

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

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

**GEOFÍSICA**

**(São José do Rio Pardo)**

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



**São Paulo, 31 de Agosto de 2018**

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	3
MÉTODOS E MATERIAIS .....	3
<b>Métodos Elétricos</b> .....	3
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	4
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	5
<b>Equipamentos Utilizados</b> .....	6
AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	7
PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	9
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	9
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	10
INTERPRETAÇÃO.....	12
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	12
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	13
AGRADECIMENTOS.....	15
REFERÊNCIAS.....	15
APÊNDICE .....	16

## INTRODUÇÃO

No projeto “Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações” foi realizada campanha de geofísica terrestre, levantamento elétrico, objetivando estimar a espessura do solo, profundidade do topo do cristalino rochoso e mapear feições e estruturas geológicas de interesse.

O levantamento se deu na região que abrange a cidade de São José do Rio Pardo nos dias 23 e 24 de Agosto de 2018, com equipe composta por um geofísico e um técnico de geociências.

## MÉTODOS E MATERIAIS

### Métodos Elétricos

Os métodos elétricos utilizam correntes contínuas ou alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas da subsuperfície. Nesse trabalho foram usados os métodos de resistividade a fim de estudar descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e associá-las aos objetivos do projeto. Nos métodos de resistividade, 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 determinada 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 geológico efetuadas a partir da superfície do terreno. Dois eletrodos “injetam”, nos pontos A e B, uma corrente (I) no solo e outros dois eletrodos medem a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre estes pontos M e N (Figura 1).

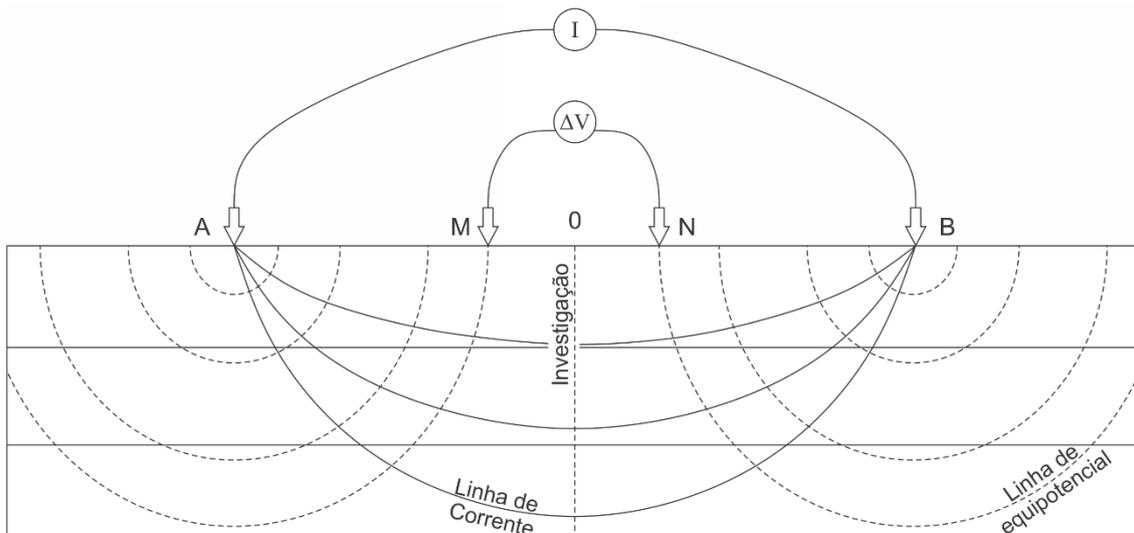


Figura 1 - Técnica da sondagem elétrica vertical (SEV).

Uma vez que se conhece a distância entre os pontos  $\overline{AM}$  e  $\overline{AN}$ , pode-se medir a corrente (I) injetada e a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), é possível 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 geoeétrico, 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 arranjo de desenvolvimento, como Schulumberger, Wenner, gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo etc.

O Arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo em que os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) são alinhados em uma mesma direção com espaçamento constante (Figura 2). 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).

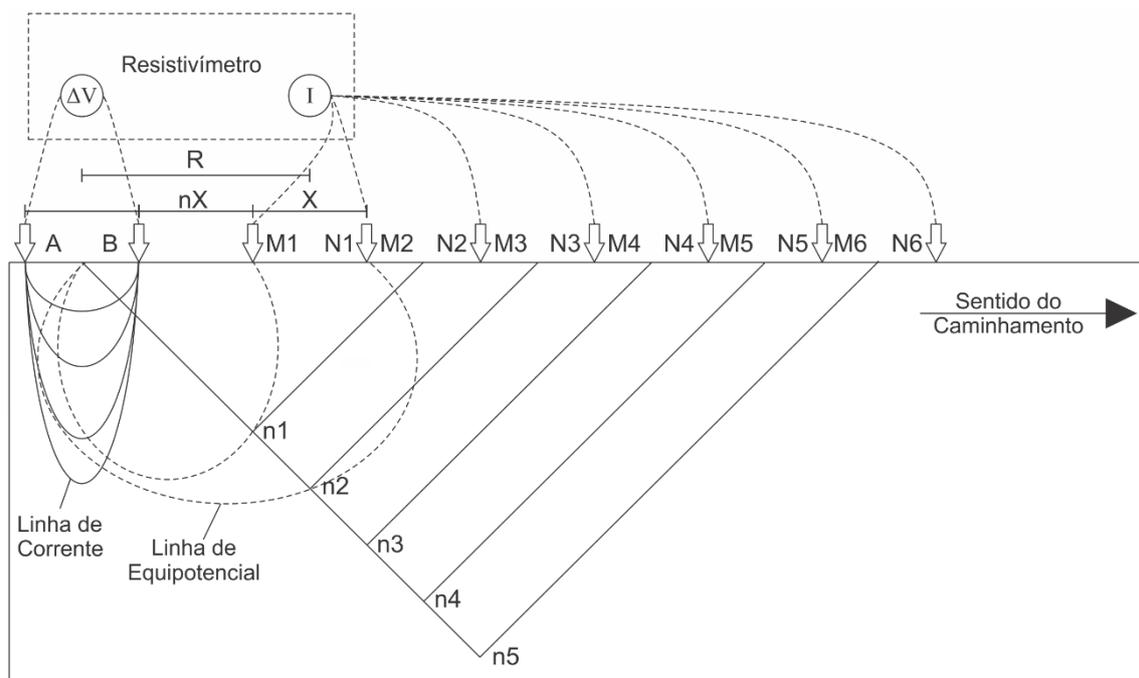


Figura 2 - Esquema do CE, arranjo dipolo-dipolo

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

Nos levantamentos elétricos SEV e CE, utilizou-se o resistivímetro Syscal Pro (Figura 3), que possui 10 canais de leitura integrados. Para a SEV estavam disponíveis 4 rolos de cabos, dois de 100m e 2 de 350m, para o CE estavam disponíveis dois conjuntos de cabos com abertura máxima, entre cada canal, de 5 e 20m com 10 canais de medidas cada, permitindo leituras automáticas em todos os eletrodos. Os equipamentos auxiliares foram: uma bateria 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 um precisão máxima horizontal de 5 m e vertical de 10 m. Essas são também as precisões dos produtos geofísicos gerados.

## AQUISIÇÃO DOS DADOS

Na região foram realizados 1 CE e 1 SEV. O CE, Linha 1, foi realizado em área como indícios da existência de depósito de rochas não consolidadas, conhecidos como depósito de Talus (Figura 4). A existência de depósito de Talus nessa área é inferida através de interpretações preliminares em imagens de satélite.



