

**Ministério de Minas e Energia**  
**CPRM – Serviço Geológico do Brasil**

**“CARTAS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS  
GRAVITACIONAIS DE MASSA E INUNDAÇÕES”**

**GEOFÍSICA**

**(Pongai)**

**Autores: Jairo J. C. Andrade; Sergio R. E. de Carvalho; Luiz G. R. Pinto**



**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL**  
**CPRM**

**São Paulo, 12 de julho de 2019**

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	3
MATERIAIS e MÉTODOS .....	4
<b>Métodos Elétricos</b> .....	4
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	4
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	5
<b>Equipamentos Utilizados</b> .....	7
AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	8
PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	11
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	11
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	12
INTERPRETAÇÃO.....	15
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	15
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	16
REFERÊNCIAS.....	19
APÊNDICE .....	20

## INTRODUÇÃO

No projeto “Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações” foi realizada uma campanha de geofísica terrestre, com levantamento elétrico, objetivando estimar a espessura do solo, extensão e espessura dos depósitos sedimentares e profundidade do topo rochoso nas regiões de interesse. O levantamento se deu na região que abrange o Município de Pongai, nos dias 11 e 12 de junho de 2019, com equipe composta por um geofísico e um técnico em geociências.

Neste contexto, a geofísica (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical) tornou possível, de forma rápida e eficiente, mensurar em profundidade e lateralmente perfis de alteração de solos, bem como a saturação destes, trazendo à luz respostas geotécnicas do terreno antes desconhecidas. Estas investigações corroboram em várias frentes para a conclusão das áreas mais indicadas à ocupação urbana, determinando a profundidade do topo rochoso, diferença de materiais e permeabilidade dos mesmos. Assim, estes estudos vão além do proposto, atingindo propostas de trabalhos de escalas maiores, com resultados pontuais, mas bastante esclarecedores do contexto geológico-geotécnico e que podem, muitas vezes, ser inferidos para o restante município.

O caminhamento elétrico permite, também, estabelecer contatos laterais entre os materiais, que ajudam na determinação e delimitação de depósitos alúvio/coluvionares. Estes depósitos por sua vez são fundamentais para o planejamento urbano. Tais terrenos (denominados “solos moles”) são geotecnicaamente problemáticos ao passo que sua ocupação necessita, além de todo o cuidado ambiental, medidas de engenharia custosas e tecnicamente mais complexas, como troca de solos, fundações mais profundas e métodos construtivos mais aprimorados, soluções estas que nem sempre estão a disposição dos munícipes.

Desta forma, conhecer estes locais e compreender o contexto geológico-geotécnico faz-se importantíssimo para a produção das cartas de suscetibilidade e os estudos geofísicos compreenderam uma ferramenta de apoio para este entendimento, com informações pontuais que ajudaram a contextualizar o município.

# MATERIAIS e MÉTODOS

## Métodos Elétricos

Os métodos elétricos utilizam correntes contínuas ou alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas da subsuperfície. Nesse trabalho foi utilizado método de eletrorresistividade a fim de estudar descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e associá-las aos objetivos do projeto. No método de eletrorresistividade, correntes elétricas geradas artificialmente são introduzidas no solo e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície.

A resistividade elétrica é uma das propriedades físicas mais variáveis. A maior parte dos minerais formadores das rochas é isolante e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela presença de íons nas águas dos poros. Assim, o aumento da porosidade e do conteúdo de sais são os principais fatores que diminuem resistividade de rochas. Secundariamente, a presença de argilo-minerais, minerais sulfetados e granulação grosseira.

A resistividade elétrica é calculada pela seguinte equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Onde (I) é a corrente elétrica introduzida no solo, ( $\Delta V$ ) é a diferença de potencial medida e (K) é um fator geométrico que depende das técnicas e arranjos utilizados nos levantamentos. As técnicas de campo utilizadas foram a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE).

### Sondagem Elétrica Vertical

A técnica da SEV consiste numa sucessão de medidas de um parâmetro geoeletrico efetuadas a partir da superfície do terreno (investigação 1D com observação da variação vertical da resistividade elétrica). São injetadas correntes (I) no solo através de dois eletrodos nos pontos A e B, e é medida a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre os outros dois eletrodos nos pontos M e N (Figura 1).

