



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETRORRESISTIVO NA AVALIAÇÃO GEOAMBIENTAL DA REGIÃO DE ALAGOINHAS, BAHIA

ROGÉRIO DE JESUS PORCIÚNCULA

SALVADOR – BAHIA

DEZEMBRO – 2007

**Aplicação do Método Eletrorresistivo na Avaliação Geoambiental da Região de
Alagoinhas, Bahia**

por

ROGÉRIO DE JESUS PORCIÚNCULA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

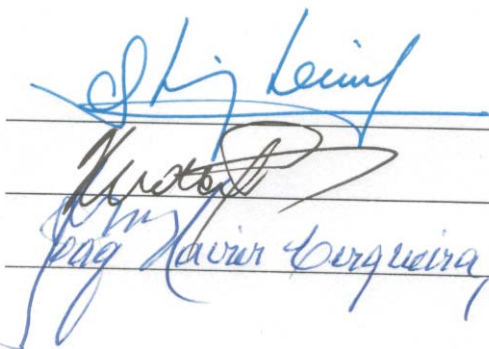
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

Three blue ink signatures are written on three horizontal lines. The first signature is 'O. Lima', the second is 'H. Sato', and the third is 'J. Cerqueira'.

Dr. Olivar Antônio Lima de Lima - Orientador

Dr. Hédison Kiuity Sato

MC. Joaquim Xavier Cerqueira Neto

Data da aprovação: 19/12/2007

Dedico aos meus pais,
Reginaldo Porciúncula de Jesus
e
Hilda de Jesus Porciúncula.

RESUMO

O presente trabalho discute os ensaios geofísicos de eletrorresistividade efetuados no município de Alagoinhas-BA com a finalidade de obter informações sobre as condições geoambientais da área e ampliar o conhecimento de sua hidrogeologia.

A área estudada contém um espesso e importante aquífero constituído por arenitos fluviais das Formações Marizal e São Sebastião. Esse sistema é explorado tanto para abastecimento urbano quanto para a fabricação de cerveja e refrigerantes. O desenvolvimento urbano e industrial do município está promovendo sérias alterações ambientais que podem comprometer a qualidade de seus recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Neste estudo geofísico, foram realizadas 59 sondagens verticais utilizando o arranjo Schlumberger com espaçamentos $AB/2$ de até 1000 m entre os eletrodos de corrente. Os resultados geoelétricos foram invertidos unidimensionalmente usando, de modo combinado, os 'softwares' RES1D e RESIST. Mapas de resistividade aparente e seções geológicas transversais foram construídas para representar a configuração estrutural do aquífero e mostrar a presença de possíveis zonas de contaminação.

ABSTRACT

This work discuss the geophysical experiment with the resistivity method performed in Alagoinhas county, BA. The goals were to gain informations about the environmental conditions of the area and to increase it hydrogeological knowledgement. The study area has a thick and important aquifer composed by fluvial sandstones of the Marizal and São Sebastião formations. This system is exploited both for urban supply as well as to fabricate bear and refrigerants. The urban and industrial development of the county is promoting enviromental changes that may endanger the quality of its water resources, both surface and underground.

In this geophysical study were performed 59 vertical eletrical sounding using the Schlumberger array up to a maximum $AB/2$ spacing of 1000 m. The geoelectrical data were inverted using the softwares RES1D and RESIST. Apparent resistivity maps and geological crossections were constructed to represent the structural aquifer geometry and to show the presence of possible water contaminations in it.

ÍNDICE

ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Caracterização Geológica	3
CAPÍTULO 2 Hidrogeologia básica	7
2.1 Distribuição das águas subterrâneas	7
2.2 Tipos de aquíferos	8
2.3 Tipos de água num meio poroso	9
2.4 Porosidade e Permeabilidade	9
2.5 Lei de Darcy	9
CAPÍTULO 3 Método Eletorresistivo	11
3.1 Potencial num meio homogêneo	12
3.2 Potencial num semi-espço homogêneo	14
3.3 Potencial num meio de multicamadas homogêneas horizontais	16
CAPÍTULO 4 Aquisição, Tratamento e Interpretação dos Dados	17
4.1 Aquisição dos dados	17
4.2 Processamento dos dados	18
4.3 Fontes de erro	19
4.4 Resultados	20
CAPÍTULO 5 Conclusões	31
Agradecimentos	32
Referências Bibliográficas	33
ANEXO I INVERSÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTI- CAIS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Mapa esquemático de localização da Bacia do Recôncavo.	3
1.2	Seção esquemática da Bacia do Recôncavo.	4
1.3	Mapa geológico da região de Alagoinhas.	6
2.1	Esquema da zona de aeração e zona saturada	8
2.2	Experimento de Darcy	10
3.1	Esquema do fluxo de corrente num meio homogêneo e isotrópico.	12
3.2	Esquema do fluxo de corrente num semi-espaço homogêneo e isotrópico. . . .	14
3.3	Esquema do Arranjo Schullumberger	15
3.4	Esquema do Arranjo Wenner	15
3.5	Esquema do arranjo dipolo-dipolo	16
4.1	Modelo do equipamento SYSCAL-PRO utilizado nos levantamentos em campo	18
4.2	Interpretação para a SEV-153	20
4.3	Interpretação para a SEV-165	21
4.4	Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 15m, (aproximadamente 7,5m de profundidade).	22
4.5	Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 50m, (aproximadamente 25m de profundidade).	23
4.6	Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 100m, (aproximadamente 50m de profundidade).	24
4.7	Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 200m, (aproximadamente 100m de profundidade).	25
4.8	Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 500m, (aproximadamente 250m de profundidade).	26
4.9	Mapa de localização das linhas AA' e BB' para os perfis geoeletricos.	28
4.10	Perfil geoeletrico referente a linha AA'.	29
4.11	Perfil geoeletrico referente a linha BB'.	30
I.1	SEV 110	35
I.2	SEV 111	36
I.3	SEV 112	36
I.4	SEV 113	37
I.5	SEV 114	37

I.6	SEV 116	38
I.7	SEV 117	38
I.8	SEV 118	39
I.9	SEV 119	39
I.10	SEV 120	40
I.11	SEV 121	40
I.12	SEV 122	41
I.13	SEV 123	41
I.14	SEV 124	42
I.15	SEV 125	42
I.16	SEV 126	43
I.17	SEV 127	43
I.18	SEV 128	44
I.19	SEV 129	44
I.20	SEV 130	45
I.21	SEV 131	45
I.22	SEV 132	46
I.23	SEV 133	46
I.24	SEV 134	47
I.25	SEV 135	47
I.26	SEV 136	48
I.27	SEV 137	48
I.28	SEV 138	49
I.29	SEV 139	49
I.30	SEV 140	50
I.31	SEV 141	50
I.32	SEV 142	51
I.33	SEV 143	51
I.34	SEV 144	52
I.35	SEV 145	52
I.36	SEV 146	53
I.37	SEV 147	53
I.38	SEV 148	54
I.39	SEV 149	54
I.40	SEV 150	55
I.41	SEV 151	55
I.42	SEV 152	56
I.43	SEV 153	56
I.44	SEV 154	57

I.45	SEV 155		57
I.46	SEV 156		58
I.47	SEV 157		58
I.48	SEV 158		59
I.49	SEV 159		59
I.50	SEV 160		60
I.51	SEV 161		60
I.52	SEV 162		61
I.53	SEV 163		61
I.54	SEV 164		62
I.55	SEV 165		62
I.56	SEV 166		63
I.57	SEV 167		63
I.58	SEV 168		64
I.59	SEV 169		64

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, o desenvolvimento agrícola e industrial, seus produtos e rejeitos estão se tornando, cada vez mais, agentes causadores de impactos ambientais e conseqüente contaminação de solos, águas subterrâneas e águas superficiais. O contato direto desses resíduos com as águas superficiais desfavorecem seu uso por tratamento e consumo. Com isso, as águas subterrâneas vêm sendo utilizadas para atender a demanda. No entanto, sua exploração sem um estudo prévio do ambiente hidrogeológico pode afetar seriamente a utilização da mesma.

A preocupação com os recursos hídricos põe a Geofísica como uma excelente ferramenta para a descrição e estudo racional de grandes áreas, dando informações sobre a extensão de áreas contaminadas, direções de fluxo subterrâneo, além de fornecer informações sobre a profundidade da zona saturada e do substrato rochoso. A natureza não invasiva, juntamente com o baixo custo operacional, rapidez e facilidade na aplicação, são parâmetros que caracterizam a eficácia do método eletrorresistivo nos estudos geoambientais.

No município de Alagoinhas-BA, os rejeitos sólidos urbanos são despejados num aterro sanitário que se localiza próximo a Rodovia BR-101 a uma distância aproximadamente de 12 km da zona urbana. Anteriormente, na mesma área compreendida atualmente pelo aterro sanitário, os rejeitos eram depositados num aterro simplificado. Além disso, a área conta com a presença de um curtume da empresa BRESPEL desde 1979.

Um enorme aquífero subjaz quase toda área do município de Alagoinhas. Dele é retirada água para atender às necessidades populacional, agrícola e industrial; o último com foco para a PETROBRÁS, SCHINCARIOL e BRESPEL. Durante o ano de 2004, um levantamento geofísico elétrico, realizado pelo CPGG/UFBA nas proximidades do aterro, permitiu delinear uma extensiva pluma de contaminação cobrindo mais de 1,5 km² abaixo do nível freático caracterizada por um baixo pH, baixas resistividades e polarizibilidades elétricas em função da elevada carga de sais dissolvidos (Pereira, 2004).

O presente trabalho tem o objetivo de ampliar as informações geoambientais e hidrogeológicas do município de Alagoinhas e suas adjacências, com a aplicação do método eletrorresistivo na forma de sondagens elétricas verticais utilizando o arranjo Schlumberger.

Alagoinhas situa-se no Nordeste da Bahia, entre as coordenadas geográficas 12°08'01" latitude sul e 38°25'25" longitude oeste. Possui cerca de 140 mil habitantes, tem altitude média de 132 m e uma área absoluta de 1179 km², distancia-se de Salvador em torno de

107 km . Os tipos climáticos que ocorrem incluem o úmido e subúmido com totais pluviométricos anuais de 1.280 mm e temperatura média anual de 24°C . Os principais setores de atividade econômica segundo o IPEA, (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) são os setores agropecuário e industrial. Seu nome vem das pequenas lagoas existentes na região.

Alagoinhas abriga o Centro Industrial de Sauipe, com destaque para as indústrias BRESPEL (de peles de caprinos e bovinos) e SCHINCARIOL (cervejas e refrigerantes). Destaca-se também na fruticultura, sendo a laranja o principal produto.

Sua vegetação bastante descaracterizada pelos desmatamentos, apresenta remanescentes da Floresta Estacional Semidecidual. Ocorrem ainda áreas de Cerrado e vegetação de transição para Caatinga. Predominam solos profundos ácidos e de baixa fertilidade natural, com frequência em Argissolos (Podzólicos) associados a Latossolos e Neossolos (areias quartzosas). Extensivas silviculturas de eucalipto e pinus desenvolveram-se nas décadas de 70 e 80 dentro da política de reflorestamento para atender a demanda de madeira e carvão vegetal do Pólo Petroquímico de Camaçari e do Centro Industrial de Aratu. O município pertence ao chamado Distrito Florestal do Litoral Norte, criado pelo Governo Federal por meio do Decreto Lei nº 76.046 de 1976, para coordenar as iniciativas dos plantadores de monoculturas de árvores e assim garantir sua inserção nos programas industriais de expansão da produção de aço e papel.

O trabalho é apresentado em cinco capítulos. O capítulo 1 contém informações gerais sobre a área estudada; no capítulo 2 são apresentados alguns conceitos hidrogeológicos básicos; o capítulo 3 inclui conceitos teóricos sobre o método eletrorresistivo; no capítulo 4 tem-se informações sobre as etapas de aquisição, interpretação e possíveis fontes de erros; e finalmente, no capítulo 5 destacam-se as conclusões.

CAPÍTULO 1

Caracterização Geológica



Figura 1.1: Mapa esquemático de localização da Bacia do Recôncavo.

A região de Alagoínhas está localizada na Bacia Sedimentar do Recôncavo que ocupa

uma extensão de 11500 km². Seus limites são dados pelo Alto de Aporá, a norte e noroeste, pelo sistema de falhas da Barra, a sul, pela falha de Maragogipe, a oeste, e pelo sistema de falhas de Salvador, a leste. Sua origem e evolução estão relacionadas com os vários estágios de estiramento crustal que resultaram na fragmentação do Gondwana, formação do Atlântico Sul e da margem continental brasileira, possui sistemas de grabens assimétricos alongados na direção NO-SE, implantados sobre rochas pré-cambrianas do cráton São Francisco, que foram gradativamente preenchidos por sedimentos continentais flúvio-lacustres.

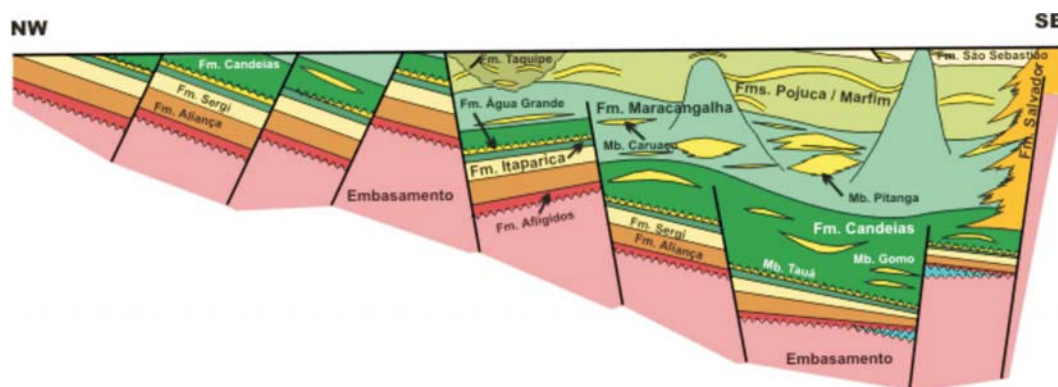


Figura 1.2: Seção esquemática da Bacia do Recôncavo.