Figura 4 - Linha 1 sobre possível depósito de Talus, A e B identificam, respectivamente, início e fim do CE.  
Ponto A: ( $X=46^{\circ}46'46,99''$ ;  $Y=21^{\circ}37'31,92$ ), Ponto B: ( $X=46^{\circ}44'59,82''$ ;  $Y=21^{\circ}37'33,74''$ )

A SEV 1 (Figura 5) foi realizada dentro da zona urbana de São José do Rio Pardo e objetivava identificar espessura do solo e profundidade do topo do embasamento.



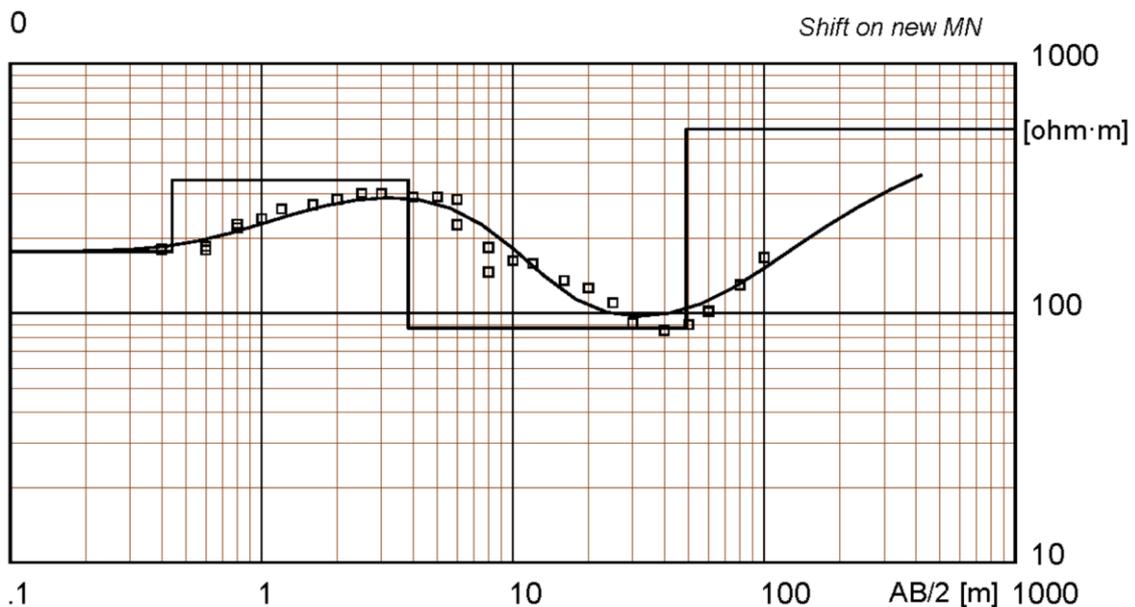
*Figura 5 - Localização da SEV 1*

# 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 6) resultou num modelo de 4 camadas geoeletricas.



**Location** X = 46°54'20.18" Y = 21°38'10.77" Z = 729 Azim = 0

<b>Model</b>			
<b>Resistivity</b>	<b>Thickness</b>	<b>Depth</b>	<b>Altitude</b>
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
176	.44		729
341	3.4	.44	728.6
87	45	3.8	725.2
545		49	680

Figura 6 - Modelo de camadas Geoeletricas da SEV 1

As tabelas de dados da SEV encontra-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, que almejava ter maior resolução da variação lateral de resistividade para investigar estruturas geológicas e maior alcance, em profundidade, já que era necessário identificar pelo menos uma interface vertical, quando possível o contato com o embasamento. Foram utilizados espaçamentos de 1; 3 e 5m e verificou-se que o espaçamento de 5m se adequava melhor as necessidades do projeto.

Na Linha 1 (Figura 7), espaçamento de 5m, foi verificado variação horizontal de resistividade e interfaces verticais.