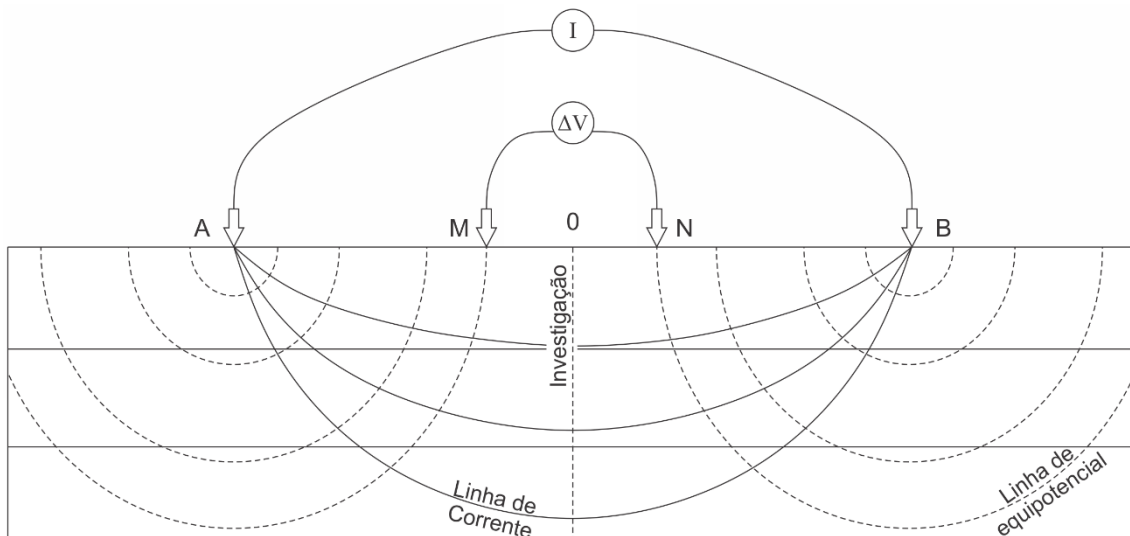


Figura 1 - Técnica da sondagem elétrica vertical (SEV).

Uma vez que se conhece as distâncias  $\overline{AM}$  e  $\overline{AN}$ , pode-se medir a corrente ( $I$ ) injetada e a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), e calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) com a seguinte equação:

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

O arranjo utilizado foi o Schlumberger em que os eletrodos (AB) são afastados do centro do arranjo a cada leitura, investigando cada vez mais profundo, e os eletrodos (MN) se mantêm fixos. As leituras deste arranjo estão menos sujeitas as variações laterais no parâmetro físico medido, irregularidades na superfície topográfica e ruídos produzidos por fontes artificiais (Braga, 2016).

### **Caminhamento Elétrico**

A técnica do CE se baseia na análise e interpretação de um parâmetro geoeletrico, obtido com base em medidas efetuadas na superfície do terreno, com espaçamento constante entre os eletrodos AMNB. Por meio desta técnica, investigam-se, ao longo de linhas, as variações laterais do parâmetro físico a uma ou mais profundidades determinadas; com isso, a direção da linha de investigação permanece fixa e o centro do arranjo AMNB varia com o seu desenvolvimento. Para o desenvolvimento desta técnica, podem ser usados

vários tipos de arranjos de desenvolvimento, como Schlumberger, Wenner, gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo etc.

O Arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 5 m, em que os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) são alinhados em uma mesma direção com espaçamento constante (Figura 2). Este arranjo apresenta vantagem em relação aos outros arranjos, porque é um arranjo simétrico e, como resultado desta simetria, facilita o melhor posicionamento de uma anomalia. Neste levantamento foram utilizados simultaneamente 10 dipolos de recepção (MN) disposto ao longo do sentido de aquisição de dados (cada dipolo corresponde a um nível de investigação).

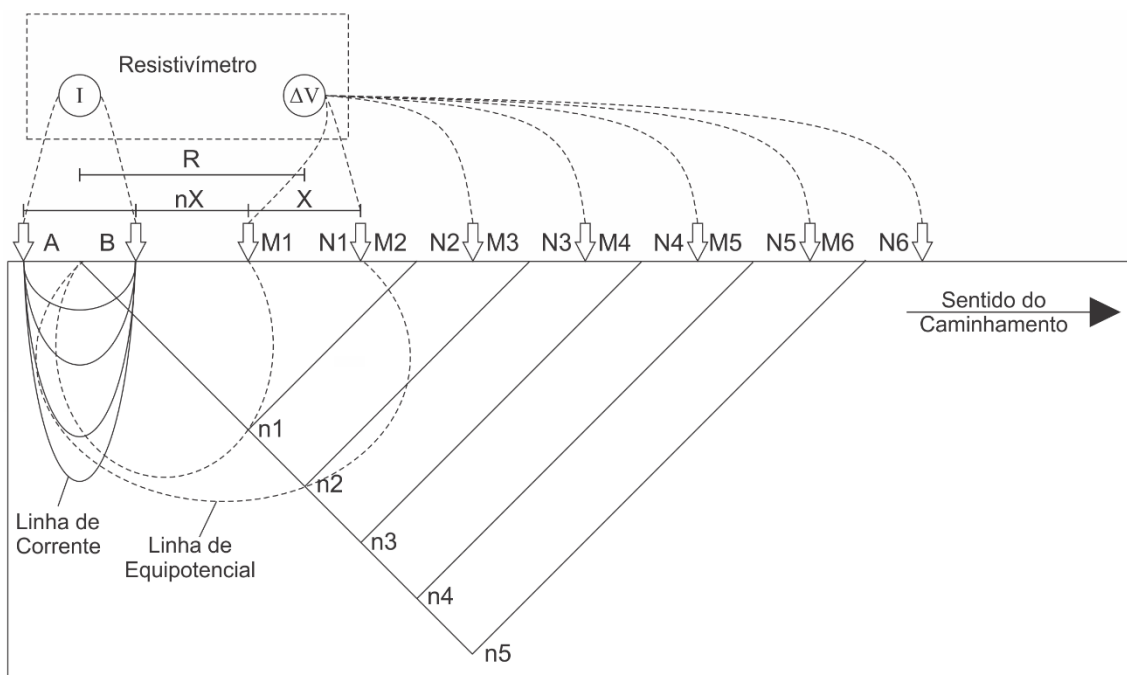


Figura 2 - Esquema do CE, arranjo dipolo-dipolo.

