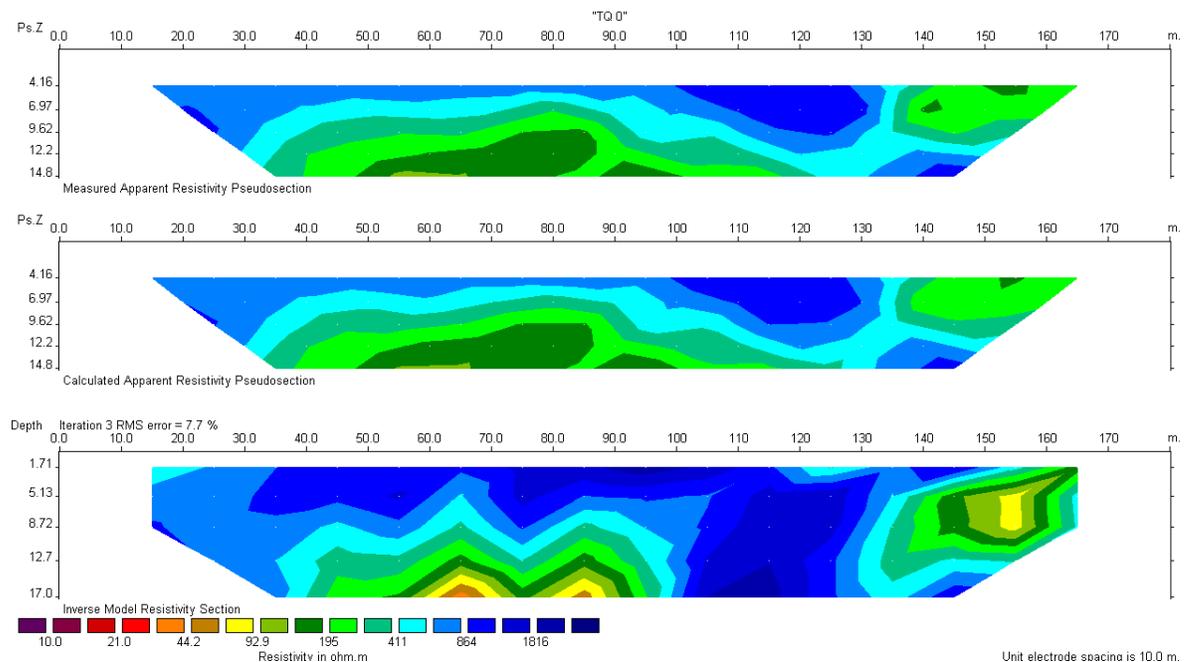


Figura A1.3 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-0 para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

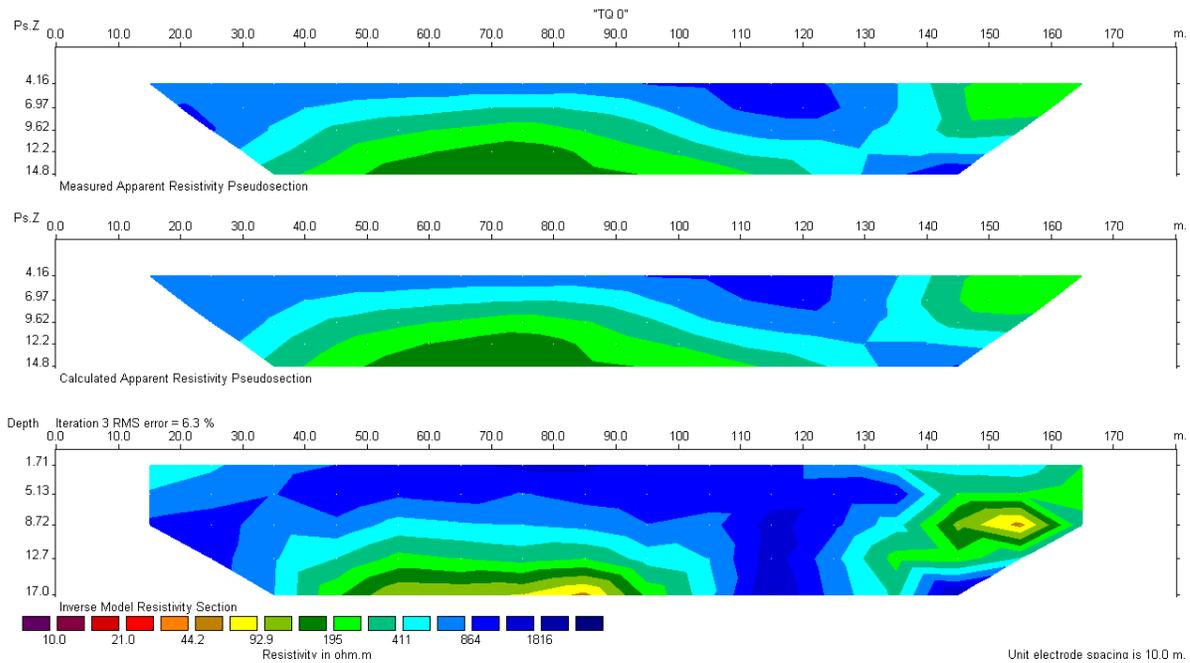


Figura A1.4 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-0 para dados filtrados.

PERFIL TQ-1

DADOS NÃO FILTRADOS

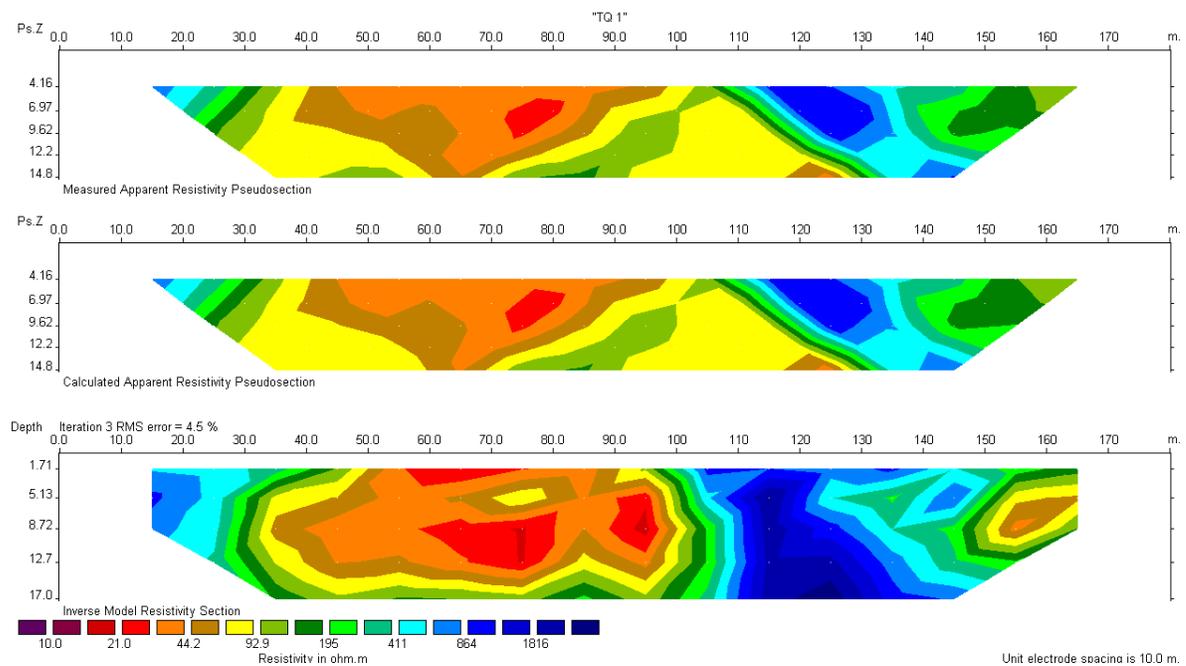


Figura A1.5 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1 para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