Sua configuração estrutural é definida principalmente por falhamentos normais planares, com direção preferencial N30°E.

A cobertura sedimentar da área em estudo é composta de sedimentos originados das formações Quaternárias, Barreiras, Marizal e São Sebastião; esta última representa o aquífero mais importante da Bacia do Recôncavo.

Os sedimentos Quaternários constituem os sistemas deposicionais recentes, sendo representados por sedimentos inconsolidados de origem fluvial e eólica.

A Formação Barreiras de idade Terciária (Plioceno), tem seu sistema de deposição fluvial e de leques aluviais, e apresenta espessura de até 50 m. Compõe-se de areias finas a grossas, argilas cinza-avermelhadas, roxas e amareladas, ocorrendo sob a forma de extensos tabuleiros ligeiramente inclinados em direção à costa. Repousa em discordância erosiva sobre as rochas mesozóicas das bacias sedimentares e sobre o embasamento cristalino (Ghignone, 1979).

A Formação Marizal de idade Cretáceo (Pós-Aptiano) pertence aos sistemas de deposição do tipo leques aluviais e fluvial originados da erosão dos altos tectônicos. Recobre em discordância erosiva os arenitos da Formação São Sebastião, apresentando espessuras que variam de 0 a mais de 30 m. Compõe-se de arenitos grosseiros com estratificação cruzada de médio a grande porte, amarelados e avermelhados, intercalados com conglomerados de grãos de quartzo e fragmentos de rochas mal-selecionados, subarredondados a subangulares,

ocorrendo ainda, siltitos, folhelhos e calcários na região.

A Formação São Sebastião de idade Cretáceo (Aptiano-Barremiano) tem espessura de até 3000 m. Constituída de arenitos quartzosos mal-selecionados, amarelo-avermelhados friáveis, feldspáticos, intercalados com argilas silticas variegadas (Ghignone, 1979). Esta, as vezes aflorante, é bastante famosa por ser a mais importante reserva subterrânea de água na Bacia do Recôncavo. É sobreposta por camadas pertencentes às Formações Marizal e Barreiras e sedimentos recentes. Este conjunto constitui um modelo de um aquífero livre de grande importância regional.

Geralmente, os arenitos da Formação São Sebastião são bastante porosos e permeáveis, podendo-se considerar, os primeiros 500m desta Formação, como, arenitos com porosidade de 27,5% e permeabilidade de $1,80 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, (Lima, 1993). Ocorrem também algumas camadas de folhelho confinando o aquífero em algumas localidades.

De acordo com geólogos da Petrobrás, (Viana et al., 1971), a Formação São Sebastião é dividida em três membros: Paciência, Passagem dos Teixeiras e Rio Joanes.

- Membro Paciência: Constituído por arenitos de granulação fina a grossa, quartzosos, com matriz caulínica, apresentando colorações que variam de branco a cinza;
- Membro Passagem dos Teixeiras: Formado por arenitos cinzas, amarelos e rosados com camadas de siltitos, possuindo estratificações cruzadas, sendo, porém, mais comuns estruturas de escorregamento subaquosas;
- Membro Rio Joanes: Composto principalmente por arenitos vermelhos e amarelos, sendo comum a presença de estratificações cruzadas. Seus sedimentos podem estar recobertos de forma discordante pelos sedimentos da Formação Marizal e Grupo Barreiras, ou ainda pelas areias de dunas e de aluviões recentes.

O aquífero São Sebastião cobre uma área de 7000 km², o que é equivalente a 2/3 da área da Bacia do Recôncavo.

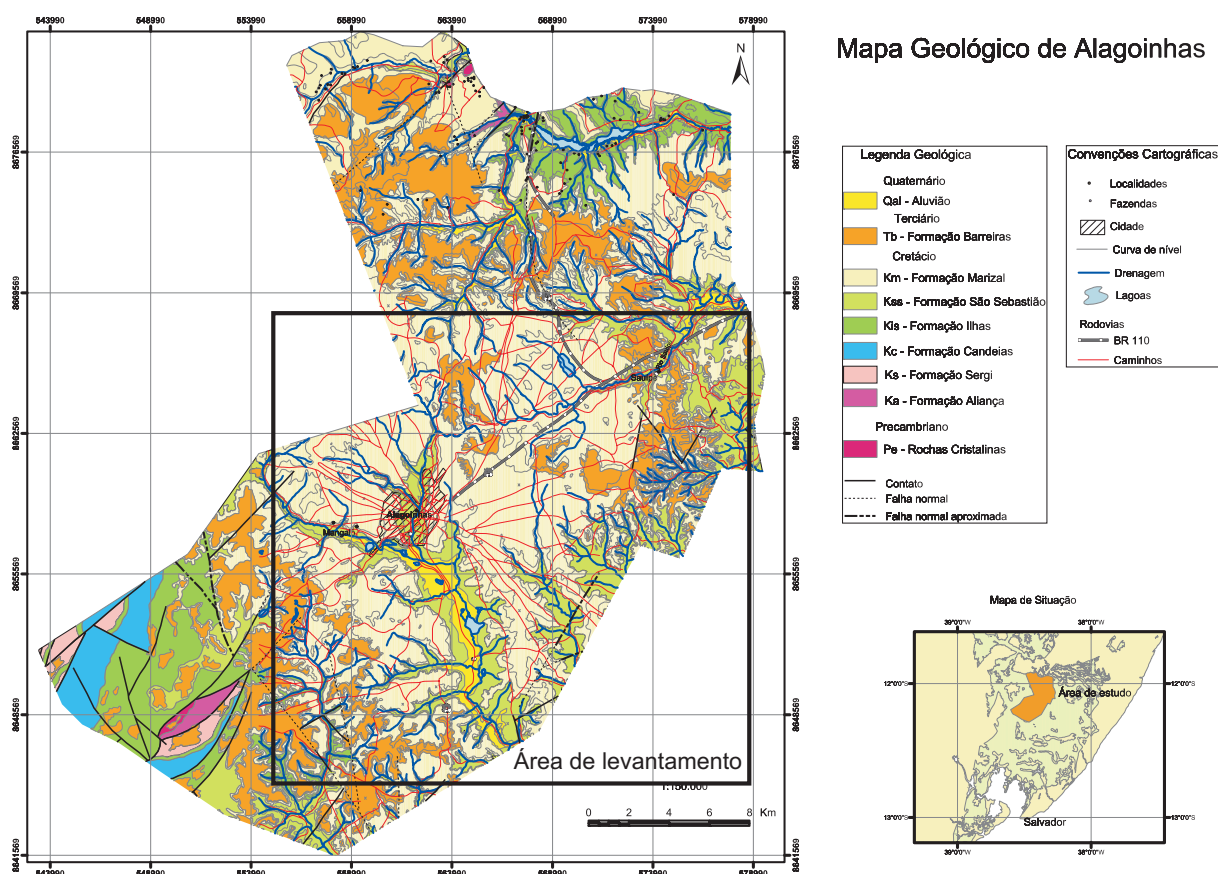


Figura 1.3: Mapa geológico da região de Alagoinhas.

CAPÍTULO 2

Hidrogeologia básica

A água é um componente fundamental para a vida, porém um recurso limitado e de valor econômico. Ela está presente na natureza em seus variados estados, ocupando cerca de 70% da superfície terrestre. Em sua ocorrência, apenas 2,5% é de água doce, e cerca de 68,9% deste total encontra-se em estado sólido nas calotas polares e cadeias de montanhas. Cerca de 29,9% está armazenada em aquíferos, o restante distribui-se na atmosfera, nos rios e nos lagos.

Compreende-se como ciclo hidrológico, um complexo sistema de armazenamento e transferência de água em seus diversos estados na Terra. Neste trabalho, o estudo dirige-se às ocorrências subterrâneas, pois as mesmas assumem significativa importância no contexto de atender a demanda de seu uso, necessitando assim, de uma maior e variada atenção em seu manejo.

A hidrogeologia é uma disciplina da geologia que estuda a ocorrência da água subterrânea e sua relação com o meio geológico, com base nas leis da Física e da Química.

2.1 Distribuição das águas subterrâneas

As águas subterrâneas ocorrem abaixo da superfície da Terra preenchendo os espaços vazios existentes nas formações geológicas. Do ponto de vista do armazenamento se caracteriza:

- Aquíferos: São formações geológicas constituídas por rochas capazes de armazenar e transmitir quantidade significante de água em seus interstícios;
- Aquícludes: São formações geológicas que contém água, mas não têm a capacidade de transmitir a mesma;
- Aquítores: São formações geológicas que contém água, mas a transmite de forma bem lenta;
- Aquífugos: São formações geológicas que não contém e nem transmite água.

A ocorrência da água nos poros das rochas, segue um certo padrão de distribuição. Este padrão separa a zona de saturação da zona de aeração ou zona vadosa. A primeira é caracterizada pela ocupação total da água nos interstícios e a última caracteriza-se pela ocupação parcial de água e ar nos interstícios. Pode-se incluir uma terceira zona, definida como zona capilar ocorrente na transição da zona de aeração à vadosa.

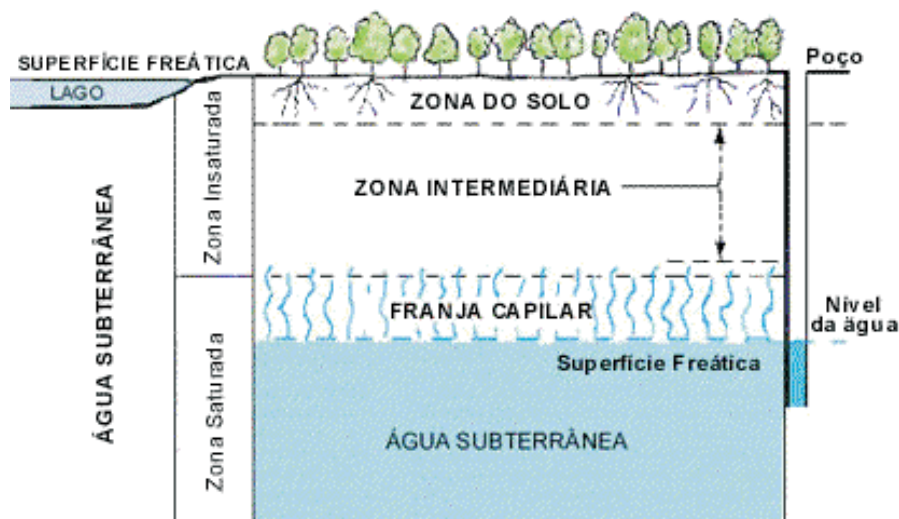


Figura 2.1: Esquema da zona de aeração e zona saturada

2.2 Tipos de aquíferos

Do ponto de vista geológico os aquíferos podem ser classificados como:

- Aquíferos porosos: Ocorrem em rochas sedimentares e constituem os mais importantes aquíferos pelo grande volume de água que armazenam.
- Aquíferos fraturados: Ocorrem nas rochas ígneas e metamórficas, onde a capacidade de acumulação de água está relacionada com a densidade e grau de interconexão das fraturas existentes.
- Aquíferos cársticos: São os aquíferos formados em rochas carbonáticas, submetidos à dissolução do carbono pela água, gerando grandes cavidades.

Do ponto de vista hidráulico, os aquíferos tem os seguintes comportamentos:

- Aquíferos livres ou freáticos: São os aquíferos nos quais a superfície freática é sujeita pressão atmosférica.

- Aquíferos confinados ou artesianos: São os aquíferos que estão confinados entre duas camadas semi-permeáveis ou impermeáveis, onde sua superfície piezométrica tem uma pressão superior a pressão atmosférica.

2.3 Tipos de água num meio poroso

A água ocorre naturalmente em meios porosos nas seguintes formas:

- Água pelicular: Ocorre como uma fina membrana de água que se estende em volta dos grãos sólidos, mantida por forças intermoleculares. Encontramos esta água na zona de aeração.
- Água capilar: É a água que fica retida por forças de natureza capilar. Esta água fica nos capilares do meio poroso, mais especificamente na zona de franja capilar.
- Água livre ou gravitacional: É a água livre, que por seu peso favorece a sua descida à superfície freática. Esta água ocupa a zona saturada.

2.4 Porosidade e Permeabilidade

Duas características são consideradas indispensáveis na descrição da qualidade de um reservatório, a porosidade e a permeabilidade.

A porosidade (ϕ) é definida como a quantidade de espaços vazios normalmente ocupados por fluidos contidos numa rocha. Ela pode ser expressa matematicamente pela razão do volume de vazios pelo volume total da rocha. A porosidade ainda pode ser classificada em porosidades primária e secundária: a primeira é adquirida durante o processo de formação da rocha, e a última é adquirida após a formação da rocha.

A permeabilidade (K) é a habilidade ou a capacidade de uma rocha em permitir o fluxo de um fluido no seu interior. Estes dois parâmetros são controlados pela forma, distribuição de tamanho, seleção e orientação dos grãos.

2.5 Lei de Darcy

A dinâmica da água num aquífero é expressa pela Lei de Darcy (1856), a mesma foi obtida empiricamente pelo engenheiro hidráulico francês, Henry Darcy em seus experimentos com o fluxo de água através de filtros de areia em tubo conforme o esquema:

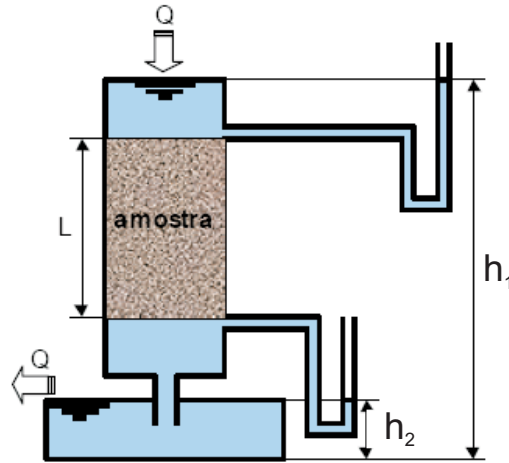


Figura 2.2: Experimento de Darcy

Com isso, Darcy conseguiu observar que o fluxo (Q) é diretamente proporcional a diferença do potencial hidráulico ($h_1 - h_2$); diminui com o aumento de tamanho do filtro (L) e aumenta com o aumento da área filtrante (A), isto é:

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (2.1)$$

ou

$$Q = -KA \nabla h \quad (2.2)$$

Fazendo $q = Q/A$, pode-se escrever a lei de Darcy na forma:

$$q = -K \nabla h \quad (2.3)$$

CAPÍTULO 3

Método Eletorresistivo

O método elétrico por resistividade foi desenvolvido por volta de 1915, mas tornou-se amplamente usado na década de 70. Seu emprego crescente se deu em proporção com a habilidade computacional para o processamento e análise dos dados. As técnicas desenvolvidas com este método podem ser utilizadas num extenso campo de trabalho, na exploração de águas subterrâneas, no monitoramento de plumas de contaminação, na engenharia, na exploração de minas, entre outras. Essas técnicas são divididas em sondagem elétrica e perfilagem elétrica lateral, que são empregadas de acordo com o interesse nas observações de variação vertical ou lateral, respectivamente.