Estes parâmetros foram escolhidos visando obter maior profundidade de investigação e melhor resolução possível.

Deste modo é possível calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) com a seguinte equação:

$$\rho_a = 2\pi GX \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Com

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (3)$$

Em que: ( $X$ ) é o espaçamento dos dipolos (AB) e (MN) adotado; ( $n$ ) é o nível de investigação correspondente (Braga, 2016).

### Equipamentos Utilizados

No levantamento foi utilizado o resistímetro Syscal Pro (Figura 3), que possui 10 canais de leitura integrados. Para a SEV estavam disponíveis quatro rolos de cabos sendo dois de 100 m e dois de 350 m. Para o CE estava disponível um cabo com abertura máxima, entre cada canal, de 5 m e com 10 canais de medidas cada, permitindo leituras automáticas em todos os eletrodos. Os equipamentos auxiliares foram: duas baterias de 12 V; eletrodos metálicos para injeção de corrente elétrica e medição do potencial elétrico; cabos para conexões entre equipamento e eletrodos; marretas para fixação dos eletrodos e trenas para marcar as posições dos eletrodos.



Figura 3 - Syscal Pro.

As coordenadas foram registradas com o GPS portátil Garmin 62sc, admitindo-se uma precisão máxima horizontal de 5 m e vertical de 10 m. Essas são também as precisões dos produtos geofísicos gerados.

## AQUISIÇÃO DOS DADOS

Foram realizados estudos nos 3 pontos planejados, totalizando 2 CEs e 1 SEV (Figura 4).

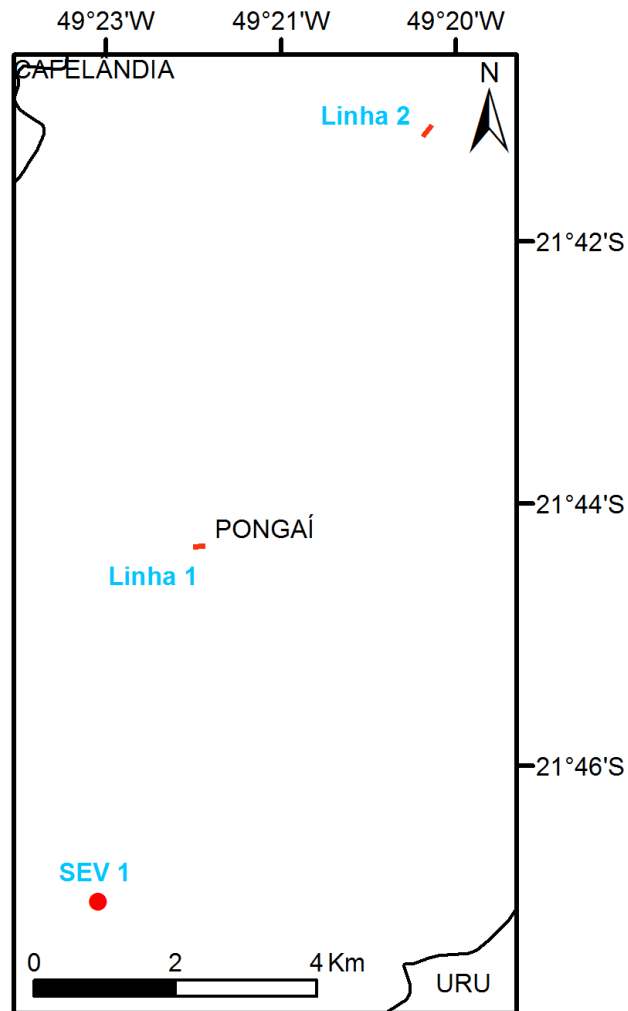


Figura 4 – Localização dos levantamentos geofísicos.



Os CEs, Linha 1 e Linha 2, foram realizados visando mapear a extensão e espessura dos depósitos alúvio/coluvionares (Figura 5 e Figura 6).



Figura 5 – Área de execução da Linha 1.



Figura 6 – Área de execução da Linha 2.

A SEV 1 (Figura 7) foi realizada a fim estabelecer a média da resistividade elétrica do solo e espessura das interfaces verticais.