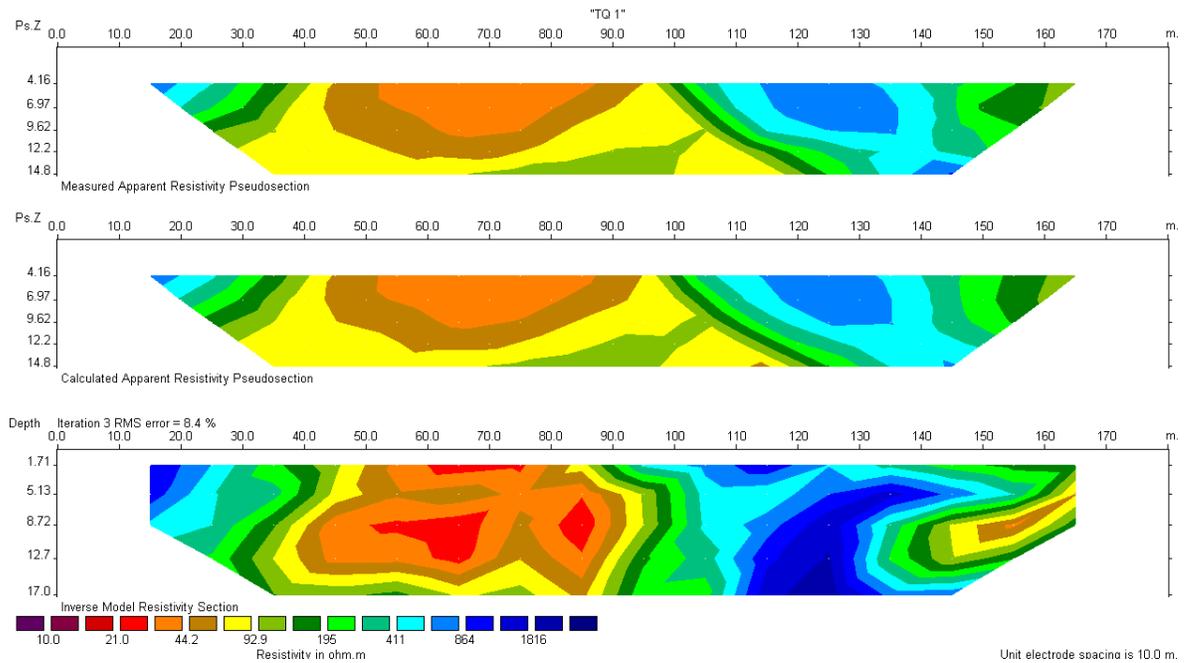


Figura A1.6 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-1 para dados filtrados.

PERFIL TQ-2

DADOS NÃO FILTRADOS

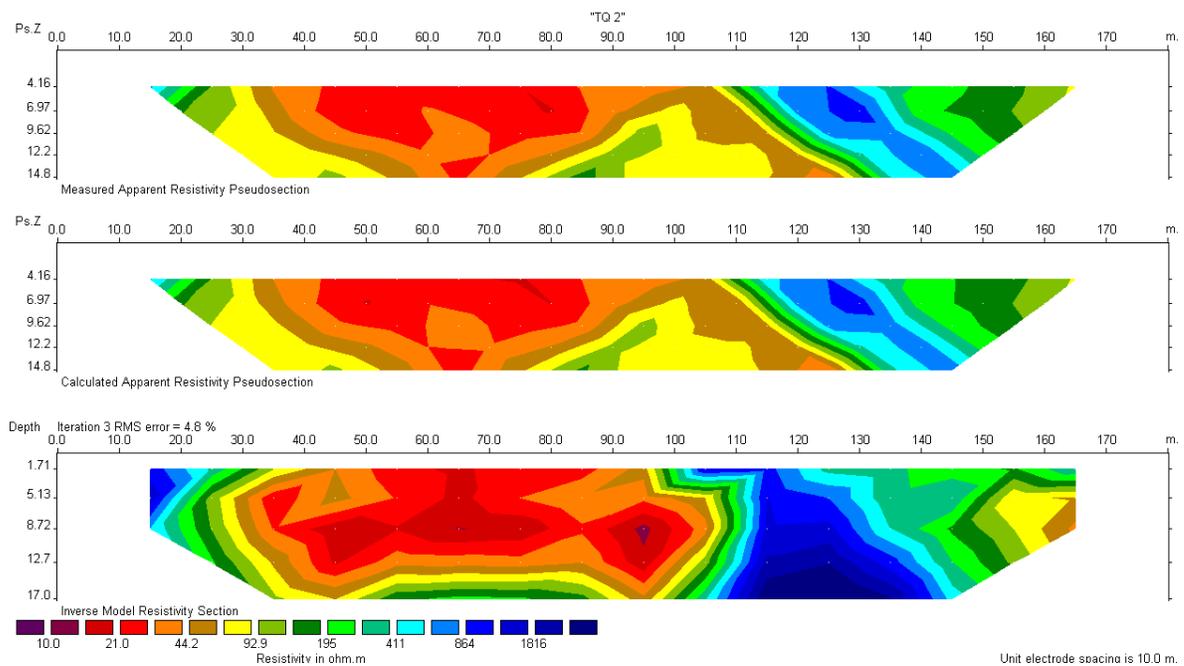


Figura A1.7- Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-2 para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

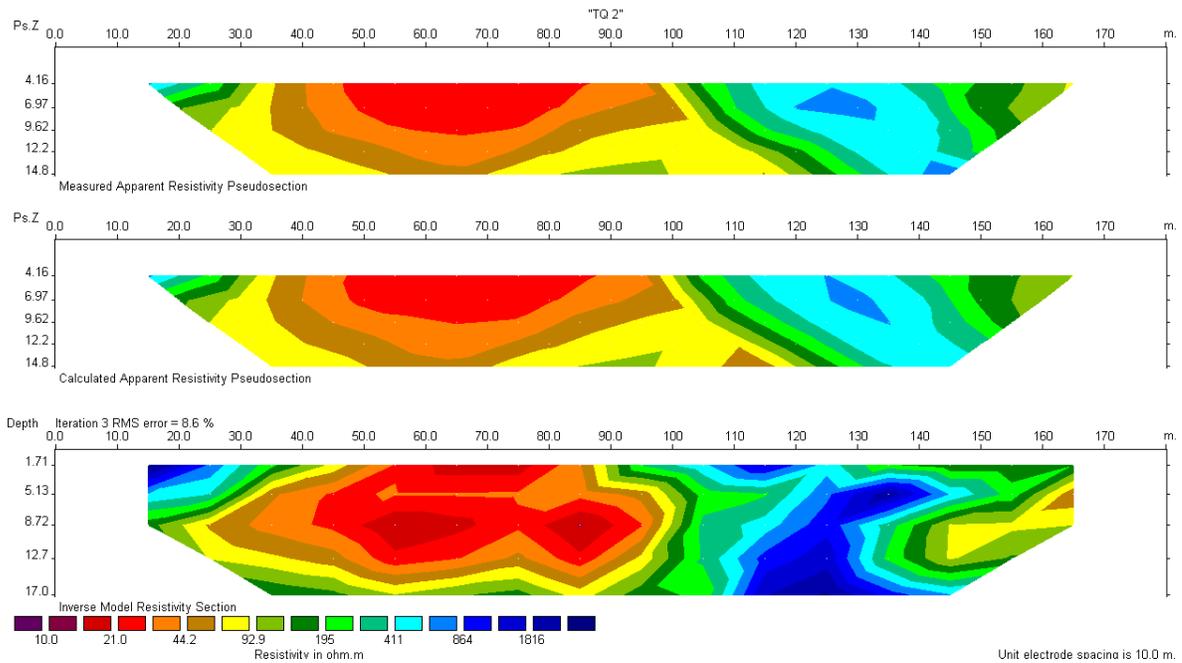


Figura A1.8 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-2 para dados filtrados.