Neste método se usa uma fonte artificial de corrente elétrica, a qual é introduzida no terreno através de dois eletrodos denominados (A e B). O procedimento envolve medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (M e N) locados na vizinhança do fluxo de corrente. Conhecendo a diferença de potencial entre (M e N) e a intensidade de corrente injetada, é possível determinar uma função resistividade aparente para a subsuperfície. A caracterização da resistividade elétrica que é o inverso da condutividade (medida da habilidade no transporte de cargas elétricas livres) depende da natureza e do estado físico dos materiais da subsuperfície. Do ponto de vista conceitual, uma rocha sedimentar é constituída de matriz (parte sólida) e poros (espaços vazios), sendo que a condutividade em solos e rochas pode ocorrer pela presença de materiais condutores em sua matriz, a qual chamamos de **condutividade eletrônica**; ou pela presença de fluidos condutivos contidos nos espaços vazios da rocha, a qual se denomina **condutividade eletrolítica**. Esta se deve ao movimento ordenado dos íons dissolvidos no fluido submetidos a um campo elétrico externo. Em geral a condutividade que prevalece neste estudo é a condutividade eletrolítica.

A resistividade dos ambientes geológicos é controlada por diversos fatores, alguns desses fatores são:

A porosidade, a composição mineralógica, o teor em água, a quantidade e natureza dos sais dissolvidos e temperatura do ambiente.

Archie (1942), trabalhando com rochas limpas (isentas de argila e/ou outros minerais

condutivos), com porosidades (ϕ) entre 10% e 28% e águas com 2.000 a 100.000 ppm, estabeleceu empiricamente a seguinte relação para a resistividade da rocha:

$$\rho_r = \phi^{-m} S^{-n} \rho_e \quad (3.1)$$

Onde:

ϕ é a porosidade efetiva, S a saturação de água, ρ_e a resistividade do eletrólito, m e n são constantes que em geral variam como: $1,3 \leq m \leq 2,5$ e $n \approx 2$.

O interrelacionamento entre temperatura, salinidade e resistividade do eletrólito de NaCl pode ser expressa por (Bateman, 1977).

$$\rho_{75F} = 10^{(3,562 - 0,955 - \log Sal_e)} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ_{e75F} - É a resistividade do eletrólito a 75°F ou 24°C.

Sal_e - Salinidade do eletrólito expressa em ppm equivalente a uma solução de NaCl.

De todas as propriedades físicas das rochas e minerais, a resistividade elétrica é que possui maior variação em seus valores, com isso é bem aceita no âmbito geológico.

3.1 Potencial num meio homogêneo

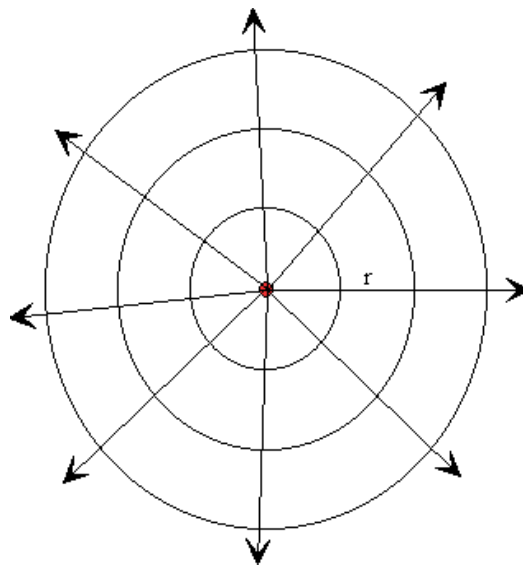


Figura 3.1: Esquema do fluxo de corrente num meio homogêneo e isotrópico.

Considere um fluxo de corrente contínua num meio homogêneo e isotrópico, situado em seu interior, gerado por uma fonte pontual. Seja δA uma área elementar perpendicular ao fluxo e $\vec{J}$ a densidade de corrente através da área total A . A corrente que atravessa δA é $\vec{I} = \vec{J}\delta A$.

Em condições estacionárias, $\nabla \cdot \vec{J} = 0$ e $\nabla \times \vec{E} = 0$, com E sendo um campo elétrico conservativo. Portanto, tem-se que $\vec{E} = -\nabla V$, onde V é o potencial elétrico gerado pela fonte. A lei de Ohm em meios isotrópicos e lineares de condutividade σ em (S/m) e $\vec{E}$ o campo elétrico em (V/m), estabelece que:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.3)$$

Num meio homogêneo σ é constante, a equação do potencial se torna:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.4)$$

Que é conhecida como a equação de Laplace, uma equação diferencial de segunda ordem.

Dada a simetria do problema, o potencial será uma função apenas de r . A equação de Laplace em coordenadas esféricas é:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (3.5)$$

Que resolvida em integrações sucessivas resulta em

$$V = -\frac{A}{r} + B \quad (3.6)$$

Com A e B como constantes a serem determinadas das condições de contorno do problema. No caso em pauta estas são: A condição de conservação da corrente no meio, da qual se abtém,

$$A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (3.7)$$

E para grandes distâncias da fonte, $V = 0$, logo, $B = 0$ de modo que

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (3.8)$$

ou

$$\rho = \frac{4\pi r V}{I} \quad (3.9)$$

3.2 Potencial num semi-espço homogêneo

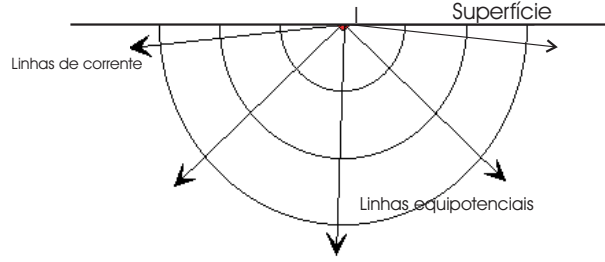


Figura 3.2: Esquema do fluxo de corrente num semi-espço homogêneo e isotrópico.

Considerando agora que a fonte de corrente esteja na superfície do semi-espço homogêneo, a corrente fluirá sobre uma superfície semi-esférica no meio inferior condutor, admitindo que o meio superior seja ar de condutividade, $\sigma = 0$, se obtem:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (3.10)$$

ou

$$\rho = \frac{2\pi r V}{I} \quad (3.11)$$

Usando um dispositivo de medida com quatro eletrodos, sendo dois de corrente, A(+I) e B(-I) e outros dois de potencial, M e N, com objetivo de obter a diferença de potencial entre M e N, ou seja $V_M - V_N = \Delta V$.

V_M terá a contribuição de A(+I) e B(-I). Por superposição:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] \quad (3.12)$$

Similarmente para V_N :

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] \quad (3.13)$$

de modo que

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (3.14)$$

ou

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (3.15)$$

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.16)$$

onde, $K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1}$ é o fator geométrico do arranjo de eletrodos utilizado. Esta expressão permite determinar a resistividade elétrica de um semi-espço

homogêneo a partir da diferença de potencial elétrico medido e da intensidade da corrente injetada conhecendo a geometria ou arranjo dos quatro eletrodos.

A expressão (3.16) é utilizada na prática para computar uma função resistividade aparente (ρ_a) para um meio qualquer e um dado arranjo de eletrodos que deve ser interpretado para observar a distribuição das resistividades verdadeiras no subsolo. Na literatura, temos alguns arranjos mais comuns aplicados em campo, que são:

- Arranjo Schlumberger

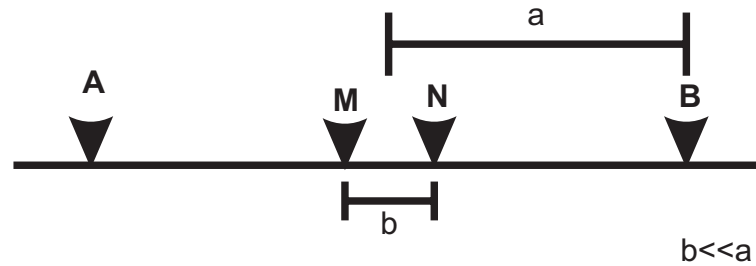


Figura 3.3: Esquema do Arranjo Schlumberger

Sendo, $AB/2 = a$ e $MN = b$

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad (3.17)$$

- Arranjo Wenner

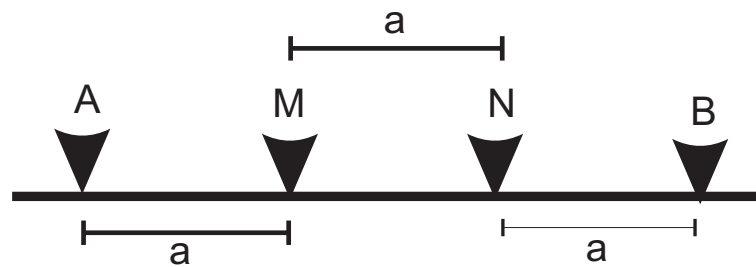


Figura 3.4: Esquema do Arranjo Wenner

Sendo, $AM = MN = NB = a$

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \quad (3.18)$$

- Arranjo Dipolo - dipolo

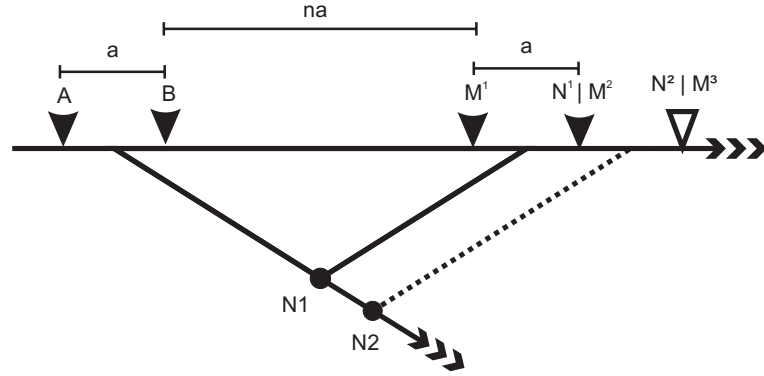


Figura 3.5: Esquema do arranjo dipolo-dipolo

Sendo $AB = MN = a$ e $BN = na$

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \pi a n (n + 1)(n + 2) \quad (3.19)$$

3.3 Potencial num meio de multicamadas homogêneas horizontais

As sondagens elétricas foram interpretadas usando ajustes automáticos dos dados observados a modelos de terra extensas e horizontalmente acamadadas.

Para uma estrutura de n camadas horizontais, a função resistividade aparente obtida em um arranjo Schlumberger de eletrodos é computada com auxílio da seguinte expressão:

$$\rho_{a,s} = a^2 \int_0^\infty K(\lambda) J_1(\lambda a) \lambda d\lambda \quad (3.20)$$

Onde λ , a variável de integração, possui dimensão inversa de comprimento, a é o espaçamento de eletrodos do arranjo, $J_1(\lambda a)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem um, $K(\lambda)$ é a função característica ou central (Kernel) de Slichter (Koefoed, 1979). A integral numérica da equação (3.20) é avaliada usando a teoria de filtragem linear digital proposta por Ghosh (1971).

CAPÍTULO 4

Aquisição, Tratamento e Interpretação dos Dados

4.1 Aquisição dos dados

Os dados foram obtidos por meio da aplicação da técnica da sondagem elétrica vertical utilizando o arranjo Schlumberger de eletrodos com espaçamentos $AB/2$ variando de 1,0 m até 1000 m. As sondagens foram centradas ao longo das principais estradas da área, em pontos selecionados com equidistância aproximada de 2 a 3 km.

Os equipamentos utilizados na aquisição foram os resistivímetros modelos Syscal R2 e Syscal-Pró, ambos fabricados pela Iris Instruments e de propriedade do CPGG/UFBA. Esses sistemas se compõem de uma unidade transmissora e uma unidade receptora, configuradas para realizar leituras simultâneas da resistividade e cargabilidade aparentes; uma bateria de 12 V atua como fonte de alimentação acoplada à unidade transmissora e conectada a um conversor DC-DC de 250 W, com saída que pode variar de 25 a 1000 V; eletrodos de aço para fazer contato com o terreno, (também foram utilizadas placas retangulares para reduzir a resistência de contato nos maiores espaçamentos); além de fios, cabos, carretéis e outros. Também foi de utilidade no campo o uso de três rádios Motorolas, afim de estabelecer comunicação entre o operador do SYSCAL e os auxiliares responsáveis pela mudança dos eletrodos de corrente.

As coordenadas UTM dos centros das sondagens foram obtidas por GPS, este, possibilitou a orientação das distâncias entre as SEVs.

O processo de aquisição de dados foi estabelecido durante quatro etapas, que se estenderam do dia 08/02/2007 ao dia 17/02/2007, do dia 16/04/2007 ao dia 26/04/2007, do dia 31/07/2007 ao dia 17/08/2007 e do dia 19/10/2007 ao dia 01/11/2007. Neste período foram realizadas 59 sondagens elétricas verticais.

No intuito de melhorar a qualidade dos dados, uma solução de água e sal de cozinha era aplicada nas regiões de contato dos eletrodos com o terreno. Assim, a resistência de contato diminui e permite um maior fluxo de corrente na subsuperfície.