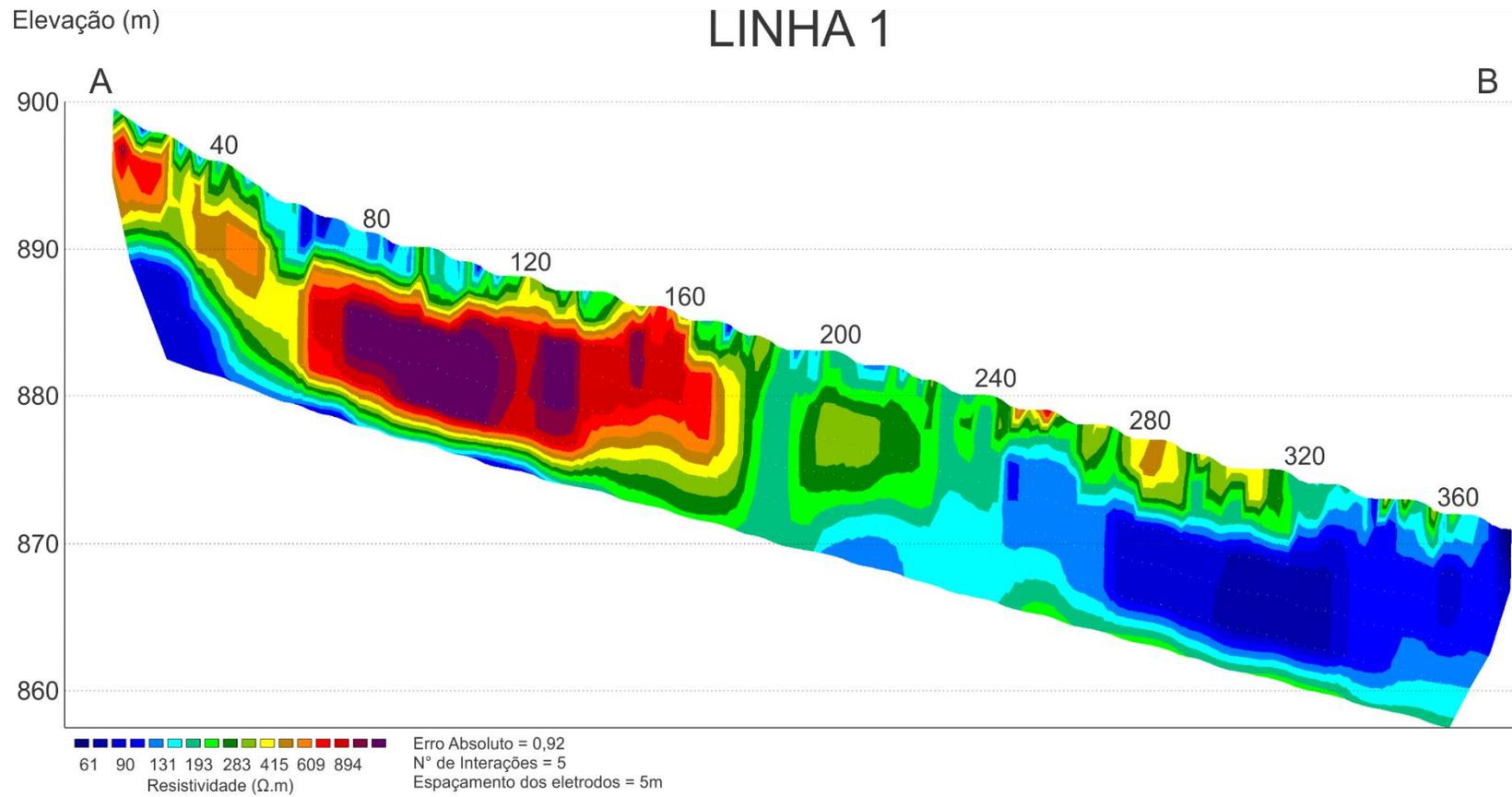


Figura 7 - Linha 1 com espaçamento de 5m entre os eletrodos

As Pseudo-Seções medida, calculada e Seção Invertida do CE encontra-se no apêndice.