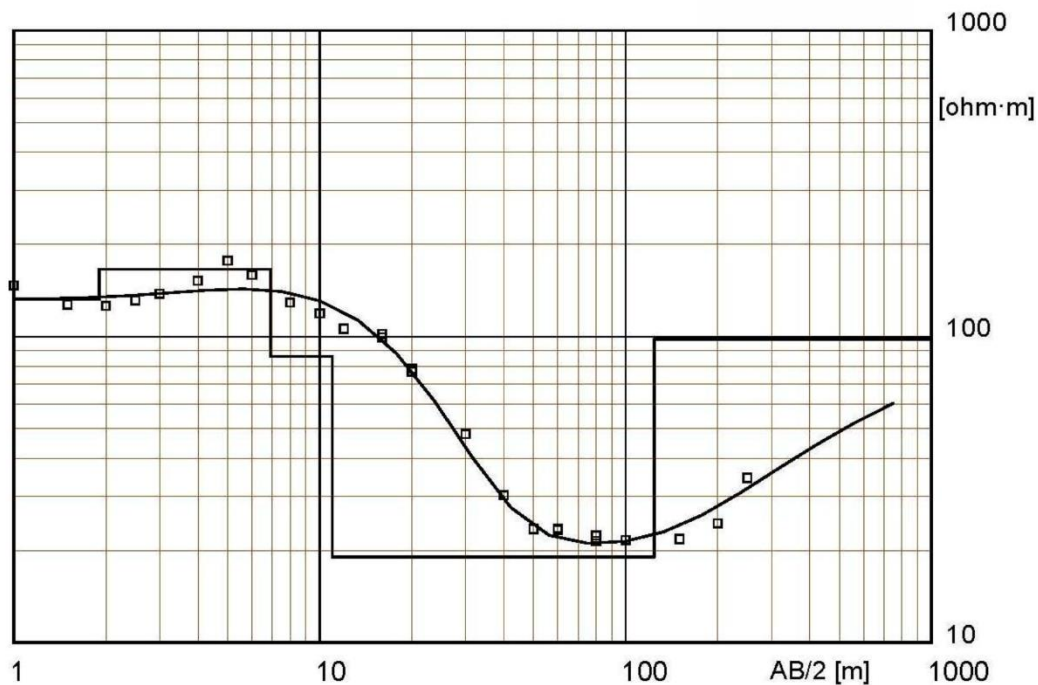
Figura 7 – Área de execução da SEV 1.

# PROCESSAMENTO DOS DADOS

## Sondagem Elétrica Vertical

Para o processamento dos dados da SEV foram utilizados os Softwares Prosys II; versão 03.11.02. desenvolvido por IRIS Instruments e o WinSev; versão 6.3 desenvolvido por W-GeoSoft. O método de inversão utilizado foi automático, realizando mínimas intervenções manuais, apenas quando o ajuste cria modelos muito complexos com várias camadas.

A inversão da SEV 1 (Figura 8) resultou num modelo de 5 camadas geoeletricas.



Localização X = 49°22'43.45"O Y = 21°47'2.16"S Z = 432 m

Modelo

Resistividade [ohm·m]	Espessura [m]	Profundidade [m]	Cota [m]
132	1.9		432
166	5	1.9	430.1
86	4.1	6.9	425.1
19	113	11	421
98		124	308

Figura 8 – Ajuste dos dados medidos e calculados da SEV 1.

As tabelas de dados encontram-se no apêndice.

## **Caminhamento Elétrico**

Para o processamento dos dados do CE foram utilizados os Softwares Prosys II; versão 03.11.02. desenvolvido por IRIS Instruments e o Res2dinv; ver. 3.4; 2D Resistivity and IP Inversion. (desenvolvido por Geotomo Software Malaysia). O método de inversão utilizado foi o robusto e foi utilizado o modelo de discretização com refinamento (Modelo com células com metade do espaçamento).

Estudos preliminares foram realizados para verificar qual espaçamento entre os eletrodos se adequaria melhor ao objetivo do levantamento e verificou-se que o espaçamento de 5 m obteve os melhores resultados.

# LINHA 1

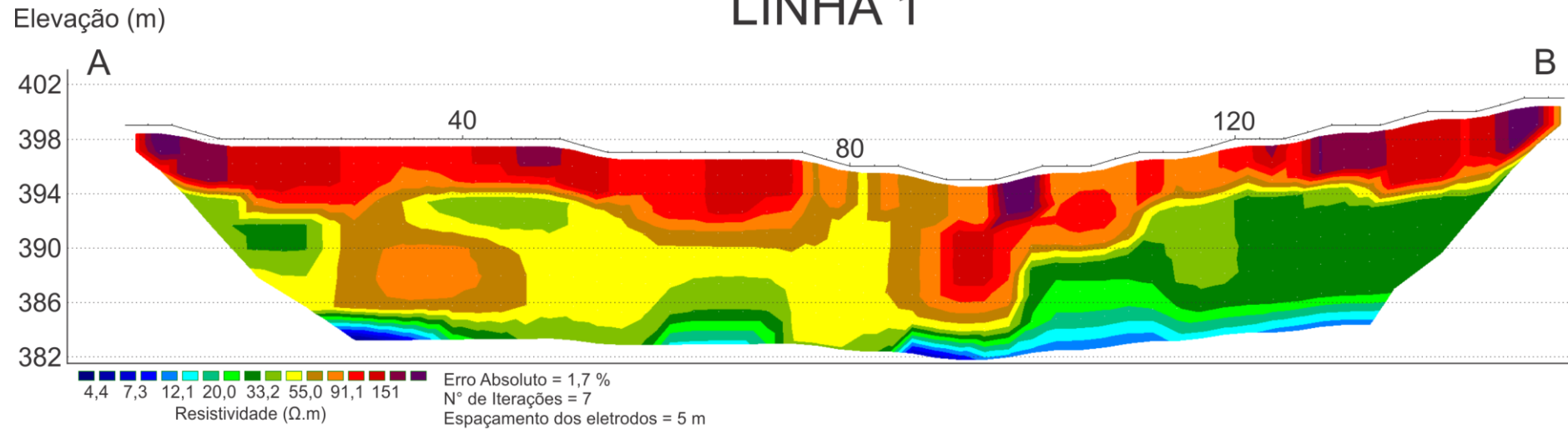


Figura 9 - Seção inversa da Linha 1.