Os dados obtidos foram anotados em uma tabela de dados e plotados num gráfico de ρ_a versus $AB/2$ numa escala bi-logarítmica para a obtenção da curva de campo. A qualidade dos dados foi controlada por meio de um procedimento conhecido como embreagem, e da observação do grau de suavidade das curvas.



Figura 4.1: Modelo do equipamento SYSCAL-PRO utilizado nos levantamentos em campo

4.2 Processamento dos dados

Medidas de resistividade normalmente são apresentadas e interpoladas (contornos de isovalores) sob a forma de pseudoseções (Hallof, 1957). Também, uma seção geoeletrica é obtida quando se aplica um processo de inversão nos dados das sondagens elétricas individuais. Esta corresponde a um modelo provável de distribuição de resistividade em subsuperfície e modelos de estruturas geológicas.

Os dados das SEVs foram invertidos através dos programas RES1D (da GEOTOMO software) e Resit 1.0. Para a construção dos mapas de resistividade aparente e das seções geológicas foram usados os programas SURFER 8.0 (da Golden Software) e CORELDRAW.

O Resist 1.0 é um programa de inversão de dados de eletrorresistividade desenvolvido por Vander Velpen (1988), da Delft University. Iterativamente, o programa procede o ajuste automático de um modelo de camadas plano-paralelas, até atingir um valor prefixado do desvio quadrático médio entre os valores da resistividade aparente teórica deste modelo e as medidas de campo. Portanto, é necessário estabelecer um bom modelo inicial para garantir a convergência e reduzir o número de iterações.

O Surfer 8 é um programa para interpolação de dados, e foi de extrema utilidade para a construção de mapas de isocontorno de resistividades aparentes para profundidades selecionadas aproximadamente a 7.5, 25, 50, 100 e 250m.

Antecedendo a inversão, foi estabelecida uma análise prévia dos dados, afim de melhorar a interpretação com redução de efeitos laterais. Para algumas curvas, foi necessário descartar ou interpolar pontos anômalos, ou suavizar a curva eliminando deslocamentos de ramos causados por efeitos laterais nos eletrodos de potencial. Estimativas iniciais sobre o número de camadas no modelo foi obtida com o programa RES1D na opção de não entrar com um modelo inicial. Nessa opção o RES1D inverte para um modelo com um grande número de camadas que é então reduzido pelo interprete, combinando as camadas com resistividades mais próximas.

4.3 Fontes de erro

Como todo método geofísico, o método eletrorresistivo também contém inúmeras fontes de erros. Estes, estão presentes tanto na aquisição quanto no tratamento e na interpretação dos dados.

Na aquisição, podemos citar as condições da topografia do terreno; erros nas medidas das distâncias entre os eletrodos; variações laterais de resistividade nos meios geológicos, efeitos das inclinações das camadas, existência de lentes de argilas ou calcários e etc. Enfim, as heterogeneidades das camadas influenciam bastante nas distorções nas linhas de fluxo e das superfícies equipotencial. A teoria básica dos métodos elétricos modela a subsuperfície como meios homogêneos e isotrópicos em camadas planas, paralelas e horizontalizadas, o que não acontece na prática.

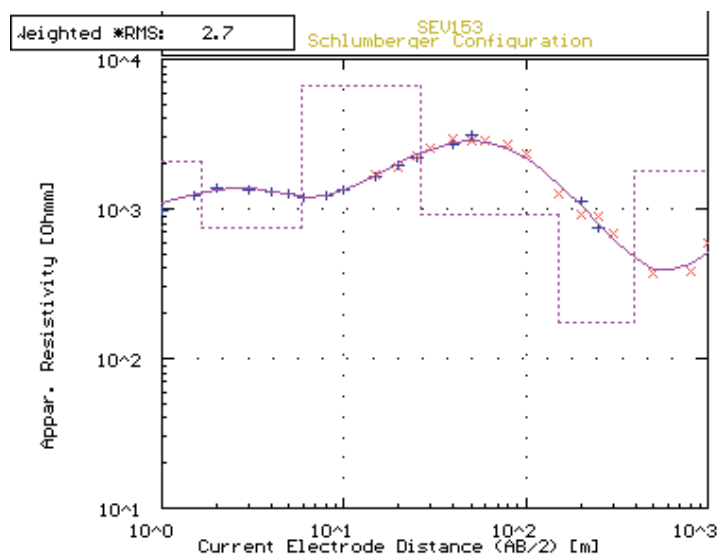
A topografia influencia fortemente as medidas de resistividade, podendo distorcer as superfícies equipotenciais, produzindo falsas anomalias e/ou ocasionando distorções nas anomalias reais. O fluxo da corrente é concentrado nos vales e espalhado nos morros. Em muitos casos, o efeito da topografia pode ser desprezível nos resultados, pois as variações de topografia podem ser pequenas em relação às variações da distância entre os eletrodos.

A resistência de contato também é um dos indutores de ruídos nos dados. Valores muito elevados reduz a intensidade da corrente injetada na terra e a precisão na medida de ΔV . As vezes, esta é reduzida com a aplicação de água salgada no ponto de fixação dos eletrodos. Podemos destacar também a disposição dos eletrodos como a falta de alinhamento, o mau contato com o terreno ou seu contato com “corpos estranhos” enterrados.

Na interpretação, os erros estão associados desde a sensibilidade humana na interpretação pessoal ou até mesmo a erros de digitação

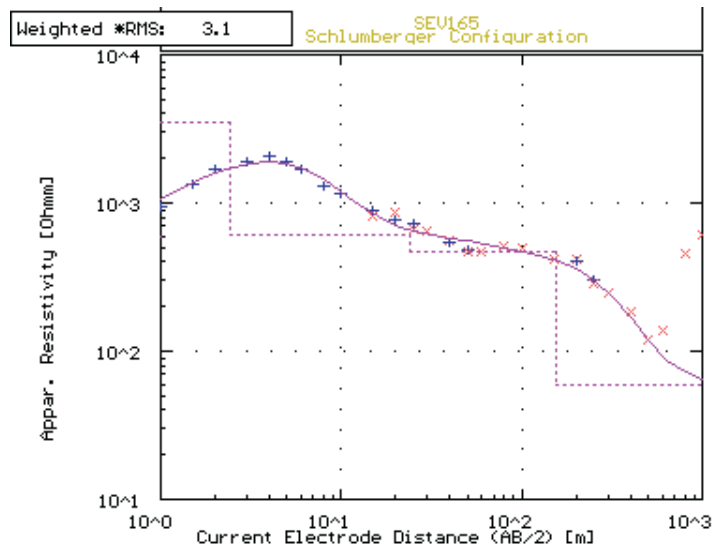
4.4 Resultados

As figura 4.2 e 4.3 mostram dois exemplos de curvas de sondagens típicas obtidas na área e seus modelos finais interpretados quantitativamente. Elas demonstram a presença em subsuperfície de dois grandes intervalos aquíferos constituídos por pacotes arenosos principalmente da Formação São Sebastião. Esses aquíferos estão separados por espessas seqüências eletricamente mais condutivas interpretadas como camadas de folhelhos contendo intercalações de siltitos e arenitos em proporções variadas (daí a ampla variação lateral de sua resistividade). Note que também não é difícil identificar nas sondagens elétricas a posição do nível estático da água subterrânea no aquífero superior. Os modelos finais interpretados para todas as curvas de campo (dados no Anexo) tiveram em geral erros próximos a 3%.



Resistividade	Espessura	Profundidade	Interpretação
744	0,4	0,4	Solo superficial
2065	1,2	1,6	Solo seco (Fm. Barreiras)
739	4,3	5,9	Solo seco (Fm. Barreiras)
6575,7	20,3	26,2	Zona de aeração (Fm. Marizal)
910,6	125	151,1	Zona saturada (Fm. S. Sebastião)
176,3	242,4	393,6	Zona saturada (Fm. S. Sebastião)
1771,9	-	-	Substrato resistivo (Fm. S. Sebastião)

Figura 4.2: Interpretação para a SEV-153



Resistividade	Espessura	Profundidade	Interpretação
591,9	0,4	0,4	Solo superficial (zona de aeração)
34793	2	2,4	Solo (Fm. S. Sebastião)
614,2	21,5	23,9	Zona saturada (Fm. S. Sebastião)
465,5	130,4	154,3	Zona saturada (Fm. S. Sebastião)
59,3	-	-	Camada argilosa (Fm. S. Sebastião)

Figura 4.3: Interpretação para a SEV-165

Os mapas de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 15 e 50 m estão mostrados nas figuras 4.4 e 4.5. Eles refletem variações de resistividade nas camadas mais próximas da superfície, até uma profundidade da ordem de 25 m. Distingue-se nesses mapas zonas bem definidas de elevada resistividade ($\rho_a > 2000$ ohm.m) de zonas mais condutivas de ρ_a entre 200 e 1000 ohm.m. Localmente se observam pequenas anomalias mais condutivas identificadas como manchas vermelhas nesses mapas. As zonas de resistividades mais altas correspondem as áreas de afloramentos das formações Marizal e Barreiras.

Nas figuras 4.6 e 4.7 são mostradas mapas das funções ρ_a observadas respectivamente com espaçamentos $AB/2$ de 100 e 200 m. Nesses casos, as profundidades de exploração situa-se aproximadamente entre 50 e 100 m, respectivamente. Ainda observa nesses mapas os efeitos resistivos das Formações Marizal e Barreiras, assim como um crescimento na extensão e na amplitude das anomalias mais condutivas observados nos mapas das figuras 4.4 e 4.5.

Na figura 4.8 mostra-se o mapa da função ρ_a para $AB/2 = 500$ m isto é para profundidades da ordem de 250 m aproximadamente. Nesse mapa se observa ainda áreas resistivas ($\rho_a > 200$ ohm.m), provavelmente associadas a maiores espessuras de arenitos localizados na parte superior da Formação São Sebastião. As áreas de resistividades mais baixas (< 100 ohm.m) refletem manifestações de espessos pacotes de folhelho que constituem a base regional do componente aquífero freático formado pelo acoplamento das Formações São Sebastião,

Marizal e Barreiras.

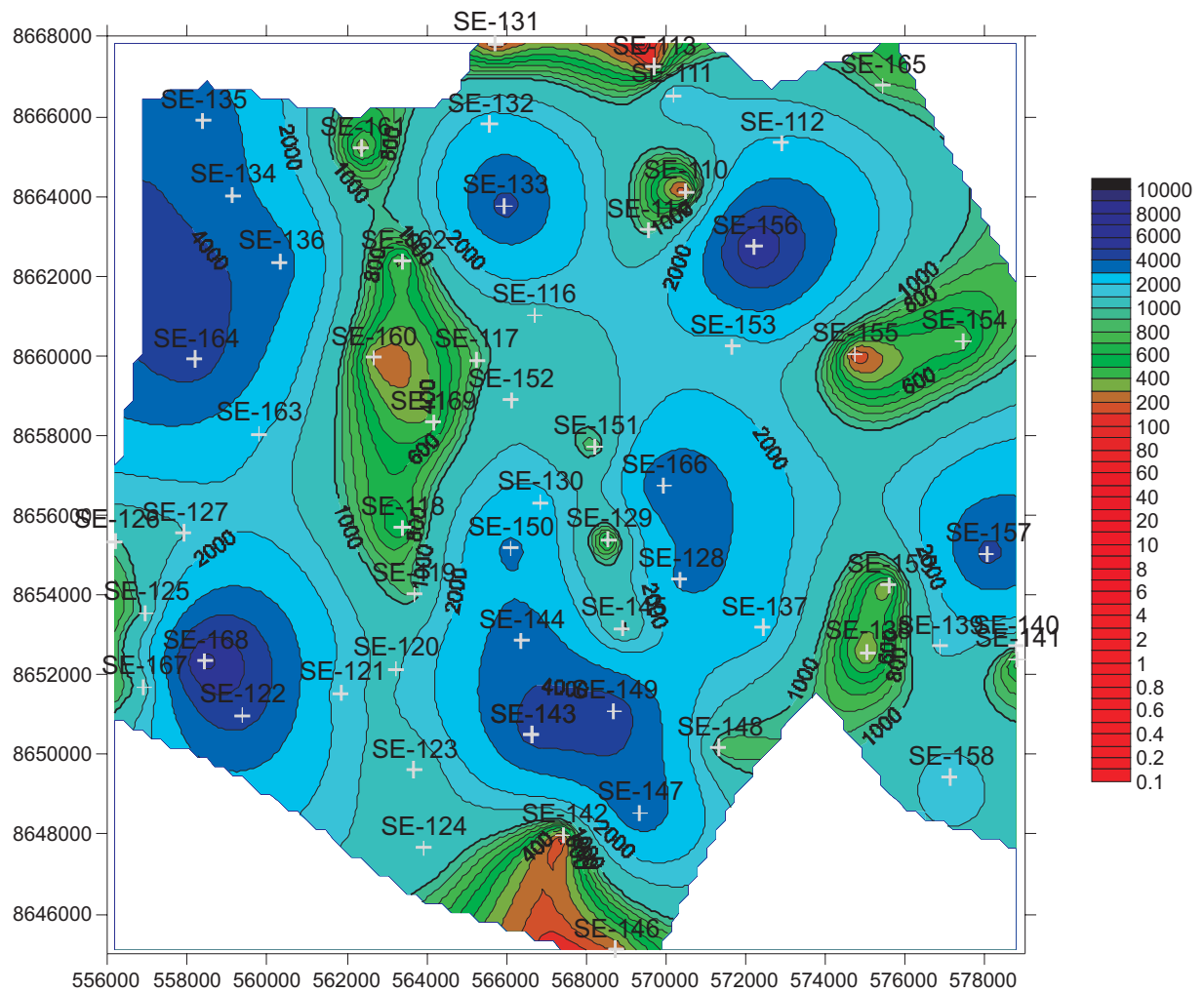


Figura 4.4: Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 15m, (aproximadamente 7,5m de profundidade).