# INTERPRETAÇÃO

## Sondagem Elétrica Vertical

A SEV 1 apresenta 4 camadas geelétricas que podem ser interpretadas (Telford et al., 1990) conforme Tabela 1 abaixo:

RES ( $\Omega$ .m)	Espessura (m)	Litologia Associada
176	0,44	Solo argilo-arenoso (Horizonte A)
341	3,4	Solo areno-argiloso
87	45	Solo arenoso saturado
545		Cristalino rochoso (embasamento)

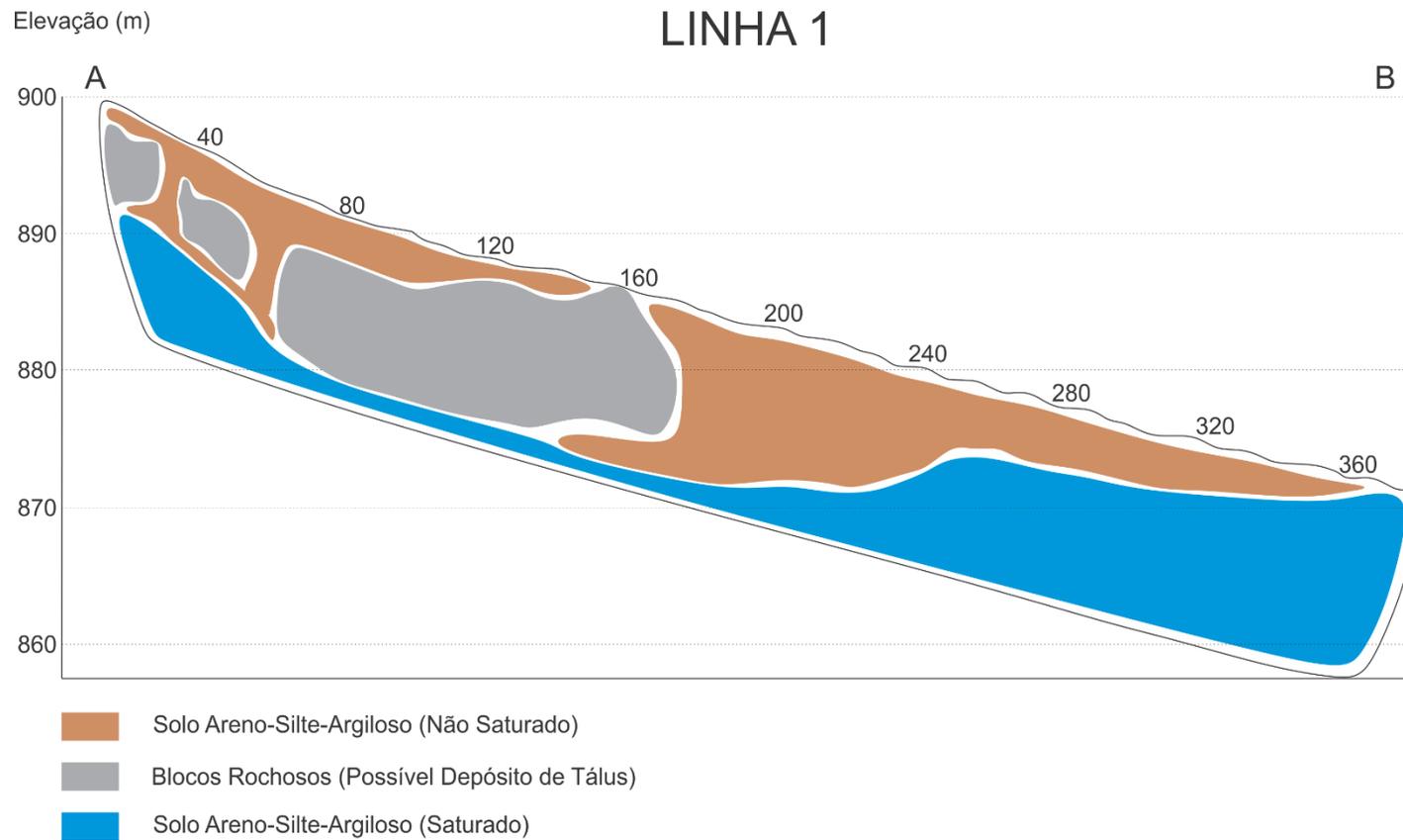
*Tabela 1 - Interpretação da SEV 1*

## **Caminhamento Elétrico**

A Linha 1 (Figura 8) tinha por objetivo mapear o depósitos de tálus. Salomão e Antunes (1998) descrevem estas formações como sendo. “Formados pela ação da água e, principalmente, da gravidade, compostos predominantemente por blocos de rocha de variados tamanhos, em geral, arredondados, envolvidos ou não por matriz areno-silto-argilosa, frequentemente saturada”.

Como podemos ver na interpretação da Linha 1, a região em azul e marrom, respectivamente, saturada e não saturada, correspondem a um solo areno-silte-argiloso. As regiões em cinza correspondem a blocos consolidados, não necessariamente blocos únicos, o método não tem resolução para detalhar a matriz entre os blocos, que na verdade podem ser aglomerados de blocos consolidados acumulados nestas regiões.

O fato de existir blocos consolidados sobre esse material reforça a ideia de que estes blocos foram parar naquela região por ação da gravidade. Além disto, a região é percolada por água, como podemos ver nas zonas em azul.