# LINHA 2

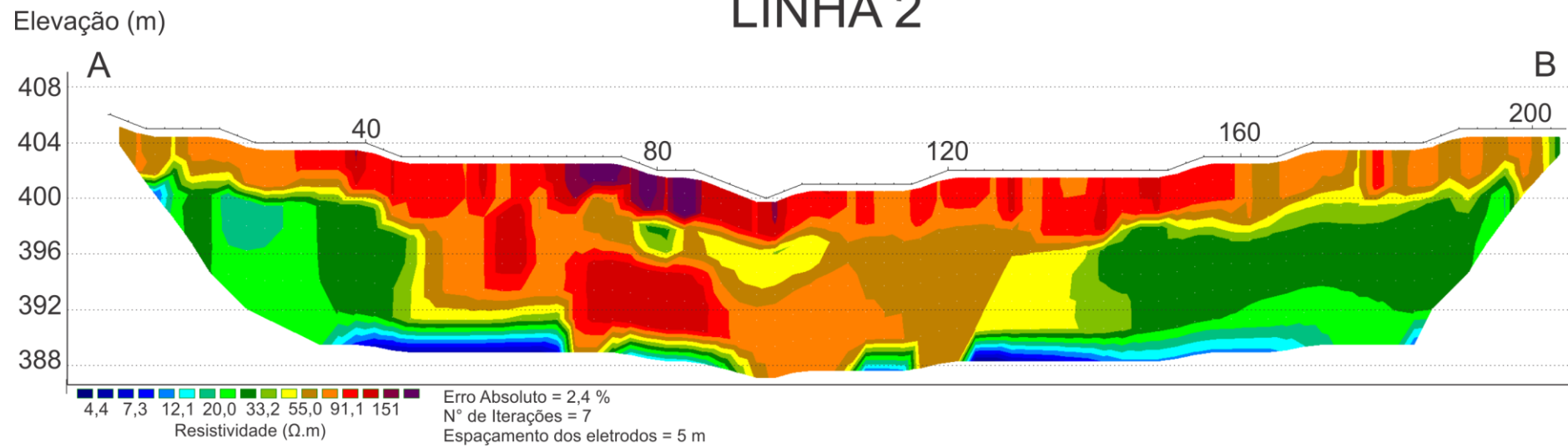


Figura 10 - Seção inversa da Linha 2.

As Pseudo-Seções medidas, calculadas e Seções Invertidas dos CEs encontram-se no apêndice.

# INTERPRETAÇÃO

## Sondagem Elétrica Vertical

A SEV 1 apresenta modelo geoeletrico de 5 camadas, interpretadas conforme modelo da Figura 11. O contexto geológico verificado nos afloramentos e os valores de resistividades indicam que a litologia é constituída basicamente por areias e arenito (Telford et al., 1990). A zona saturada, que apresenta espessura teórica de 113 m, deve estar associada ao aquífero Bauru e o embasamento ao basalto da Formação Serra Geral (DAEE et al., 2005).

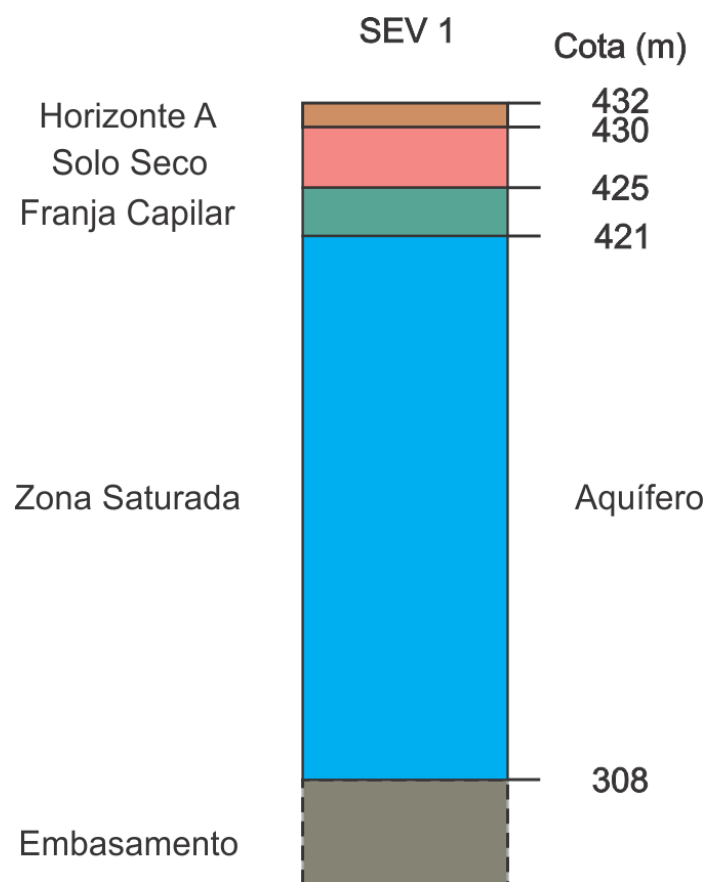


Figura 11 - Interpretação do modelo de camadas das SEV 1.