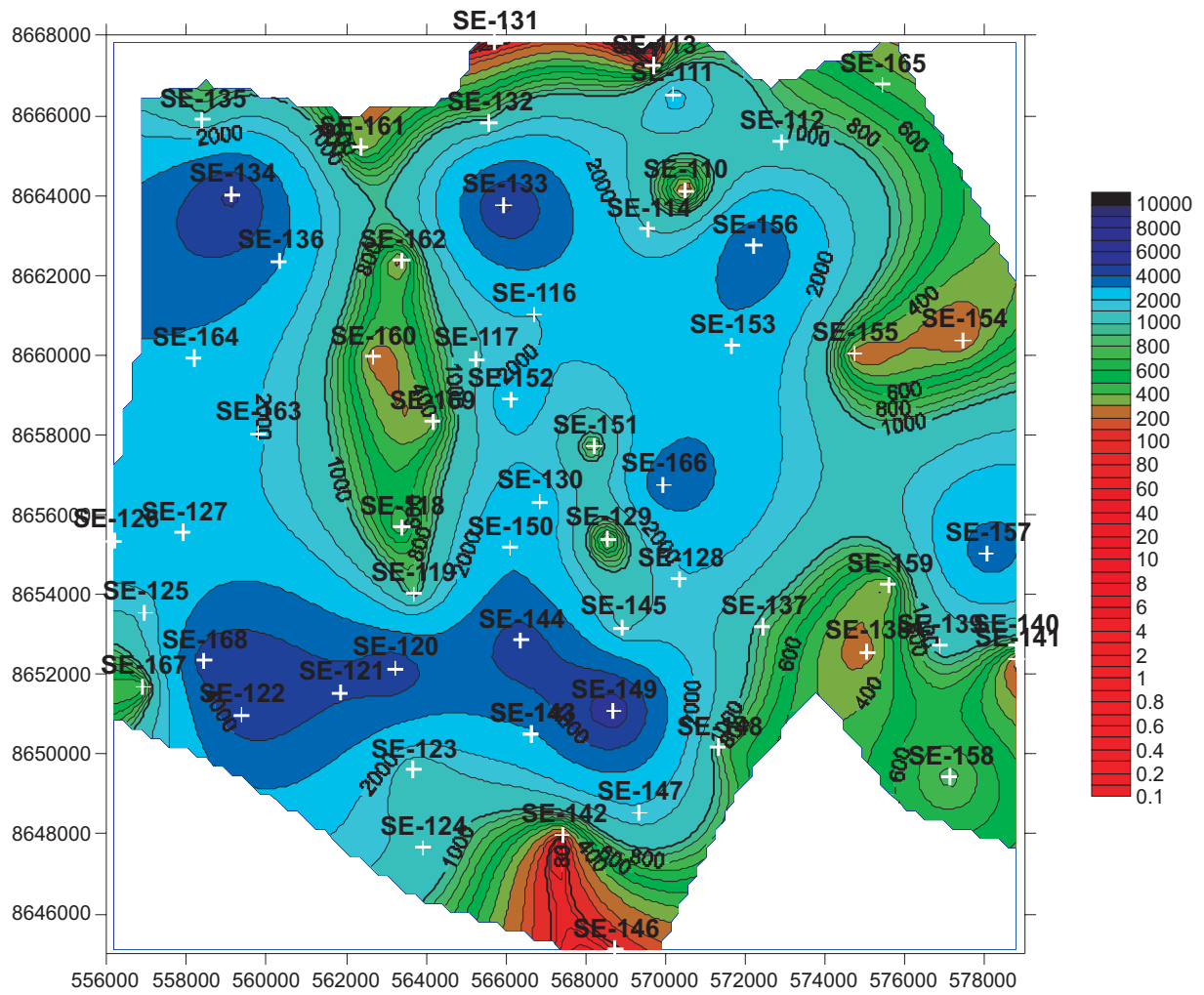


Figura 4.5: Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 50m, (aproximadamente 25m de profundidade).

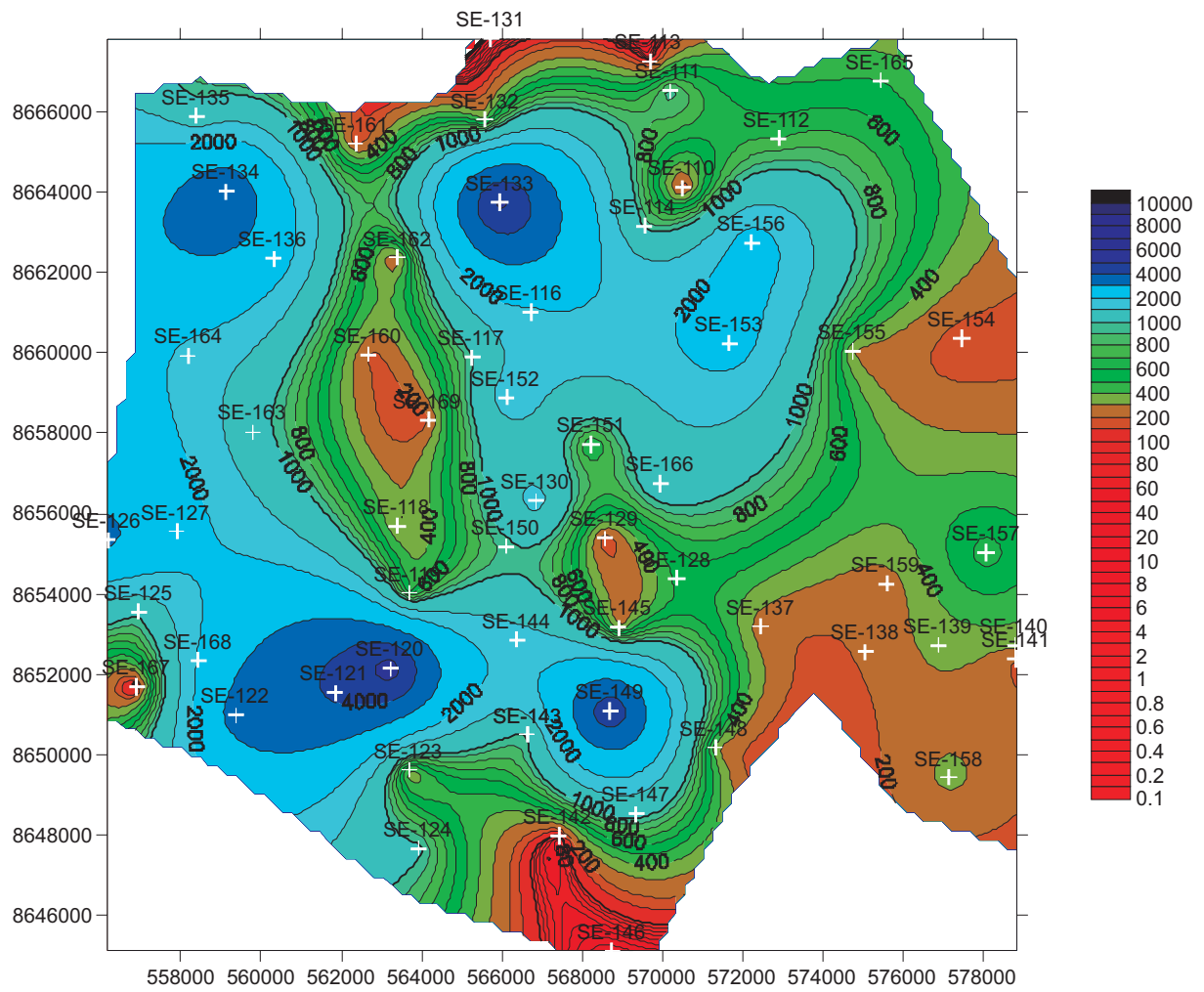


Figura 4.6: Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 100m, (aproximadamente 50m de profundidade).

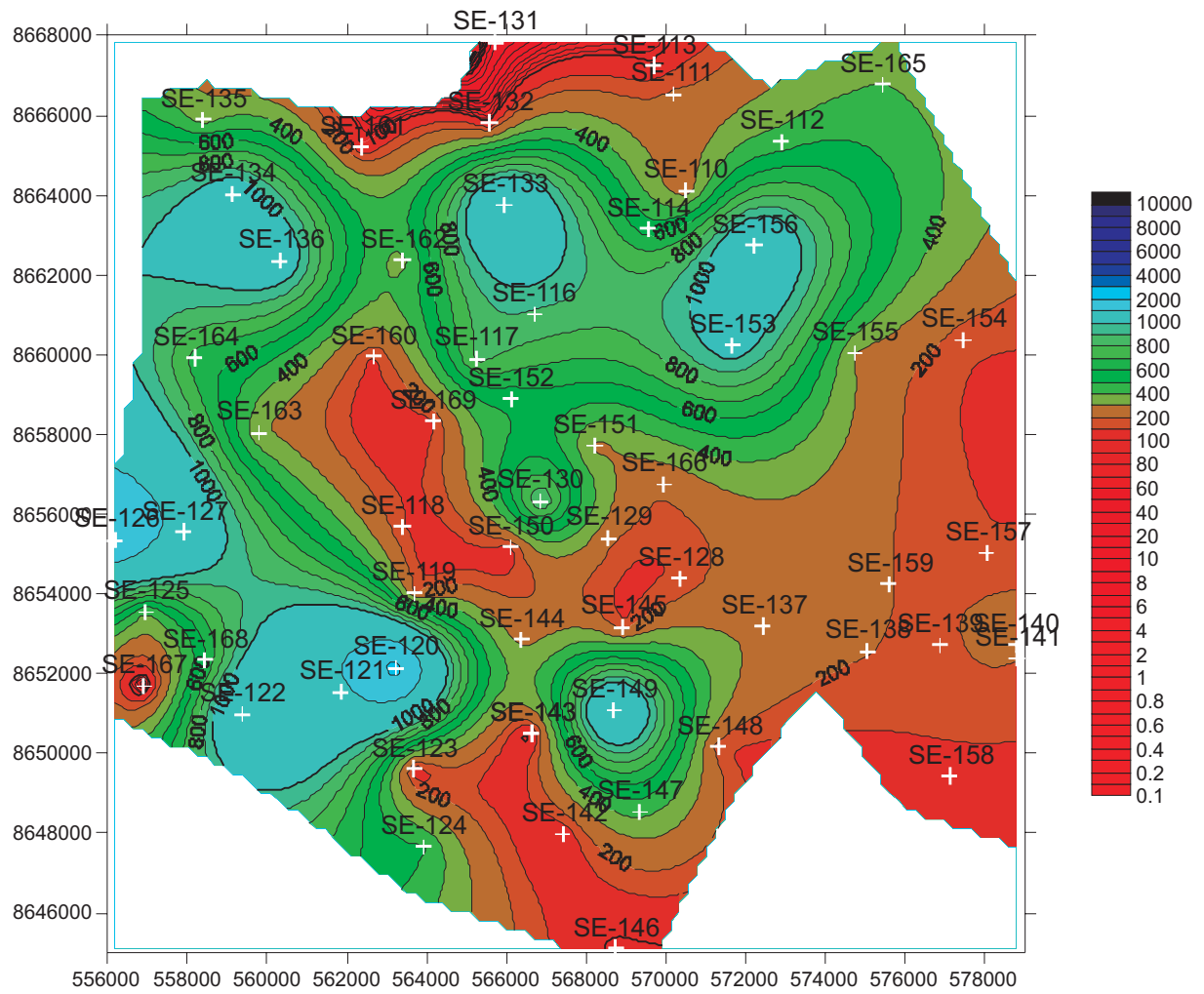


Figura 4.7: Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 200m, (aproximadamente 100m de profundidade).

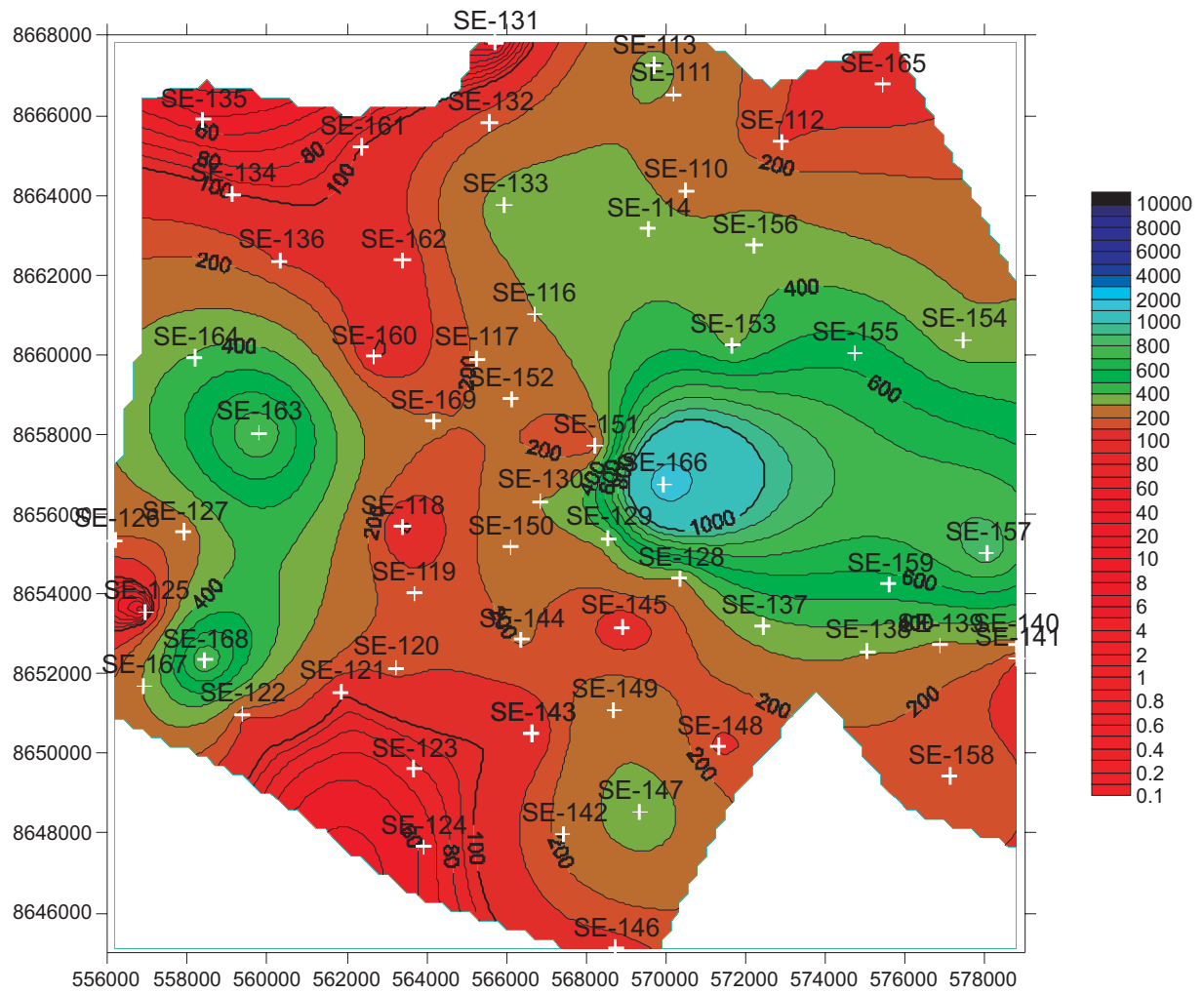


Figura 4.8: Mapa de isocontornos de resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 500m, (aproximadamente 250m de profundidade).