PERFIL TQ-3

DADOS NÃO FILTRADOS

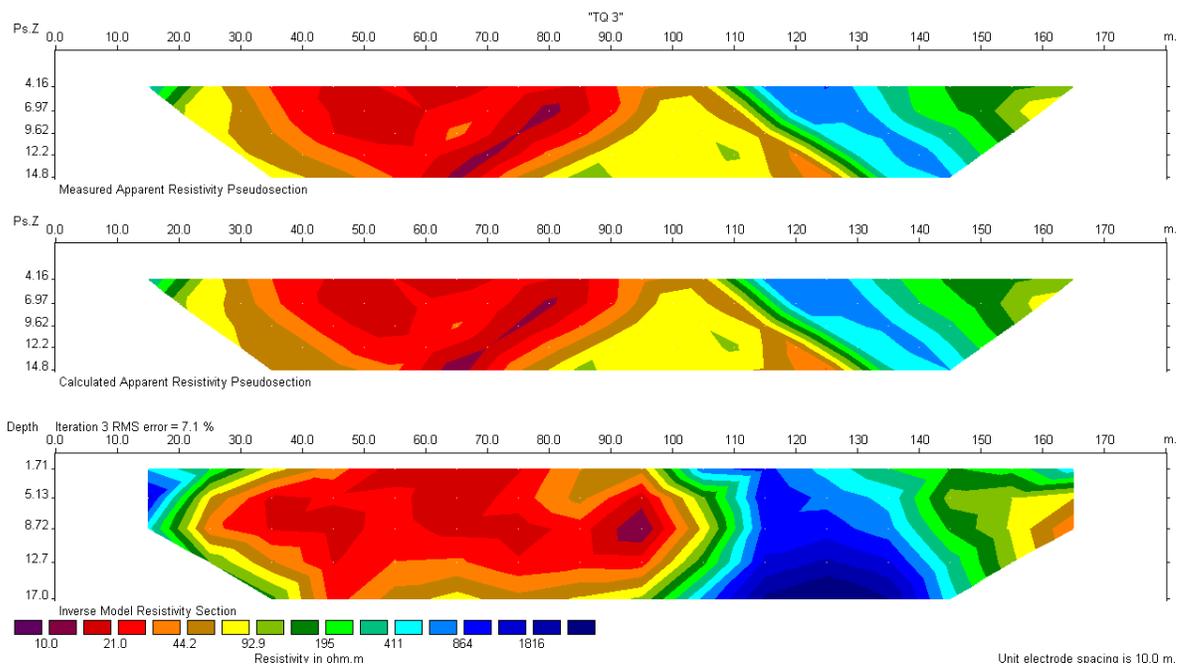


Figura A1.9 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-3 para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

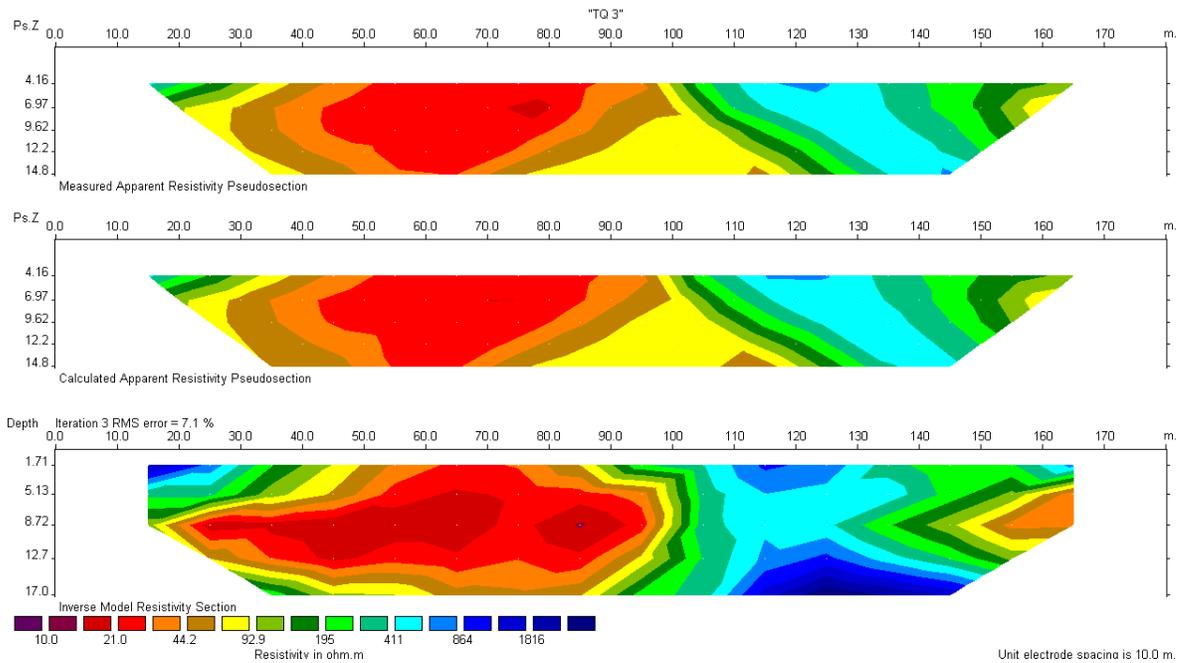


Figura A1.10 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-3 para dados filtrados.

PERFIL TQ-8

DADOS NÃO FILTRADOS

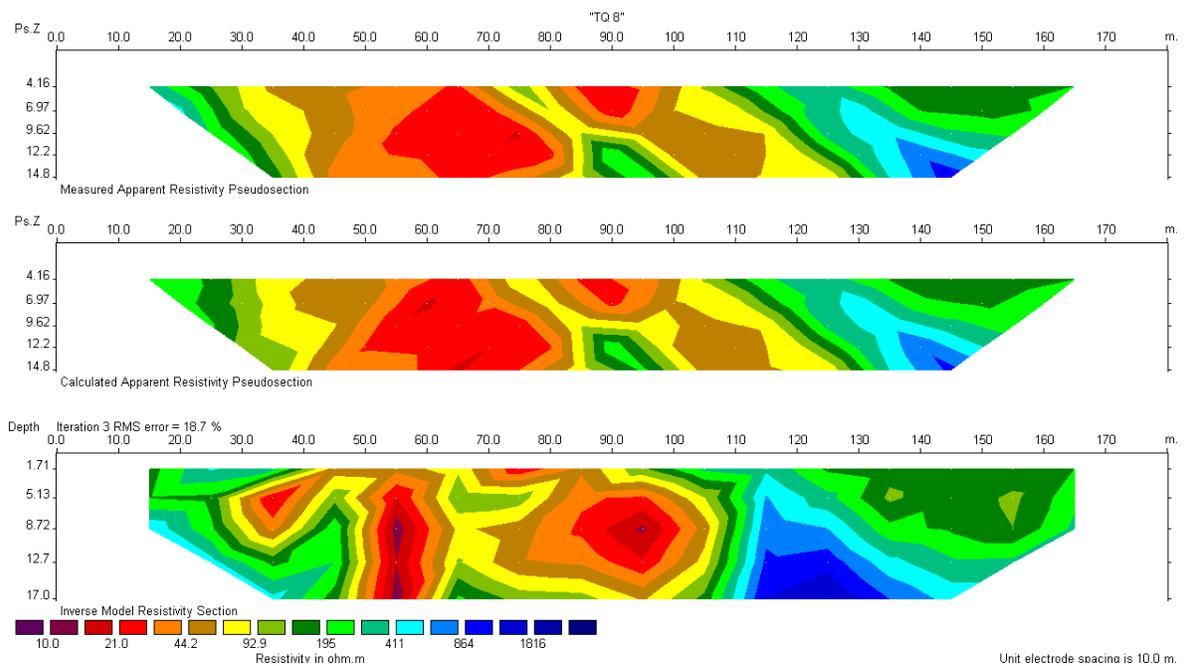


Figura A1.11 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados não filtrados.

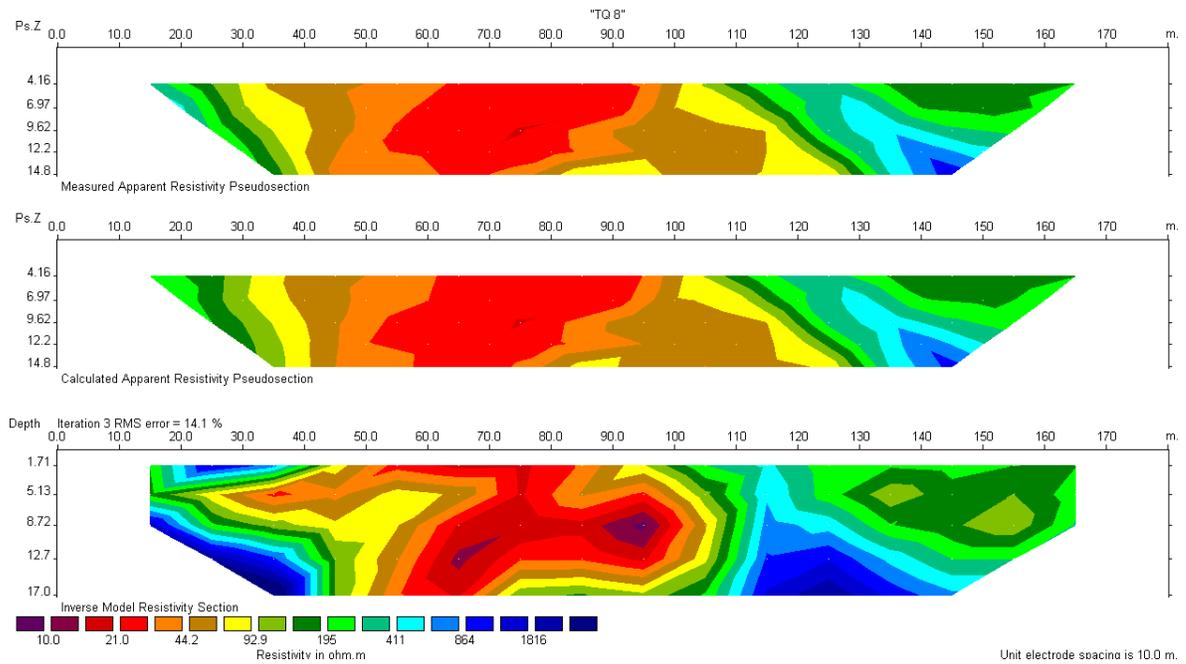


Figura A1.12 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados não filtrados e sem “outliers”.