## **Caminhamento Elétrico**

Os CEs foram interpretados com três principais horizontes: solo arenoso seco, franja capilar e solo saturado. Os perfis apresentam uma faixa, dentro do vale, que evidencia acúmulo de material com resposta geométrica muito diferente da resposta geométrica da litologia local, esta faixa foi interpretada como depósitos de alúvio-colúvio. Os aluviões são constituídos por materiais erodidos, retrabalhados, transportados pelo curso d'água e depositados em seus leitos e margens, entremeados a materiais coluvionares, depositados pela ação da gravidade. Os aluviões são também depositados nos fundos e nas margens de lagoas e lagos, sempre associados a ambientes fluviais (Vaz, 1996).

Na Linha 1 (Figura 12) extensão do depósito de alúvio-colúvio é de aproximadamente 40 m, verificado entre as posições 80 e 120 m no perfil. O depósito apresenta aproximadamente 12 m de espessura na porção mais espessa. Já na Linha 2 (Figura 13) extensão do depósito de alúvio-colúvio é de aproximadamente 120 m, verificado entre as posições 40 e 160 m no perfil. O depósito apresenta aproximadamente 14 m de espessura na porção mais espessa.



# LINHA 1

Elevação (m)

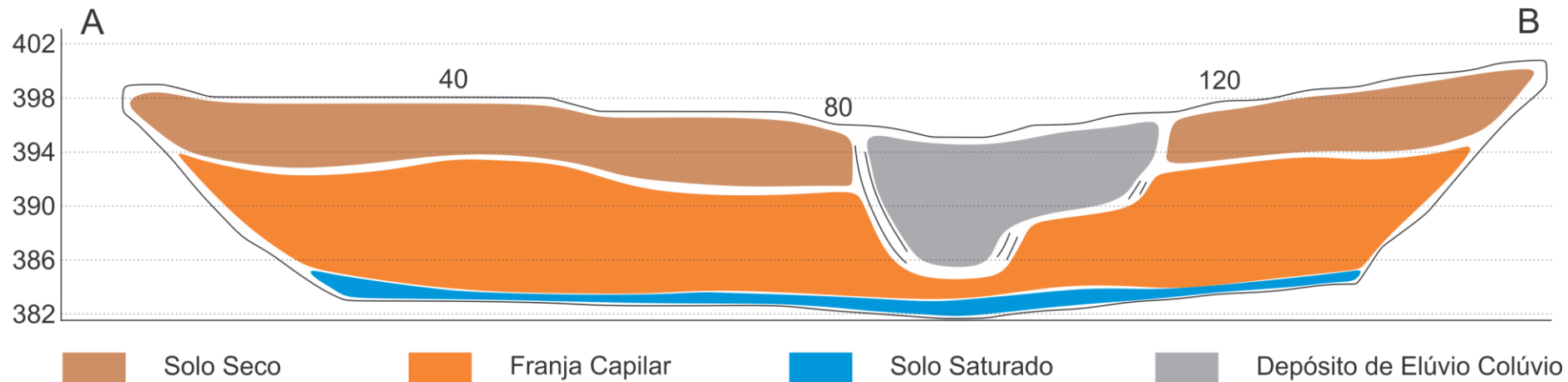


Figura 12 - Linha 1 interpretada.