*Figura 8 - Linha 1 interpretada*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos colegas Rafael R. Severino e Anderson Dourado Rodrigues da Silva pela colaboração.

## **REFERÊNCIAS**

BRAGA, A.C.O., **Geofísica Aplicada: Métodos Geoelétricos 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.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos em pedologia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (edit.). **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 1998. p. 87-101.

## APÊNDICE

Field data and calculated values

<b>MN/2</b> [m]	<b>AB/2</b> [m]	<b>DeltaV</b> [mV]	<b>I</b> [mA]	<b>K</b> [-]	<b>Resistivity</b> [ohm·m]
.1	.4	32335.9	423	2.36	180
.1	.6	32995.6	979	5.5	185
.2	.6	32804.2	487	2.51	179
.1	.8	33074.9	1490	9.9	220
.19	.8	32731.2	765	4.99	227
.19	1	33554.2	1188	7.97	239
.19	1.2	33317.9	1576	11.61	261
.19	1.6	29398	2396	20.87	272
.19	2	14766.9	1794	32.77	286
.19	2.5	6385.8	1155	51.37	302
.19	3	8685.3	2273	74.11	301
.19	4	5571.6	2687	132	291
.19	5	5001.4	3749	206	292
.19	6	2932.1	3248	297	285
1	6	25228.9	3271	54.98	285
1	6	15067.9	3321	54.98	226
.19	8	1357.7	3318	529	146
1	8	7419.2	3631	98.96	183
1	10	5271.7	4594	156	162
1	12	3071.6	3974	225	158
1	16	1611	4327	401	135
4	16	6968.6	4327	94.25	135
1	20	707.6	3187	627	126
4	20	2994.5	3191	151	126
4	25	1723.6	3350	239	110
4	30	1116.6	3783	347	91.4
4	40	565	3678	622	85.2
4	50	295.5	2859	975	89.9
4	60	118.6	1458	1407	102
10	60	303.9	1470	550	101
4	80	123.9	2148	2507	129
10	80	319.9	2167	990	130
10	100	302.6	2507	1555	167