Dois perfis geoeletricos construídos com base nos resultados interpretados estão indicados no mapa da figura 4.9. A seção A-A', de orientação NE-SW refere-se aos dados das SEVs 165, 112, 110, 114, 115, 117, 169, 163, 127 e 125. A seção B-B' de orientação aproximadamente N-S, cortando a zona urbana de Alagoinhas compõe-se das SEVs 161, 162, 160, 169, 118, 119, 120, 123 e 124. Os resultados interpretados são mostrados na forma de perfis geológicos nas figuras 4.10 e 4.11. Nestes perfis se destacam a posição mapeada para o nível freático no intervalo aquífero superior representado pelo conjunto do topo da Formação São Sebastião (verde) com os arenitos Marizal (amarelo). O intervalo mais condutivo, com resistividades entre 28 e 150 ohm.m foi interpretado como pacotes mais argilosos de folhelhos com diferentes proporções de siltitos e arenitos intercalados. Abaixo desse intervalo argiloso encontra-se um segundo intervalo arenoso da Formação São Sebastião que constitui a parte superior do sistema aquífero confinado regional. As anomalias mais condutivas representadas em vermelho nas duas seções são interpretadas como zonas de contaminação no aquífero freático regional. Uma delas centrada em SE-110 é confirmada como uma pluma associada aos depósitos de lixo e ao curtume BRESPEL (Andrade, 2004). As anomalias centradas em SE-169, 160 e 162 parecem refletir zonas de contaminação associadas à disposição de esgotos da zona urbana, comercial e industrial da cidade de Alagoinhas. Esses resultados precisam ser confirmados com um levantamento geoeletrico de detalhe na zona urbana do município, bem como com perfurações de poços de monitoramento.

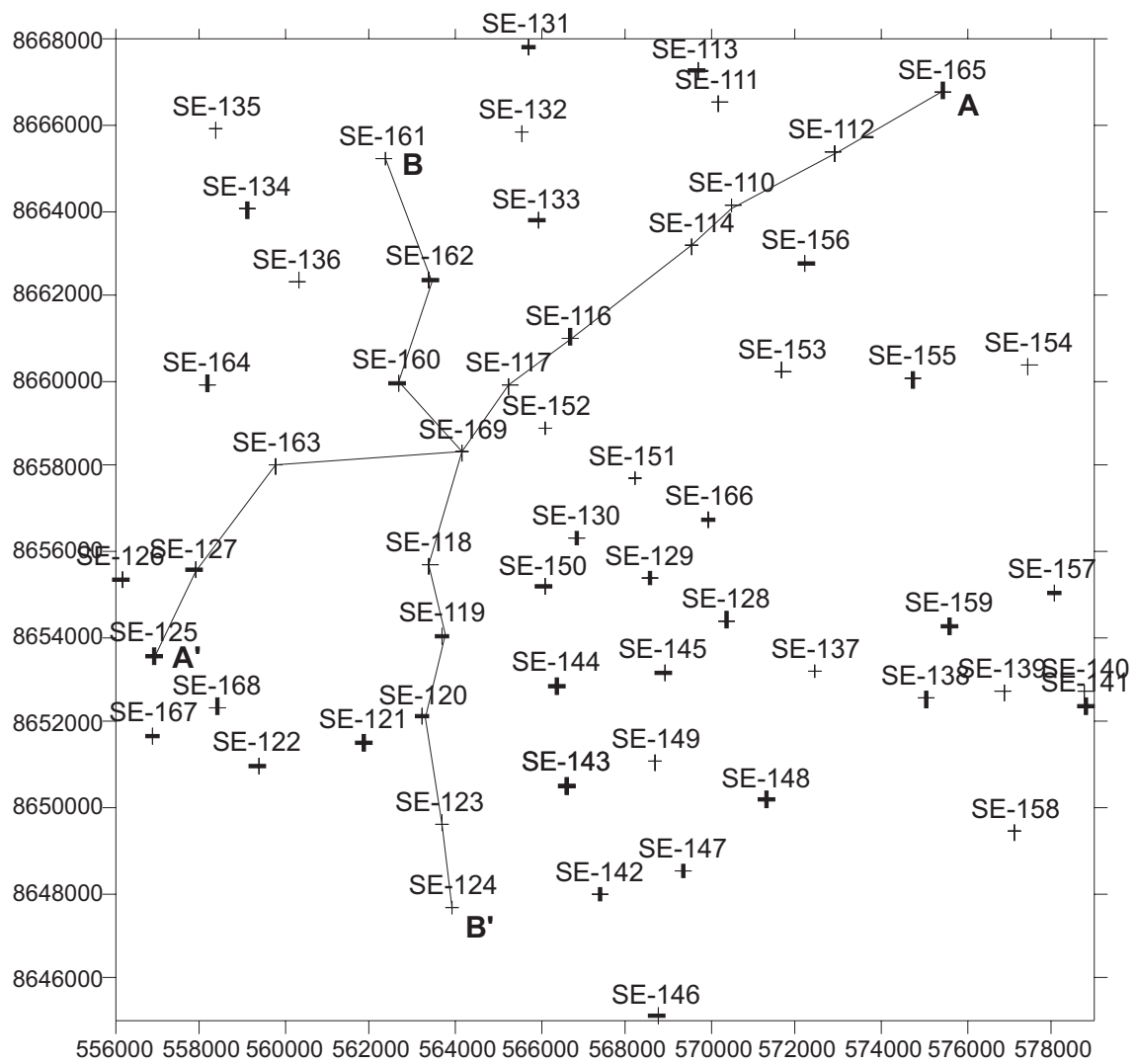


Figura 4.9: Mapa de localização das linhas AA' e BB' para os perfis geoeletricos.

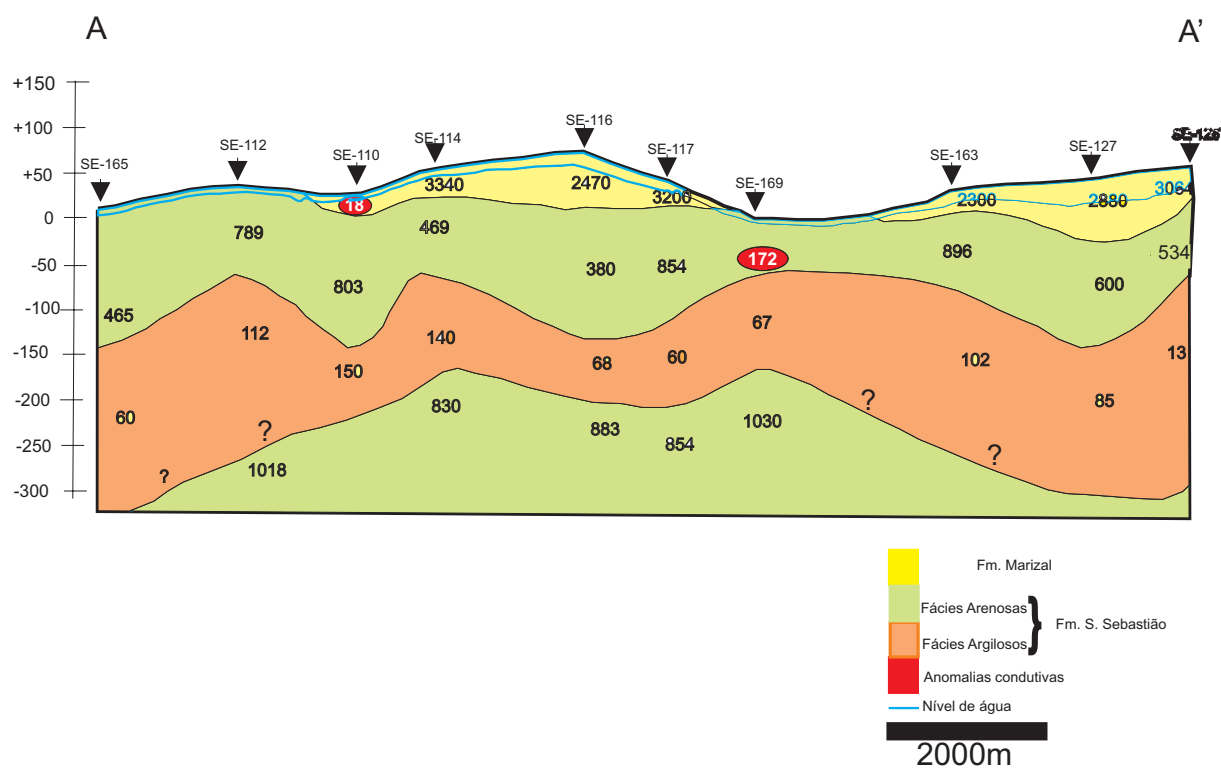


Figura 4.10: Perfil geoeétrico referente a linha AA'.

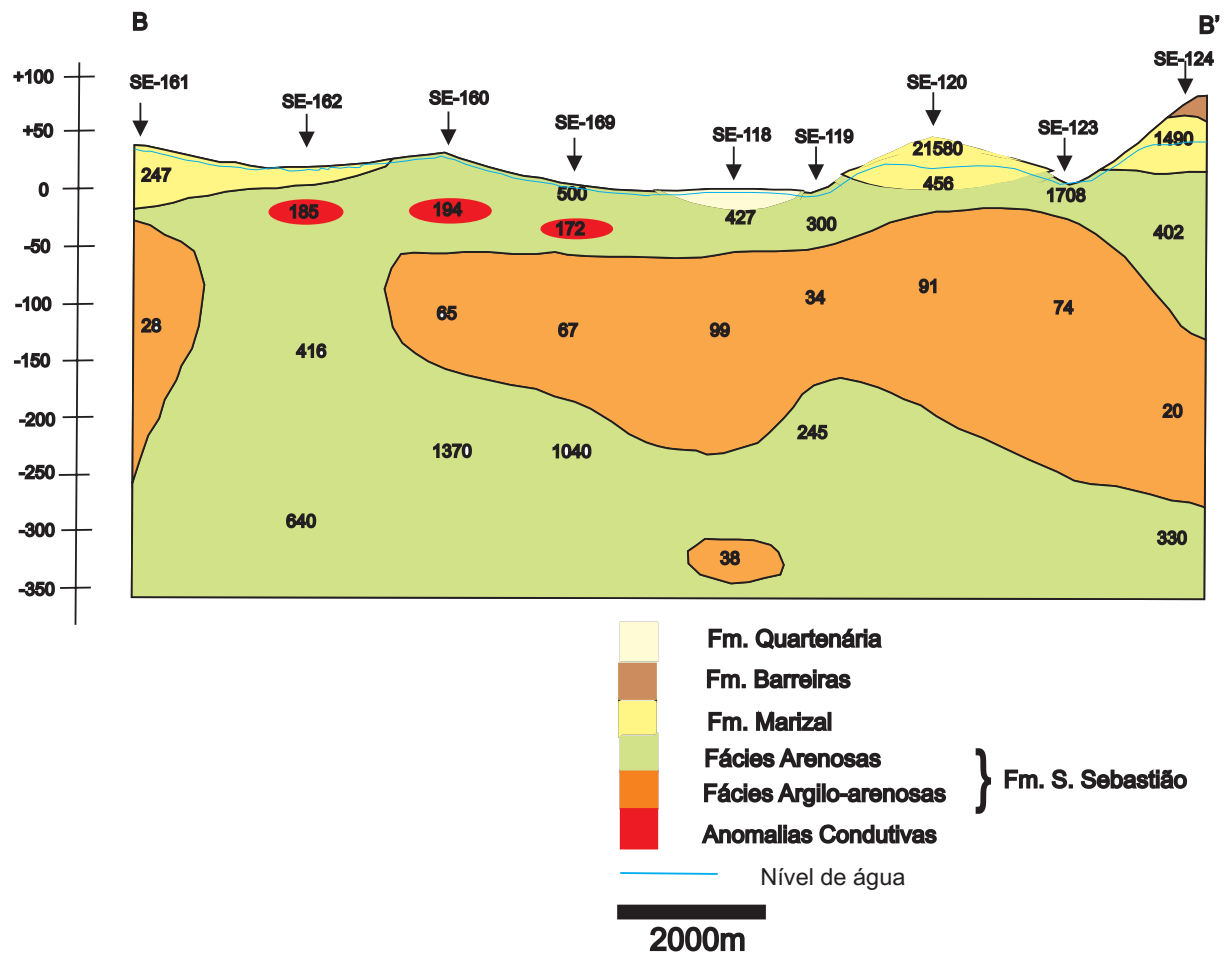


Figura 4.11: Perfil geoeétrico referente a linha BB'.

CAPÍTULO 5

Conclusões

O Método Eletrorresistivo mostrou-se eficiente no sentido de avaliar o ambiente hidrogeológico da região de Alagoinhas-BA, produzindo respostas importantes para a elaboração de modelos e estruturas hidrogeológicas. Destaca-se também alguns pontos indicativos de presença de contaminação no aquífero, além de promover informações sobre variações litológicas espaciais e profundidade do nível hidrostático em subsuperfície.

Os resultados permitiram destacar duas zonas de ocorrência de anomalias condutivas, uma próxima ao depósito de lixo e do curtume BRESPEL, anteriormente já identificada num estudo de detalhe realizado por Pereira (2004); e uma outra próxima a região urbana da cidade de Alagoinhas.