# LINHA 2

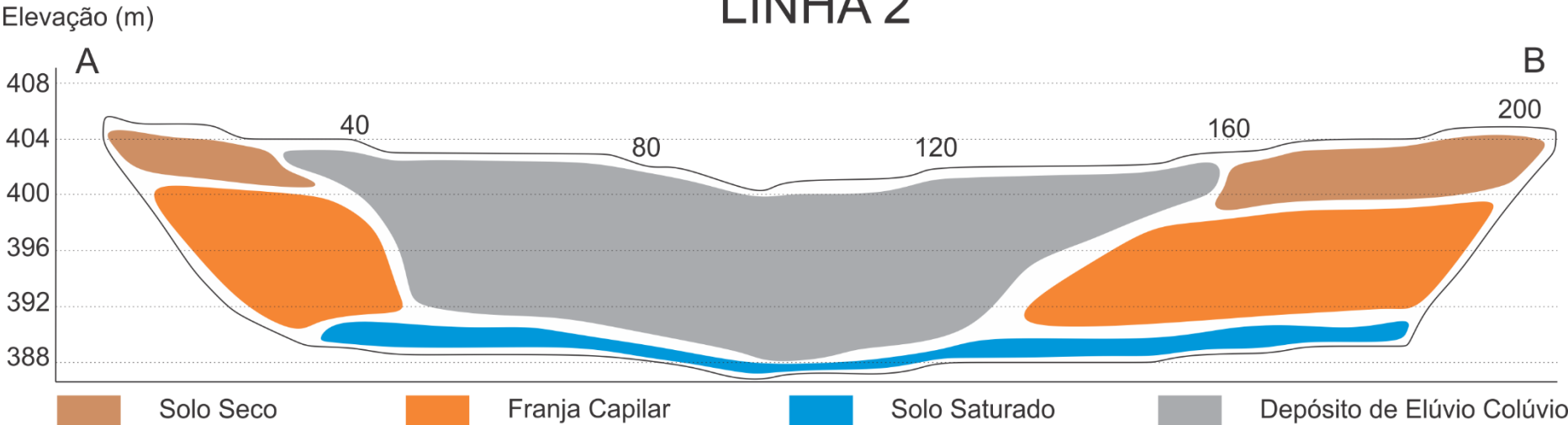


Figura 13 - Linha 2 interpretada.

## REFERÊNCIAS

BRAGA, A.C.O., **Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em Hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016, 159p.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. & SHERIFF, R.A., **Applied geophysics** 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

VAZ, L. F. **Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais**. In: Rev. Solos e Rochas, v. 19, n. 2, ABMS/ABGE, São Paulo, SP, 1996. p. 117 - 136.

DAEE/IG/IPT/CPRM. 2005. **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000**. Nota explicativa. São Paulo. São Paulo: DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica, IG- Instituto Geológico, IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 3 v. (mapa e CD-ROM).

## APÊNDICE

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm·m]
.2	1	65466.2	3357	7.54	147
.2	1.5	24141.9	3309	17.36	127
.2	2	13680.3	3377	31.1	126
.2	2.5	9259.6	3436	48.77	131
.2	3	5930	3022	70.37	138
.2	4	4014.3	3296	125	152
.2	5	2972.5	3290	196	177
.2	6	2024.9	3599	282	159
1	8	4200.3	3216	98.96	129
1	10	2776.9	3636	156	119
1	12	1686.4	3590	225	106
1	16	1025	4134	401	99.4
4	16	4514.5	4154	94.25	102
1	20	452.3	3687	627	76.9
4	20	1925.2	3706	151	78.4
4	30	550.5	3982	347	48
4	40	171.7	3521	622	30.3
4	50	41.9	1739	975	23.5
4	60	70.2	4232	1407	23.3
10	60	182.7	4259	550	23.6
4	80	19.1	2223	2507	21.5
10	80	52	2300	990	22.4
10	100	14.2	1023	1555	21.6
10	150	15	2418	3519	21.8
40	200	18.2	1119	1508	24.5
40	250	11.9	825	2392	34.5

Figura 14 - Dados da SEV 1.