Figura 9 - Dados da SEV 1

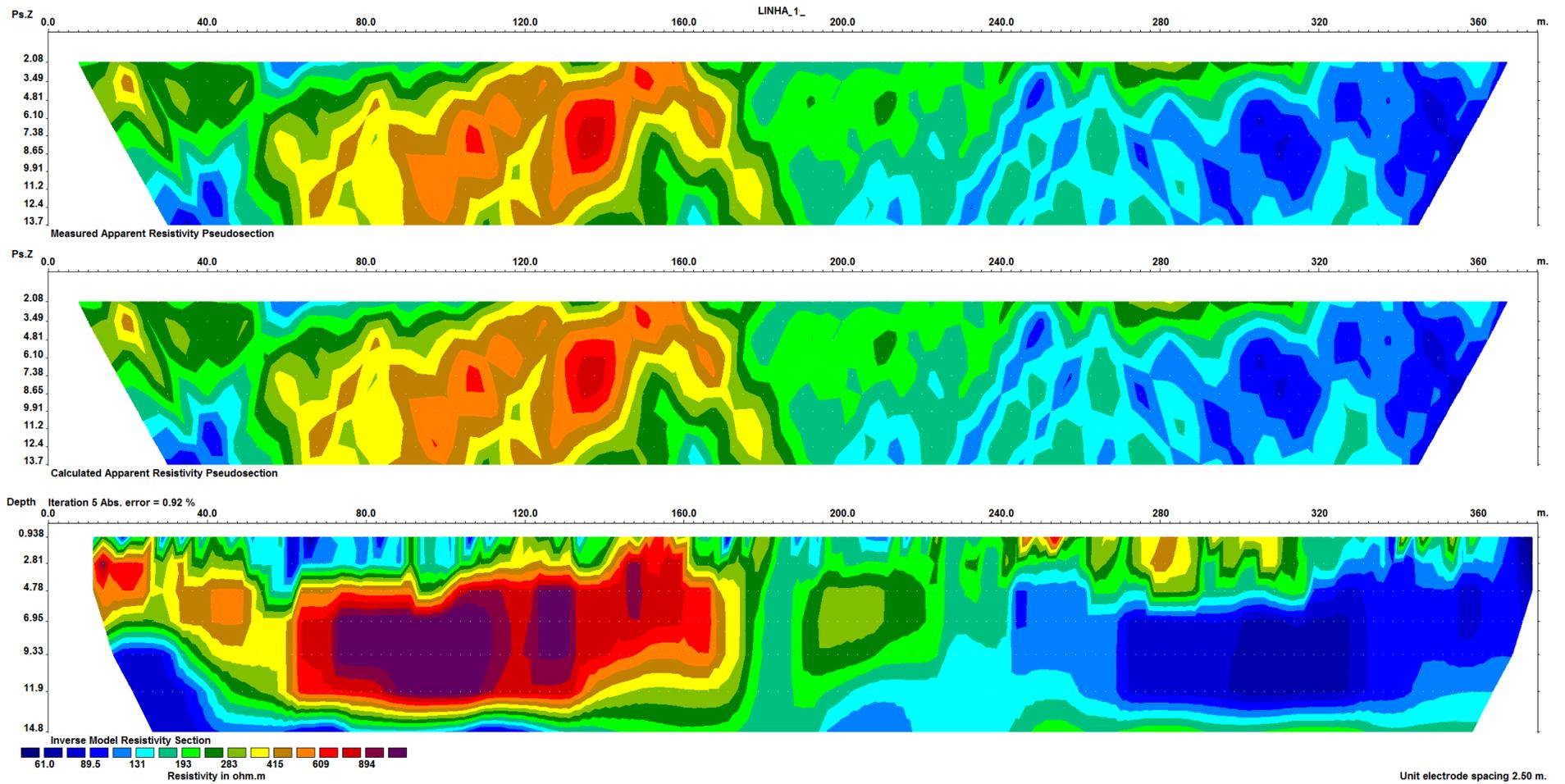


Figura 10 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1