DADOS FILTRADOS

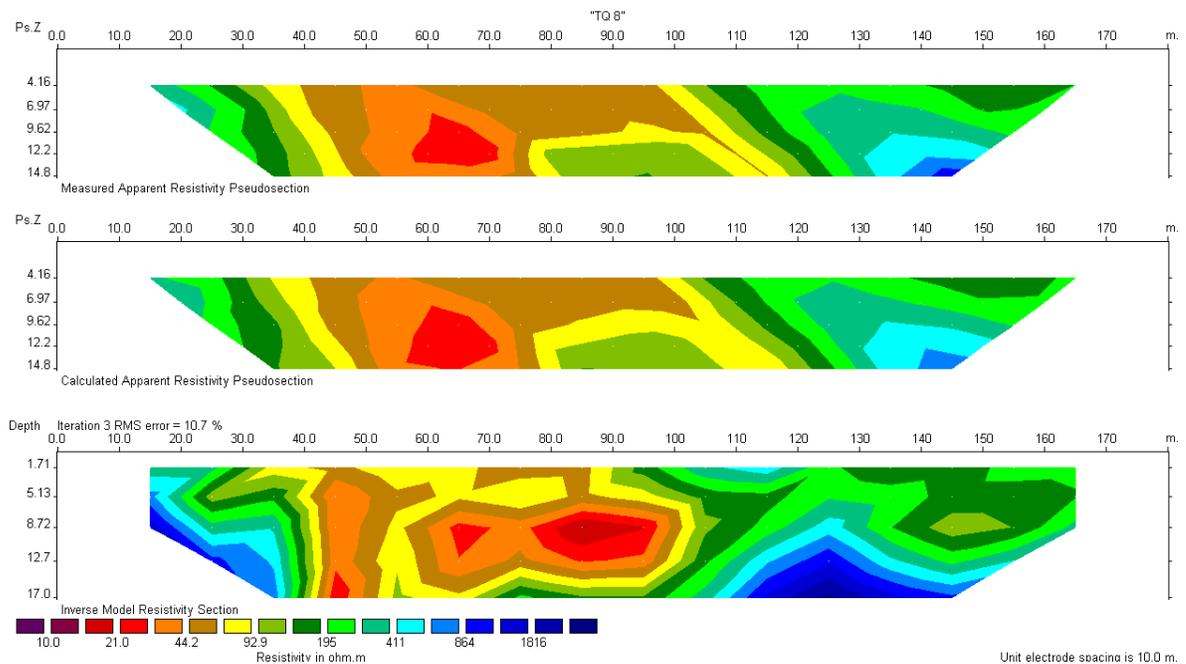


Figura A1.13 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados filtrados.

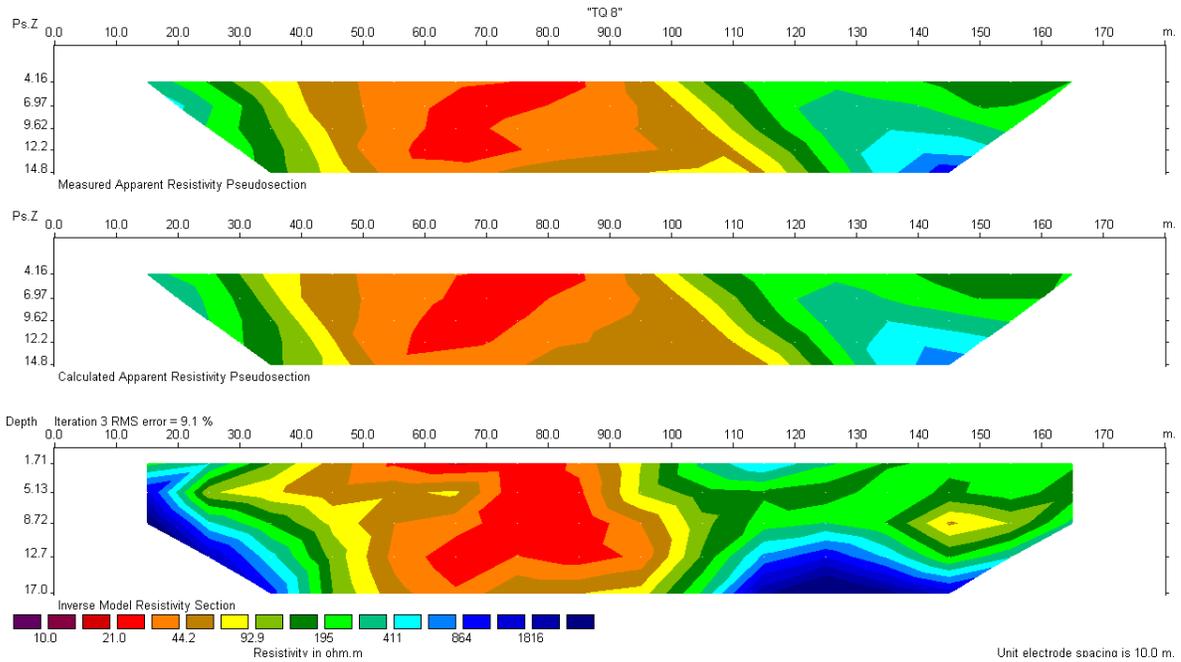


Figura A1.14 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-8 para dados filtrados e sem “outliers”.

PERFIL TQ-9

DADOS NÃO FILTRADOS

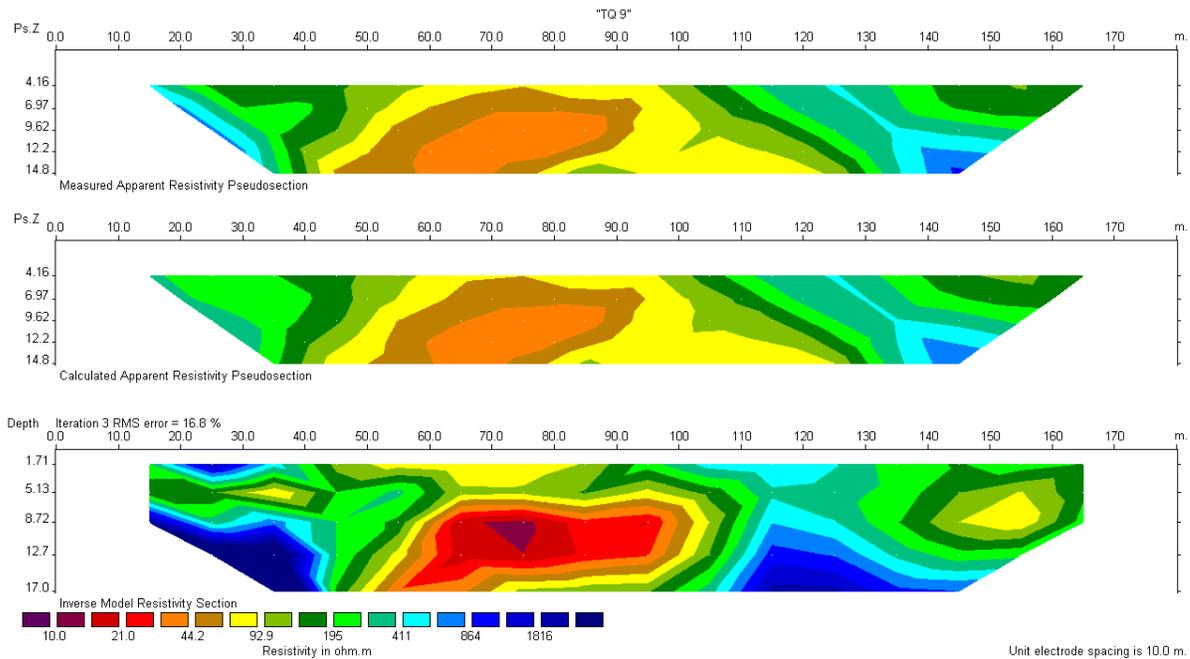


Figura A1.15- Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-9 para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