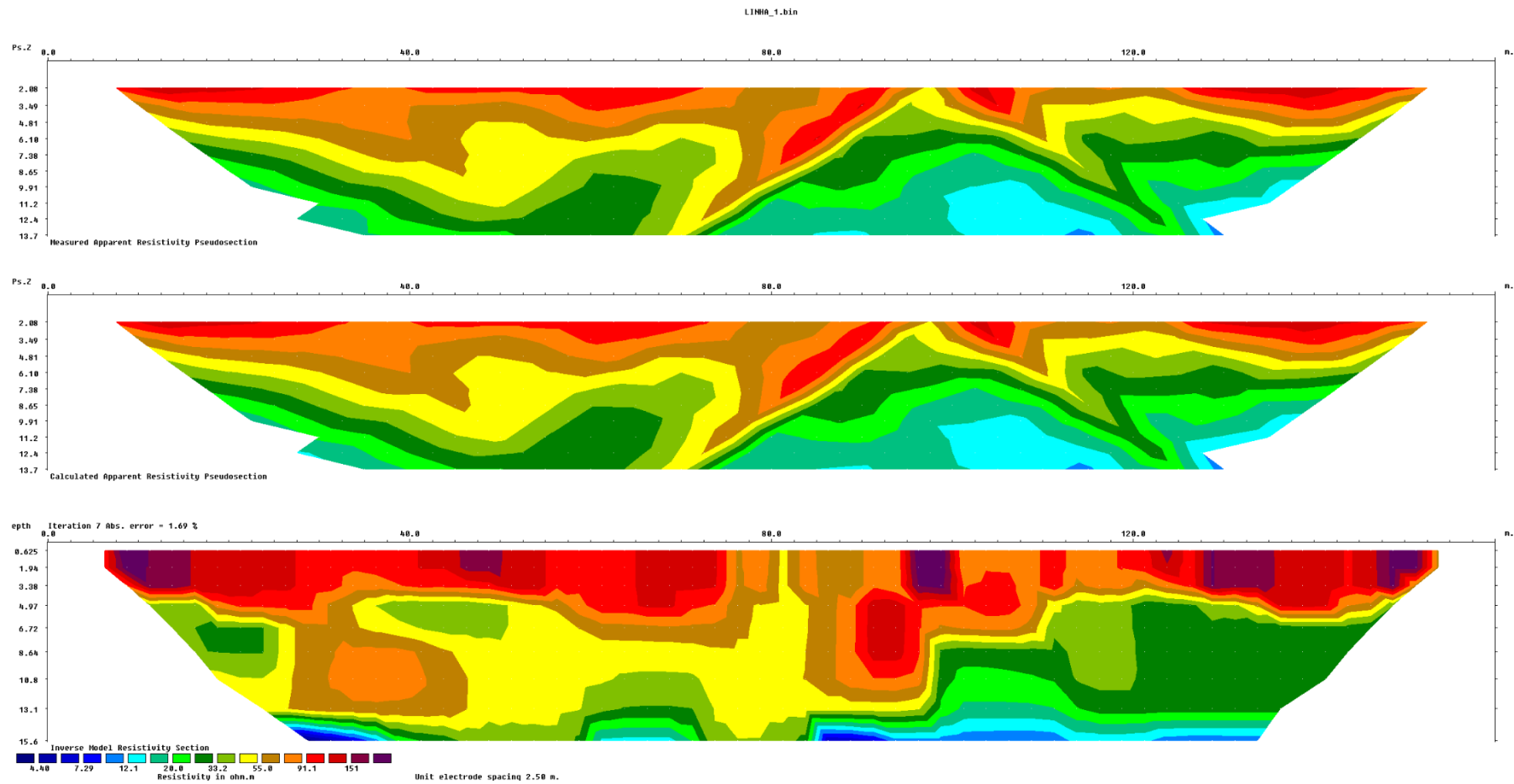


Figura 15 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1.

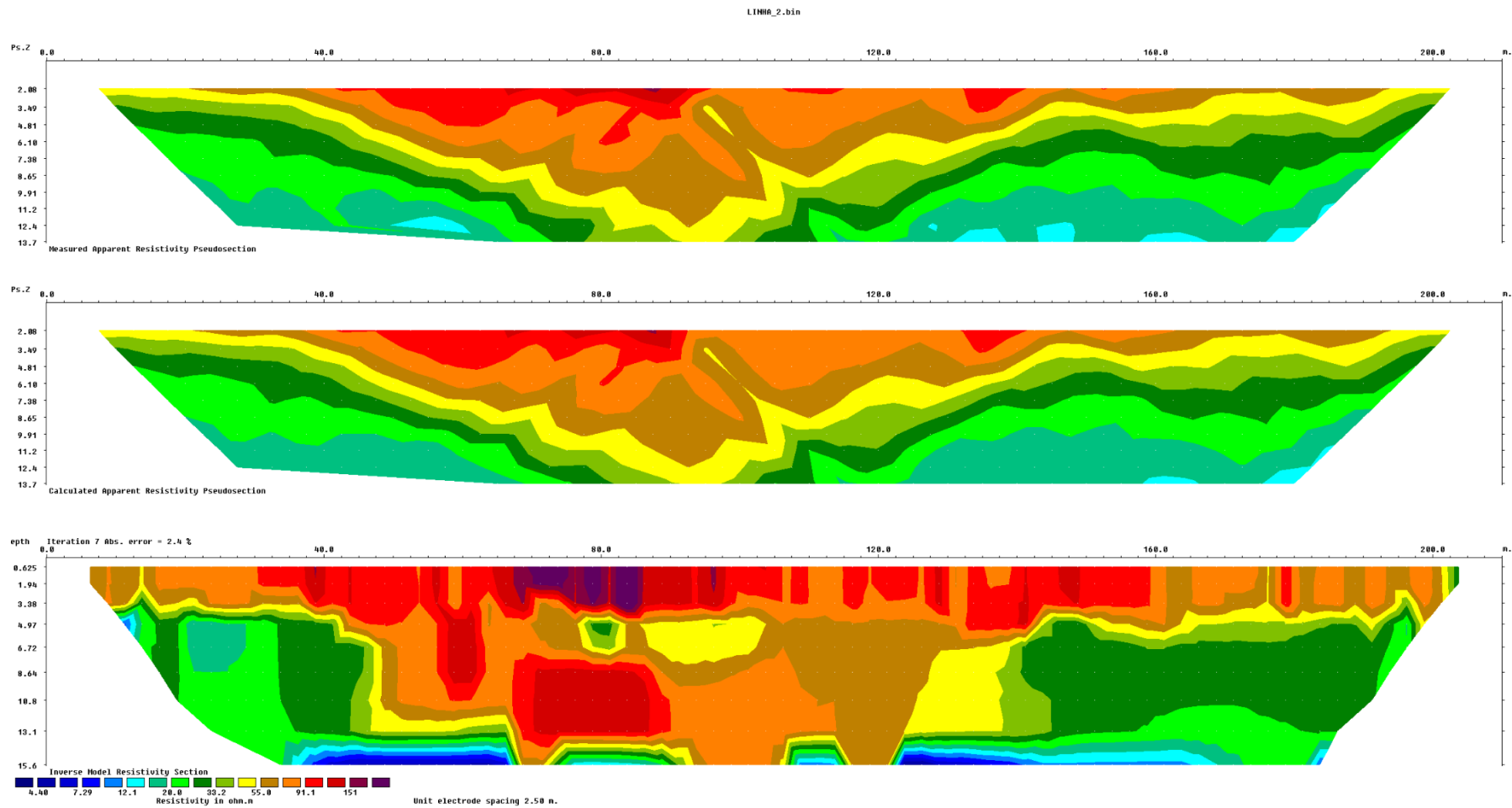


Figura 16 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2.