O modelo geoeletrico definido revelou que a Formação Marizal, em alguns lugares, tem ocorrência de espessuras superiores a 50 m, e que o aquífero pode ser dividido em dois tipos: livre em sua parte superior e confinado em sua parte inferior em algumas localidades, sendo ambos separados por uma espessa camada de folhelho intercalados com siltitos e arenitos.

O nível estático de água subterrânea varia com a topografia do terreno, podendo variar de cerca de 1,5 m nos vales, a mais de 25 m nas colinas.

Do ponto de vista científico, este trabalho geofísico de eletrorresistividade da área foi de extrema importância tanto para sustentar e promover estudos referentes aos recursos naturais, pois as intervenções humanas estão influenciando consideravelmente na sua degradação, especialmente de solos e recursos hídricos da região, quanto pelo treinamento e formação de pessoal nessa área de especialização geoambiental.

Agradecimentos

Agradeço em primeira mão a Deus e a minha família (Reginaldo, Hilda, Fabiana e Rodrigo), os quais me acompanharam integralmente nos momentos de minha vida.

Ao CPGG/UFBA por ter me prestado a oportunidade de realizar o presente trabalho e ao professor Olivar Lima que me orientou e me passou alguns de seu conhecimentos para a execução do mesmo.

À banca examinadora, pelas correções e críticas apontadas para melhoria do trabalho.

A Luis Medeiros que me acompanhou e me ensinou bastante os procedimentos de campo; aos meninos, Jorge e Daniel pelo o apoio prestado em campo.

À instituição UFBA e seus funcionários Joaquim Lago, Tiago, dona Ana, Marcelinho e companhia.

Aos meus amigos e colegas que influenciaram nas minhas concepções de vida.

A todos que assistiram à apresentação desta monografia.

Referências Bibliográficas

- Bear, J. (1972) Dynamics of fluids in porous media, Dover, New York.
- Braga, A. C. O. (1999) Métodos de prospecção em hidrogeologia, Apostila Interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro-SP., **24**.
- Braga, A. C. O. e Cardinali, M. T. (2005) Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos, Revista Brasileira de Geofísica, **23**:181–190.
- Cutrim, A. O. e Rebouças, A. C. (2005) Aplicação de sondagem elétrica vertical na estimativa do topo e da espessura de unidades geológicas da bacia do paraná na cidade de rondonópolis-mt, Revista Brasileira de Geofísica.
- Duarte, O. O. (2003) Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia., 2 edição, SBGF, Rio de Janeiro.
- Elis, V. R.; Barroso, C. M. R. e Kiang, C. H. (2004) Aplico de ensaios de resistividade na caracterização do sistema aufero barreiras / marituba em maceio-al, Revista Brasileira de Geofísica, **22**:101–113.
- Gandolfo, O. C. B. e Gallas, J. D. F. (2005) Eletrorresistividade 3d - uma avaliação preliminar da técnica, Revista Brasileira de Geofísica, **23**:191–198.
- Ghignone, J. I. (1979) Geologia dos sedimentos fanerozicos do estado da bahia, in: Geologia e recursos minerais do estado da bahia, Textos Básicos, SME/CPM, **1**.
- Koefoed, O. (1979) GEOSOUDING PRINCIPLES,1: Resistivity Souding Measurements, elsevier, Amsterdam-Oxford-New York.
- Lago, A. L.; Elis, V. R. e Giacheti, H. L. (2006) Aplico integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em bauru-sp., Revista Brasileira de Geofísica, **24**:357–374.
- Lima, O. A. L. (1993) Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the recôncavo-tucano basin, bahia - brasil, Geophysics, **55**:1347–1356.
- Lima, O. A. L. (2003) Geossistemas e recursos hídricos: gua subterrânea no estado da bahia., ANÁLISE E DADOS, **13**:391–402.
- Loke, M. H. (2001) 1-d resistivity, ip e sip, inversion an forward modeling, Manual.
- Moreira, C. A. e Dourado, J. C. (2005) Análise de contaminantes de fase liquida não aquosa (napls) por aplicação do método eletromagnético indutivo (em), Revista Brasileira de

- Geofísica, **23**:213–220.
- Moreira, C. A.; Dourado, J. C. e Braga, A. C. O. (2006) Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em uma Área contaminada por derivados de petróleo, *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**:383–392.
- Pereira, P. A. (2004) Alterações ambientais causadas por depósito de lixo urbano e curtume no município de Alagoinhas, Bahia, Dissertação de mestrado em geoquímica., Universidade Federal da Bahia, Bahia.
- Pereira, P. A.; Lima, O. A. L. e Rêgo, M. J. M. (2005) Estrutura elétrica da contaminação hídrica sob os depósitos de resíduos sólidos urbanos do município de alagoinhas, bahia.
- Reynolds, J. M. (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, England.
- Sato, H. K. (1993) Potencial elétrico devido a uma fonte de corrente no interior de um semi-espaço heterogêneo, In: *Resumos Expandidos, 30. Congr. Intern. da SBGf*, vol. 1, pp. 1358–1362, Rio de Janeiro, SBGf.
- Sato, H. K. (2006) Métodos geofísicos elétricos, Notas de aulas.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Viana, C. F.; Gama, J. E. G.; Simões, I. A.; Moura, J. A.; Fonseca, J. R. e Alves, R. J. (1971) Revisão estratigráfica da bacia recôncavo-tucano, *Boletim Técnico da PETROBRÁS*, **14**:157–192.

ANEXO I

INVERSÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS

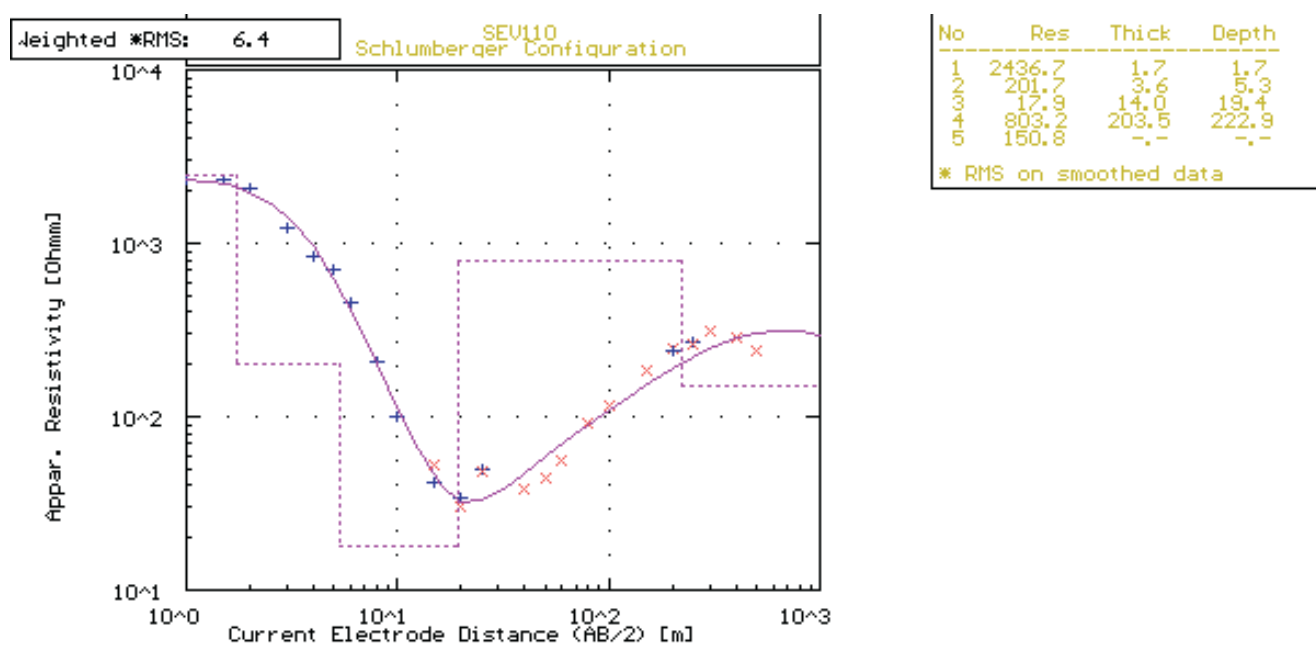
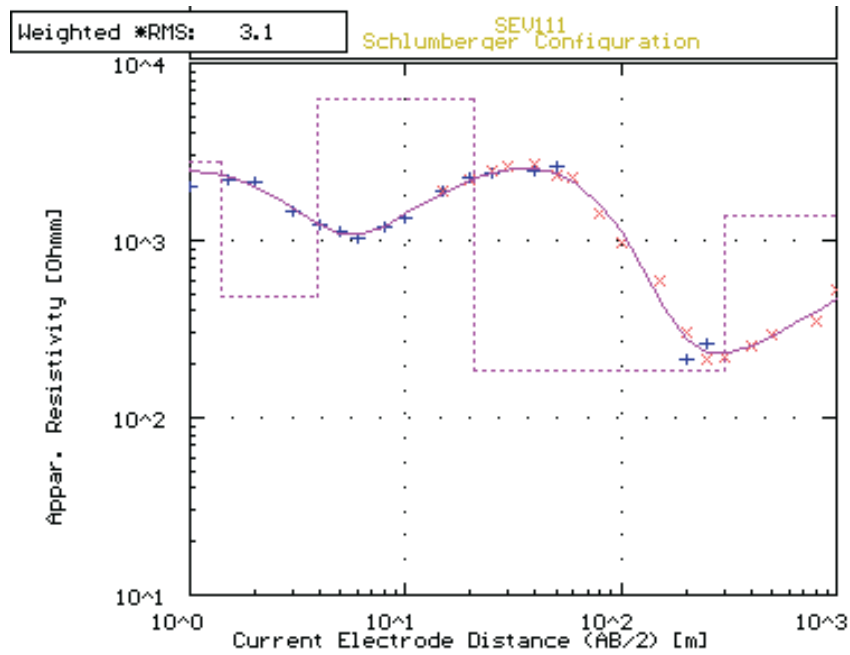


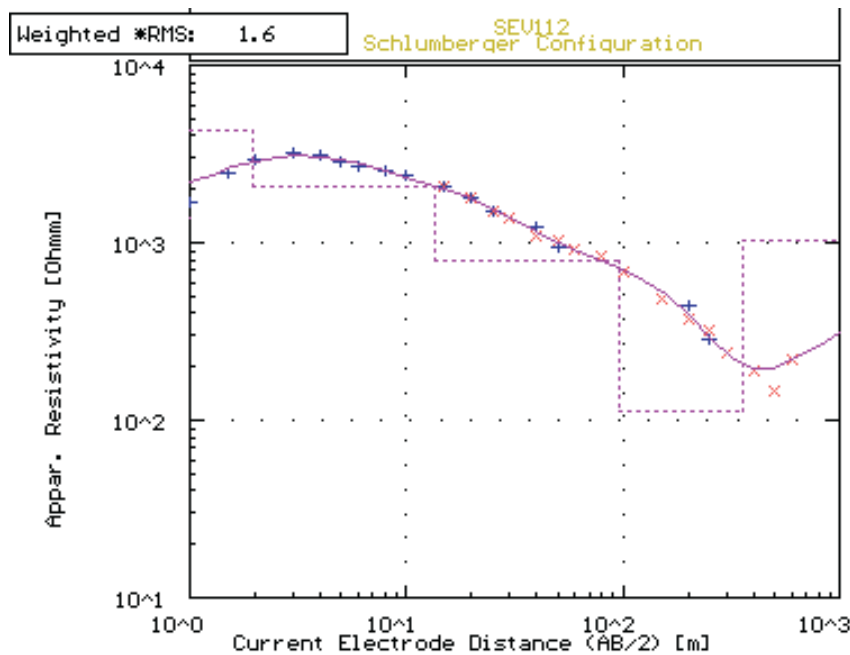
Figura I.1: SEV 110



No	Res	Thick	Depth
1	2538.4	0.7	0.7
2	2789.5	0.7	1.4
3	476.0	2.5	3.9
4	6204.9	16.9	20.7
5	181.9	279.4	300.1
6	1371.6	-	-

* RMS on smoothed data

Figura I.2: SEV 111



No	Res	Thick	Depth
1	1359.1	0.4	0.4
2	4335.1	1.6	2.0
3	2070.7	11.7	13.7
4	788.7	83.0	96.7
5	111.5	256.2	352.9
6	1018.4	-	-