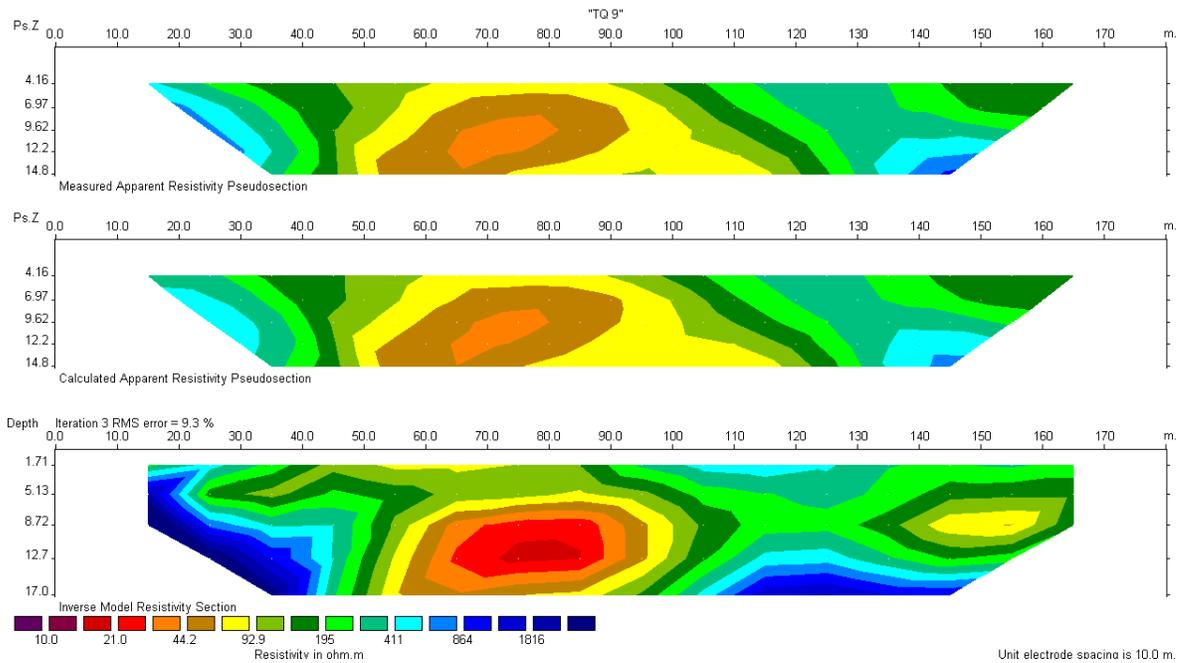


Figura A1.16 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-9 para dados filtrados.

PERFIL TQ-10

DADOS NÃO FILTRADOS

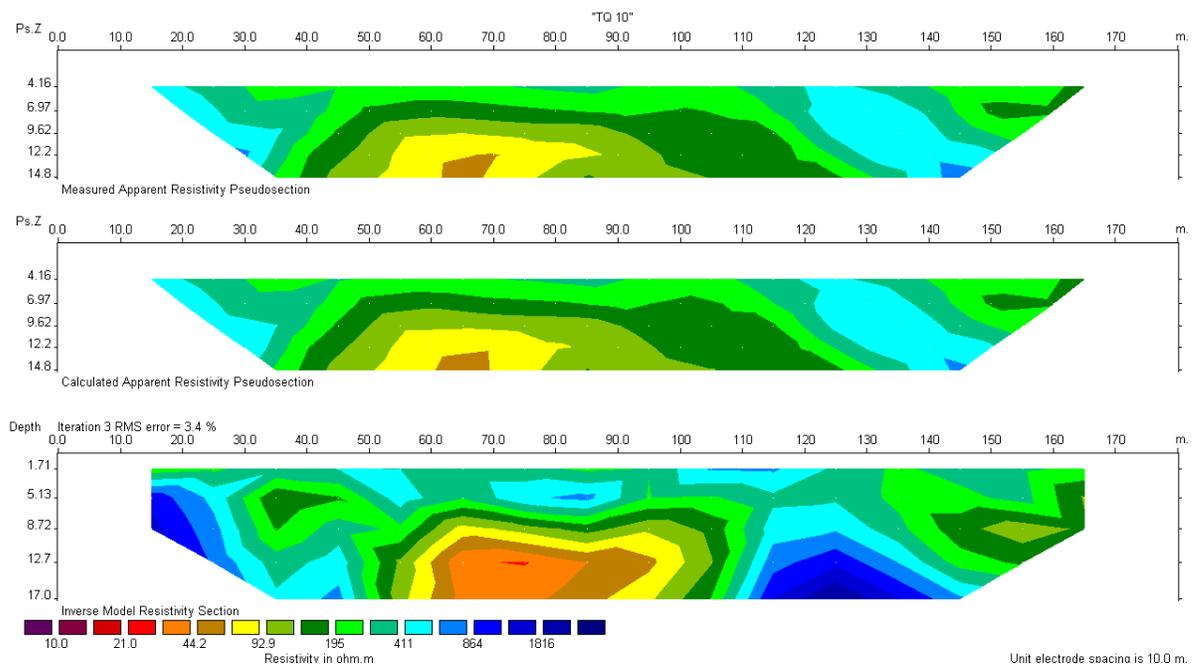


Figura A1.17 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-10 para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

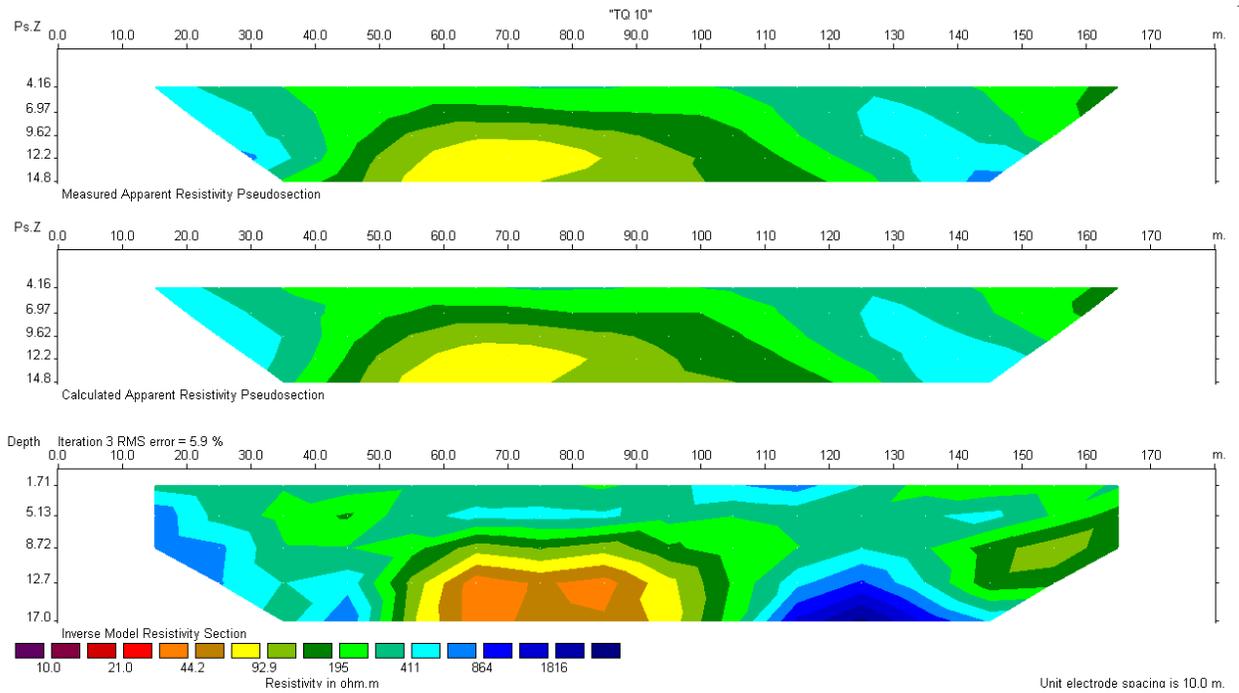


Figura A1.18 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-10 para dados filtrados.

PERFIL TQ-CS

DADOS NÃO FILTRADOS

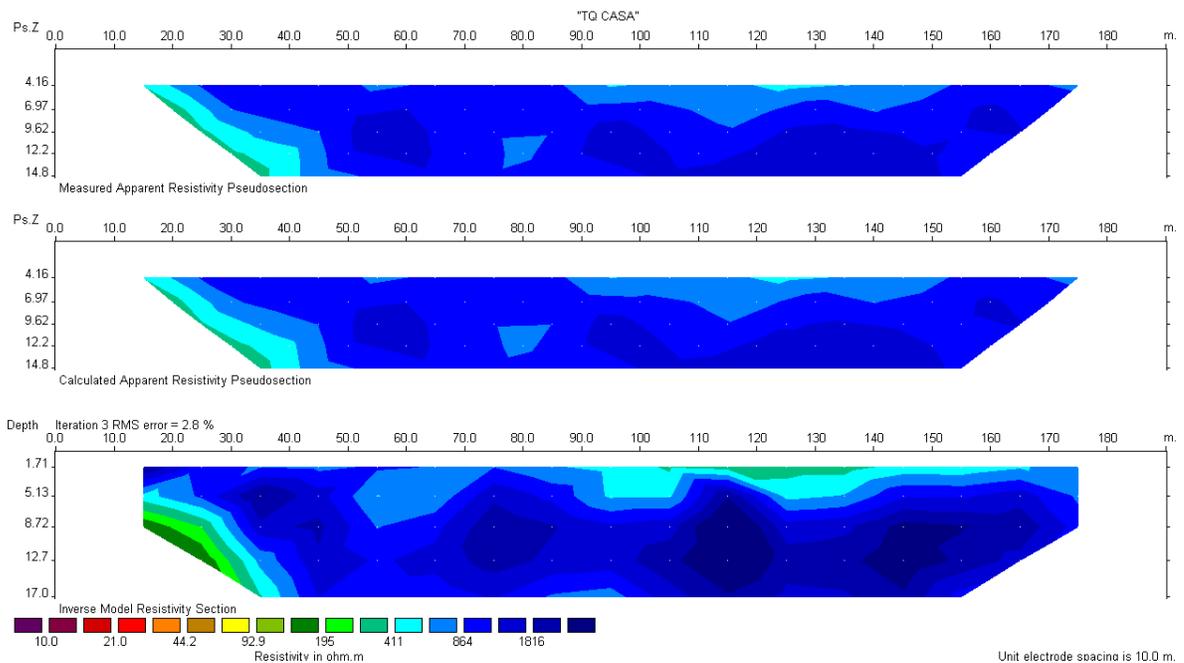


Figura A1.19 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-CS para dados não filtrados.

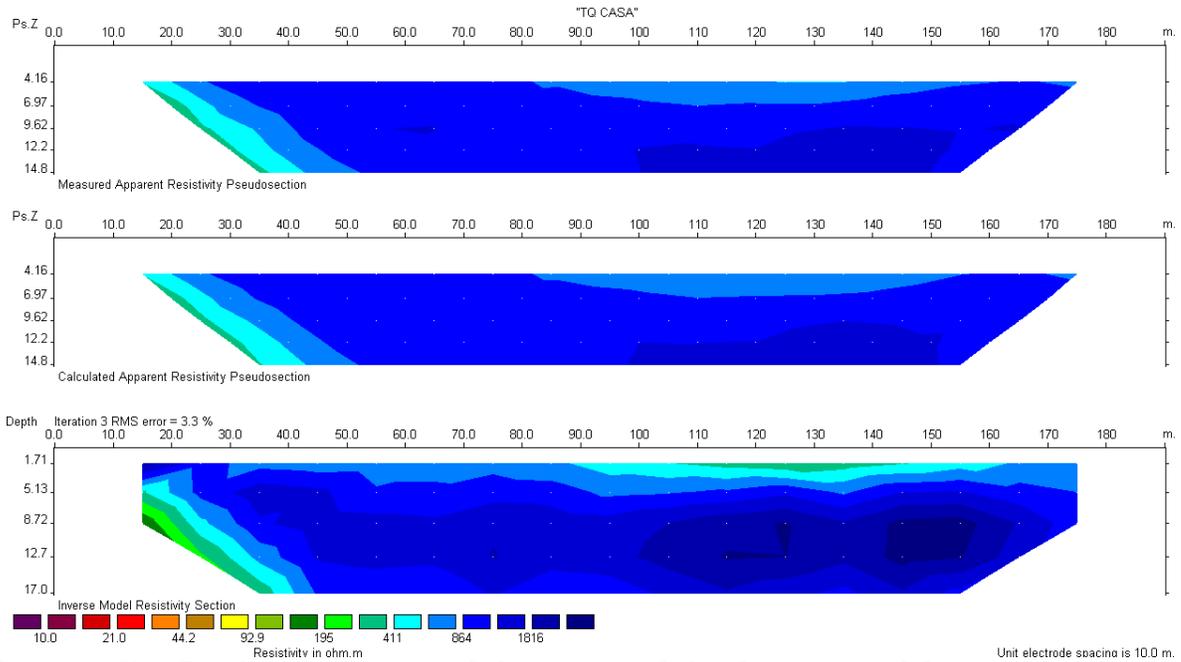


Figura A1.20 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-CS para dados filtrados.

PERFIL TQ-BF

DADOS NÃO FILTRADOS

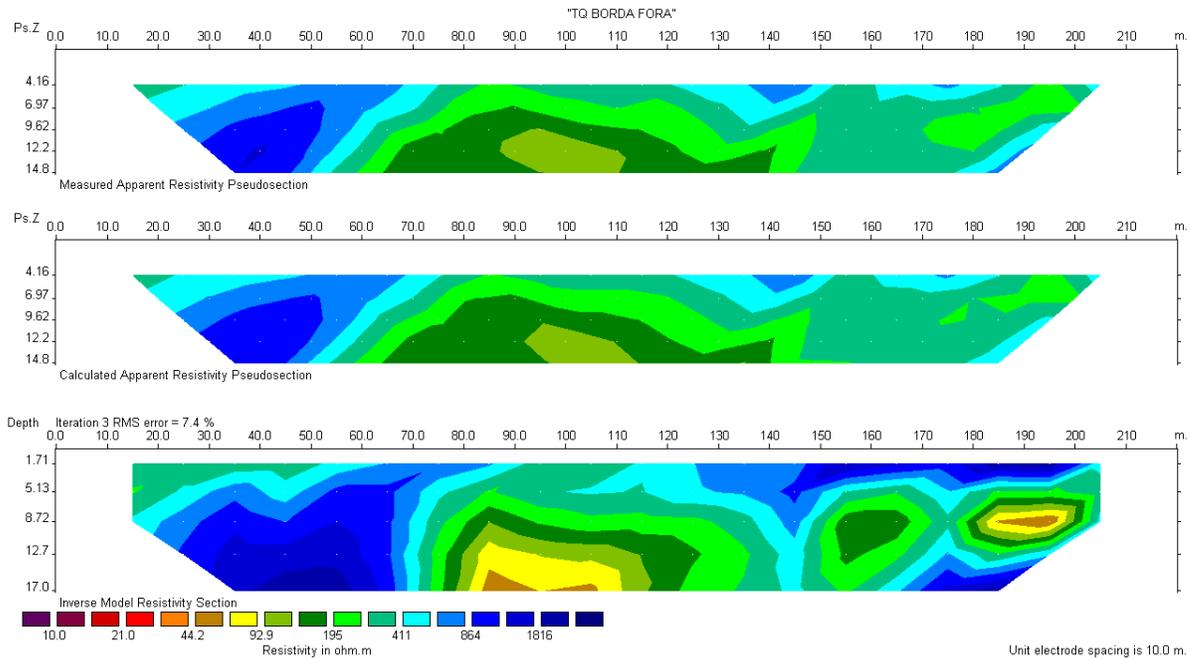


Figura A1.21 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-BF para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

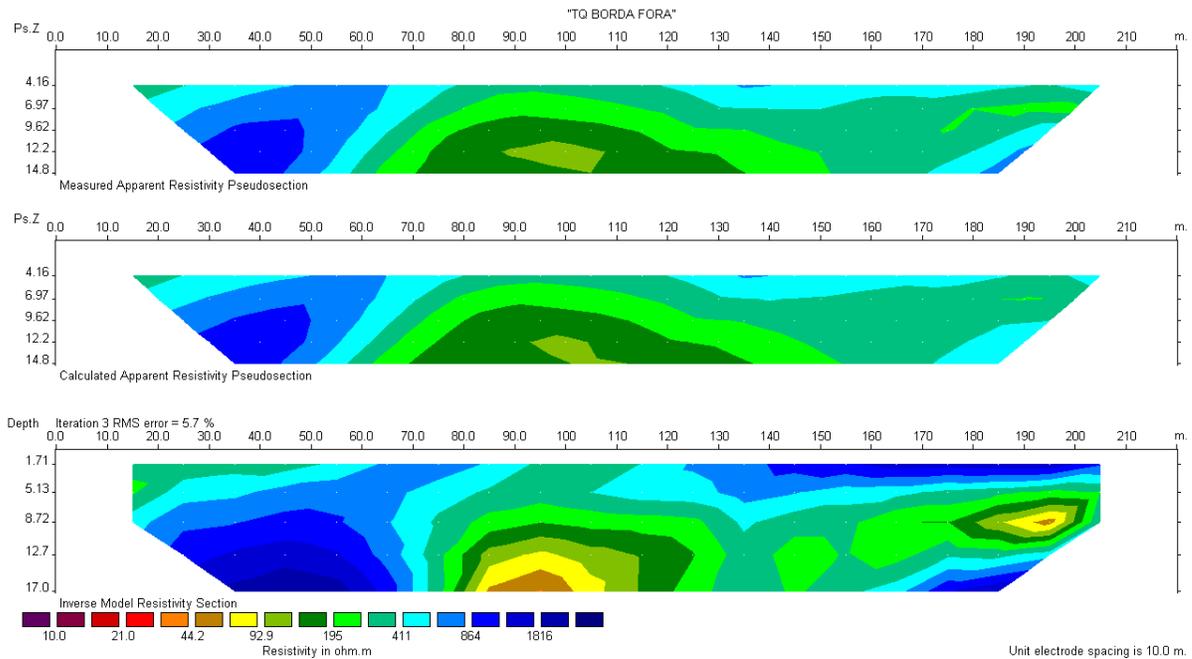


Figura A1.22 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-BF para dados filtrados.

PERFIL TQ-RD

DADOS NÃO FILTRADOS

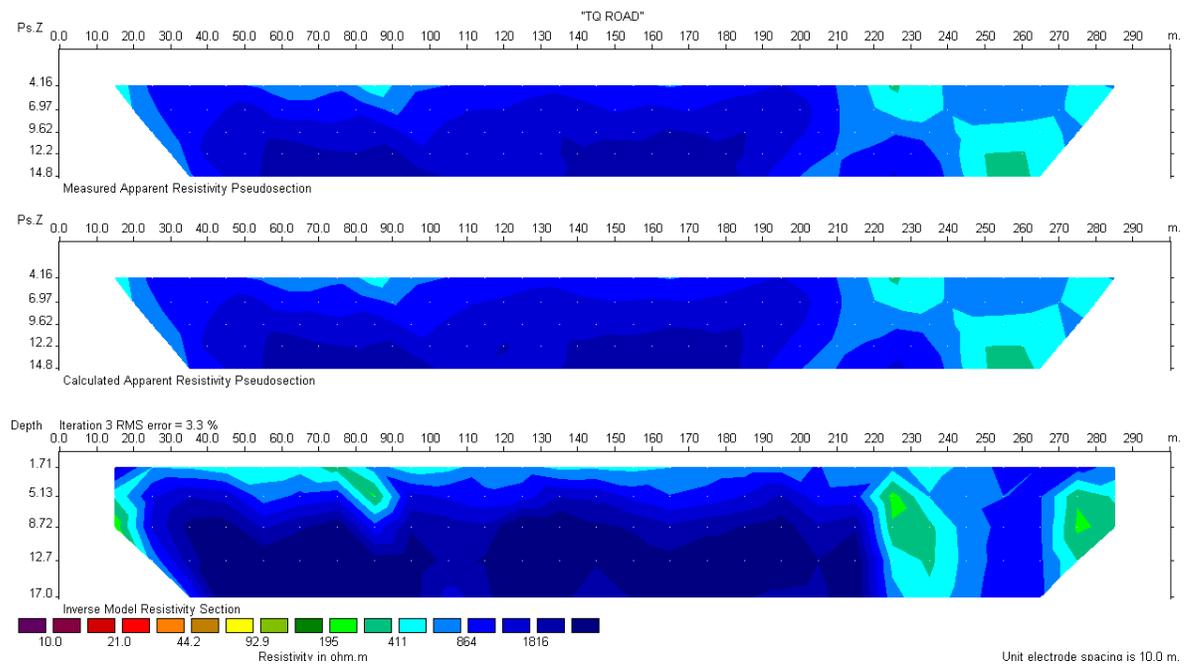


Figura A1.23 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-RD para dados não filtrados.

DADOS FILTRADOS

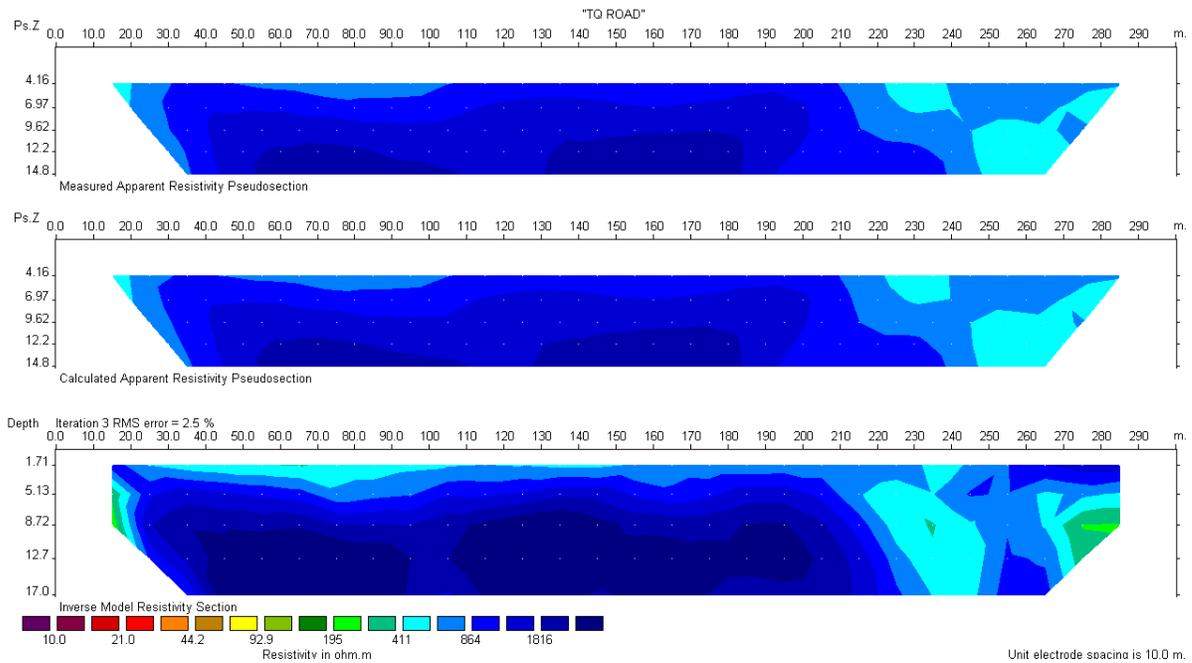


Figura A1.24 - Pseudoseção de resistividade aparente (dados de campo medidos), pseudoseção de resistividade aparente calculada e modelo de resistividades reais do perfil TQ-BF para dados filtrados.

ANEXO 2 – RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS

Os resultados das análises estão dispostos nas tabelas subsequentes. A localização e os nomes de cada amostra podem ser visualizados na Figura A2.1.

Os nomes das amostras são seguidos por um hífen e um número que indica a sequência em que foram coletados. A profundidade de cada amostra também está descrita nas tabelas.

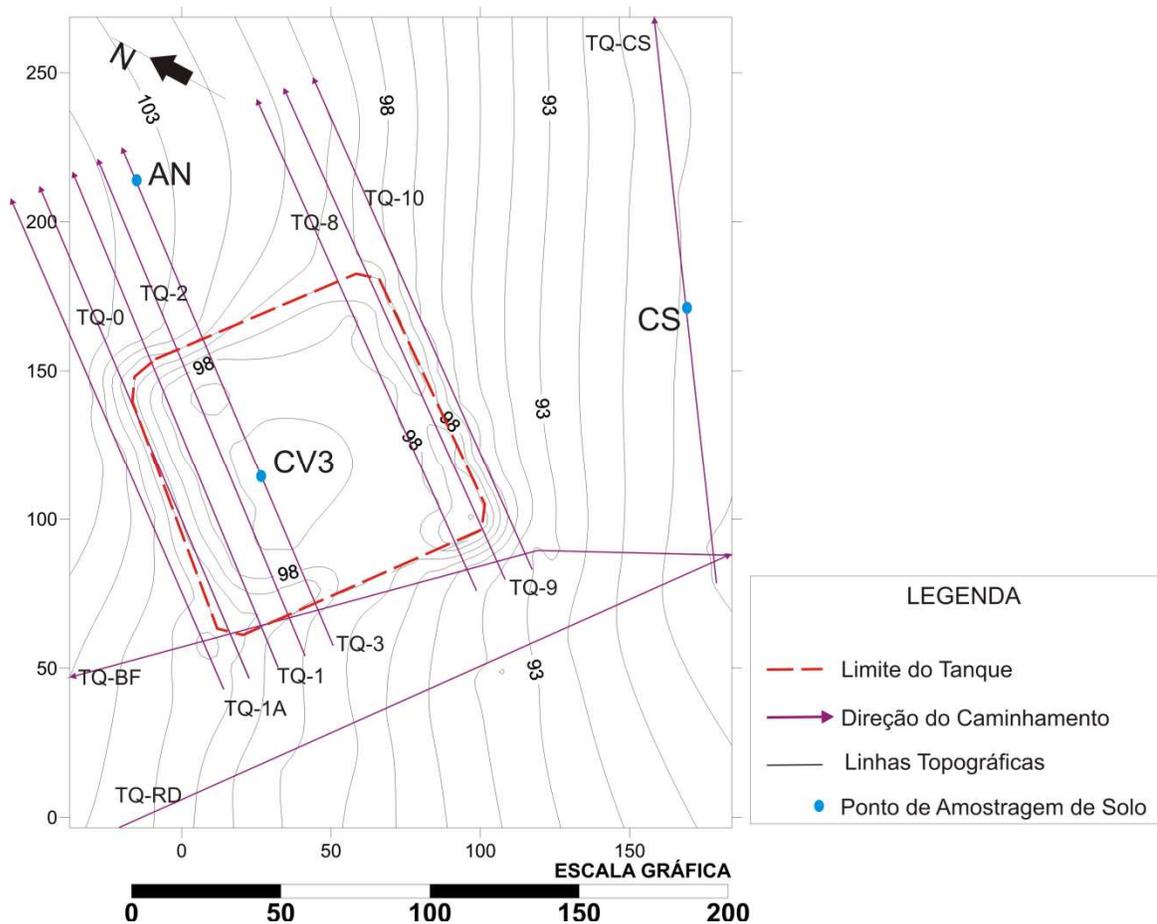


Figura A2.1- Localização dos pontos de amostragem com as respectivas nomeações.

Tabela A2.1 – Resultados das Análises Químicas. Amostras efetuadas dentro do tanque.

Amostra	CV3-1 (36 cm)	CV3-2 (1 m)	CV3-3 (2 m)	CV3-4 (2,5 m)	CV3-5 (3 m)
(%)					
SiO ₂	68,62	69,55	69,83	68,98	74,24
TiO ₂	2,93	2,88	2,88	2,87	2,49
Al ₂ O ₃ *	12,47	12,25	12,29	12,26	10,52
Fe ₂ O ₃ *	9,52	8,83	9,40	9,36	7,22
MnO*	0,047	0,046	0,044	0,044	0,041
MgO*	0,11	0,07	0,07	0,08	0,08
CaO*	0,13	0,04	0,03	0,05	0,08
Na ₂ O*	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03
K ₂ O*	0,05	0,08	0,06	0,08	0,08
P ₂ O ₅ *	0,077	0,149	0,076	0,085	0,179
(µg g ⁻¹)					
As	5,5	4,6	4,8	5,6	5,5
Ba	21	37	38	39	43
Co	7,2	9,3	5,7	10,5	7,9
Cr	41	41	56	52	55
Cu	29	34	32	31	38
Ga	21	20	23	23	17,7
Mo	5,1	4,5	5,2	5,0	5,8
Nb	32	30	30	29	27
Ni*	12	15	14	14	18
Pb	11,1	12,6	10,8	11,2	8,0
Rb	2,5	2,8	2,5	2,9	3,1
#S	582	246	208	195	499
Sn	<4	<4	<4	<4	<4
Sr	18,7	18,5	18,7	19,3	19,4
Th	8,7	10,1	10,6	9,6	8,6
U	<2,5	<2,5	2,6	<2,5	2,9
V	199	178	207	199	156
Y	6,4	5,5	5,7	5,8	3,7
Zn	26	28	27	26	55
Zr	494	486	449	447	410

Para o enxofre (S) o valor obtido é apenas informativo.

* Compostos relevantes na análise da vinhaça

Tabela A2.2 – Resultados das Análises Químicas. Amostras efetuadas na zona anômala fora do tanque..

Amostra	AN-1 (0,5 m)	AN-2 (1 m)	AN-3 (2 m)	AN-4 (3 m)	AN-5 (4 m)
(%)					
SiO ₂	71,50	71,89	68,37	66,08	66,28
TiO ₂	2,70	2,77	3,05	3,22	3,20
Al ₂ O ₃ *	11,11	11,13	12,45	13,44	13,61
Fe ₂ O ₃ *	8,93	9,15	9,98	10,71	10,71
MnO*	0,040	0,042	0,046	0,047	0,049
MgO*	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07
CaO*	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04
Na ₂ O*	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
K ₂ O*	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
P ₂ O ₅ *	0,080	0,071	0,069	0,071	0,072
(µg g ⁻¹)					
As	4,3	4,3	5,8	6,3	5,7
Ba	36	36	31	24	30
Co	<5	<5	5,2	12,1	<5
Cr	68	49	39	44	43
Cu	26	26	29	31	31
Ga	20	20	23	24	23
Mo	5,2	5,0	5,4	6,2	5,6
Nb	25	26	30	32	31
Ni*	13	13	13	14	14
Pb	8,9	9,8	9,2	8,9	10,4
Rb	2,7	<2	2,3	2,0	<2
#S	68	61	155	124	128
Sn	<4	<4	<4	4,4	<4
Sr	15,0	14,5	15,6	16,8	17,0
Th	10,1	7,6	8,9	11,5	10,4
U	2,8	2,7	2,6	<2,5	2,6
V	206	203	211	223	219
Y	5,5	5,5	6,5	5,7	6,2
Zn	25	25	28	28	29
Zr	393	413	479	505	464

Para o enxofre (S) o valor obtido é apenas informativo.

* Compostos relevantes na análise da vinhaça

Tabela A2.3 – Resultados das Análises Químicas. Amostras efetuadas sobre a linha TQ-CS.

Amostra	CS-1 (0,5 m)	CS-2 (1 m)	CS-3 (1,5 m)	CS-4 (2,2 m)	CS-5 (3 m)
(%)					
SiO ₂	71,09	70,54	69,30	69,37	67,20
TiO ₂	2,84	2,97	3,06	3,01	3,17
Al ₂ O ₃ *	11,48	11,70	12,36	12,09	13,26
Fe ₂ O ₃ *	9,03	9,22	9,68	9,46	10,14
MnO*	0,043	0,044	0,045	0,044	0,051
MgO*	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
CaO*	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
Na ₂ O*	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
K ₂ O*	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
P ₂ O ₅ *	0,075	0,072	0,072	0,067	0,067
(µg g ⁻¹)					
As	4,2	5,1	4,6	5,1	5,5
Ba	38	35	33	34	49
Co	<5	<5	<5	7,2	<5
Cr	41	63	45	111	38
Cu	27	28	29	29	30
Ga	20	21	21	20	21
Mo	5,1	5,3	5,7	5,5	5,7
Nb	27	29	29	29	31
Ni*	13	13	12	13	12
Pb	12,2	10,4	11,0	10,3	11,5
Rb	2,3	<2	<2	<2	<2
#S	36	50	118	122	77
Sn	<4	<4	<4	<4	<4
Sr	16,0	15,6	16,1	16,4	17,3
Th	9,6	8,9	9,9	9,1	11,3
U	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
V	196	200	205	205	217
Y	5,8	5,4	5,9	6,4	6,3
Zn	25	25	26	25	26
Zr	444	476	471	481	500

Para o enxofre (S) o valor obtido é apenas informativo.

* Compostos relevantes na análise da vinhaça