* RMS on smoothed data

Figura I.3: SEV 112

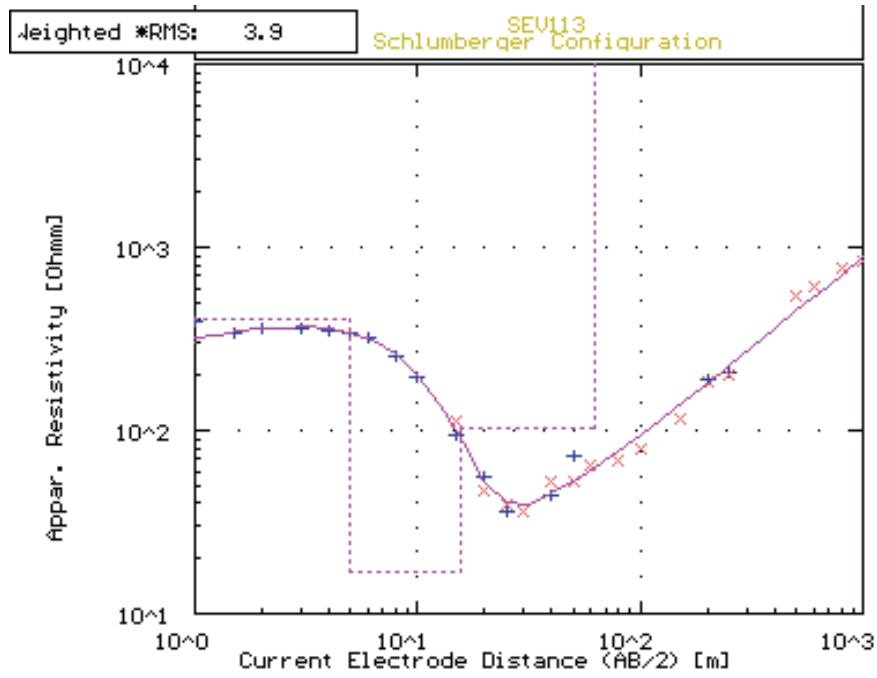


Figura I.4: SEV 113

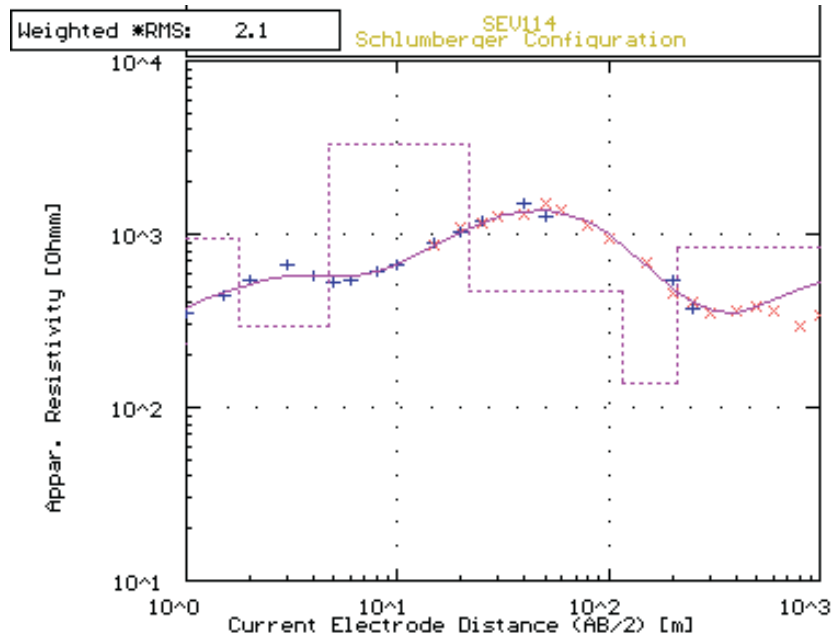
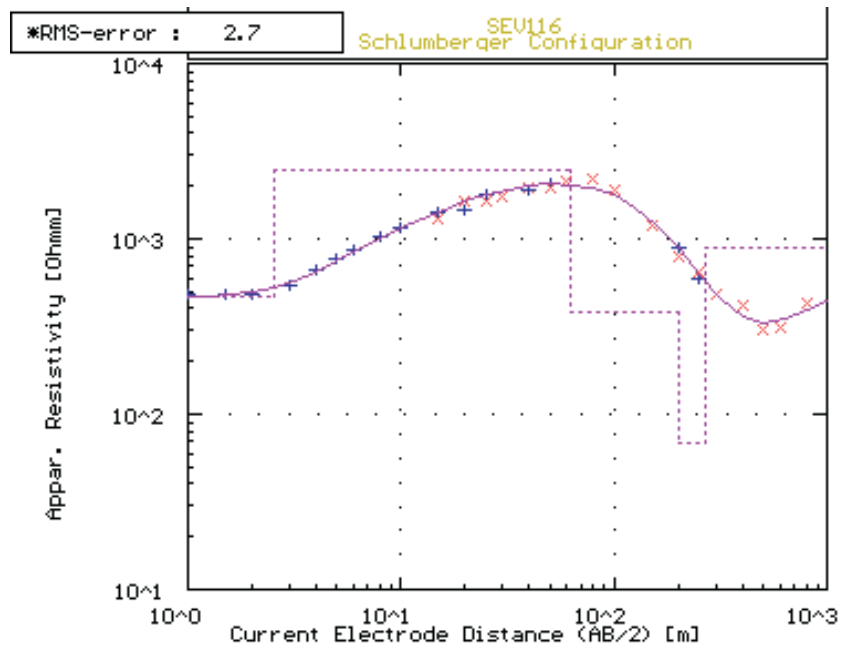


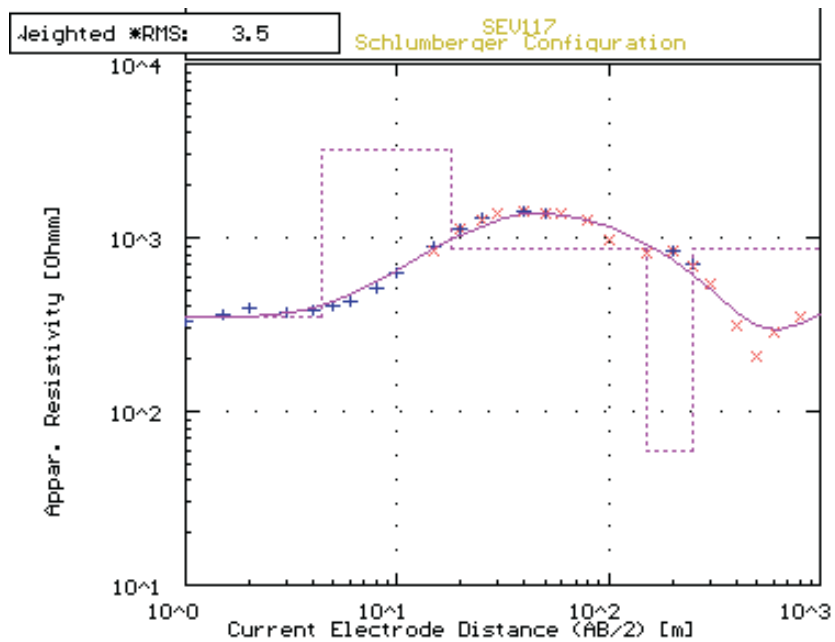
Figura I.5: SEV 114



No	Res	Thick	Depth
1	463.3	2.5	2.5
2	2470.6	60.6	63.1
3	378.7	140.2	203.3
4	68.5	65.0	268.3
5	883.6	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

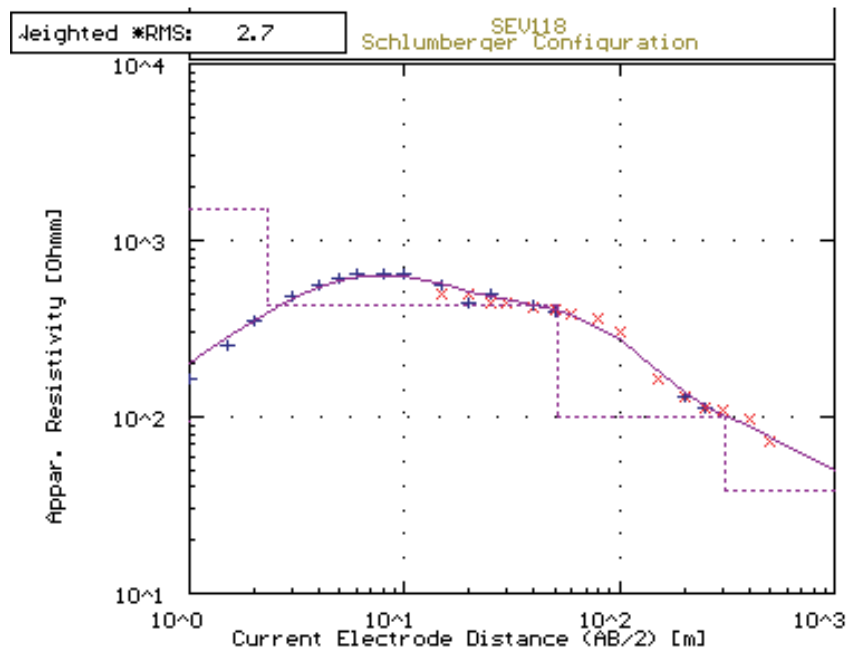
Figura I.6: SEV 116



No	Res	Thick	Depth
1	345.8	4.4	4.4
2	3205.1	13.6	18.0
3	854.2	132.7	150.7
4	59.6	96.6	247.2
5	853.6	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

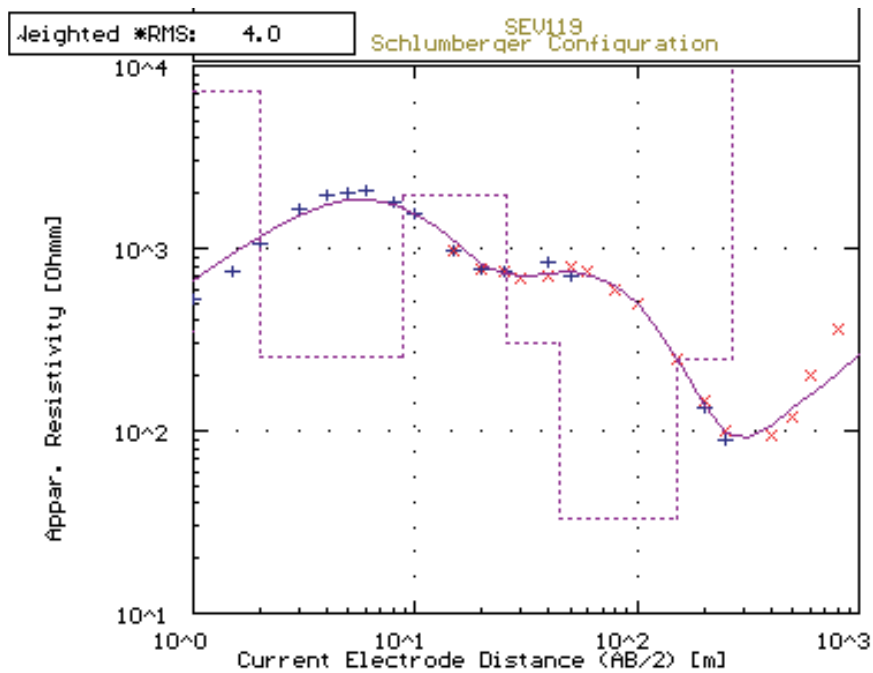
Figura I.7: SEV 117



No	Res	Thick	Depth
1	95.0	0.4	0.4
2	1515.5	1.9	2.3
3	427.3	49.1	51.4
4	99.1	259.0	310.4
5	38.0	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

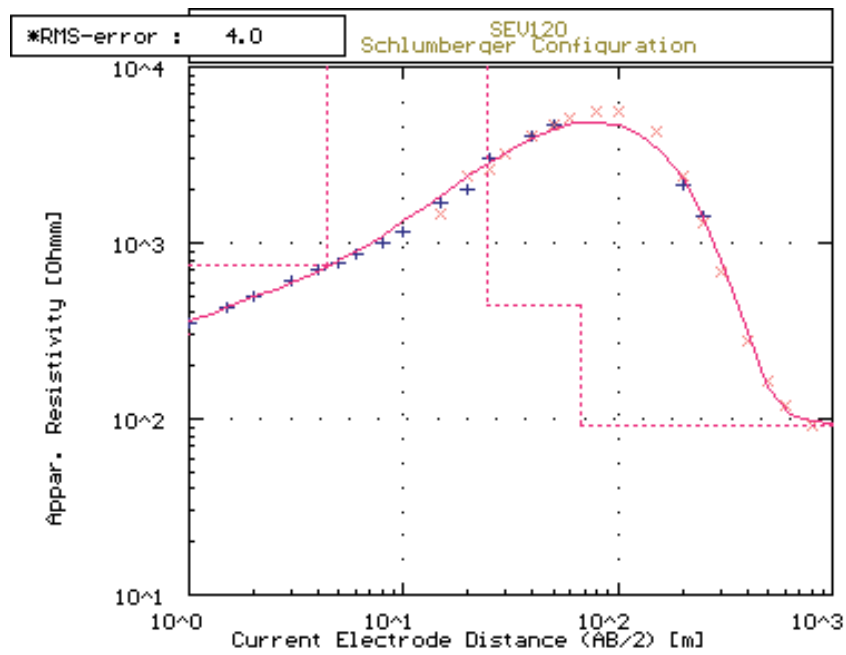
Figura I.8: SEV 118



No	Res	Thick	Depth
1	350.7	0.5	0.5
2	7321.0	1.5	2.0
3	253.0	6.7	8.7
4	1968.6	17.0	25.7
5	301.0	19.4	45.2
6	33.5	106.7	151.9
7	244.7	116.3	268.2
8	16120.2	-,-	-,-

* RMS on smoothed data

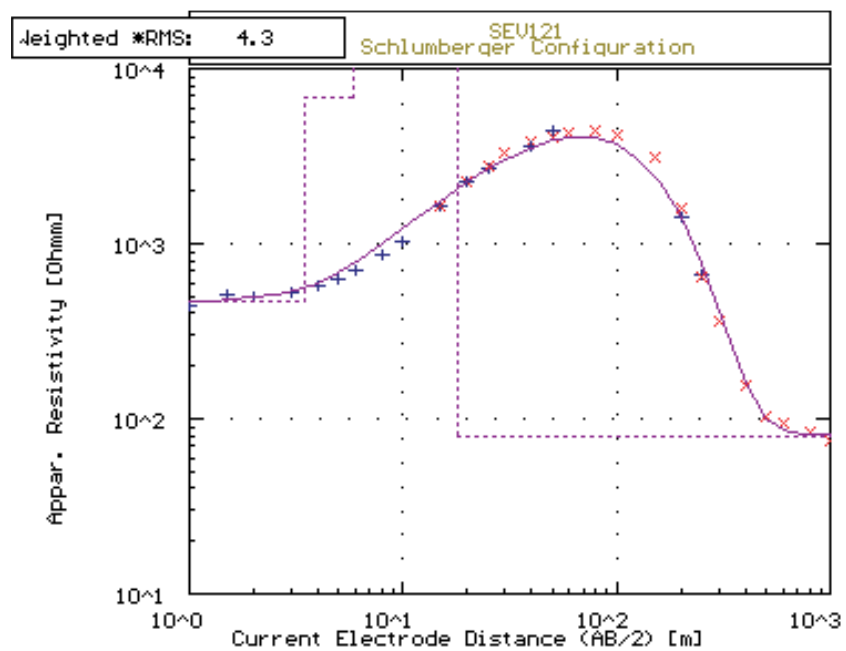
Figura I.9: SEV 119



No	Res	Thick	Depth
1	301.4	0.7	0.7
2	755.5	3.8	4.4
3	21284.4	20.2	24.7
4	442.3	42.6	67.3
5	91.2	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

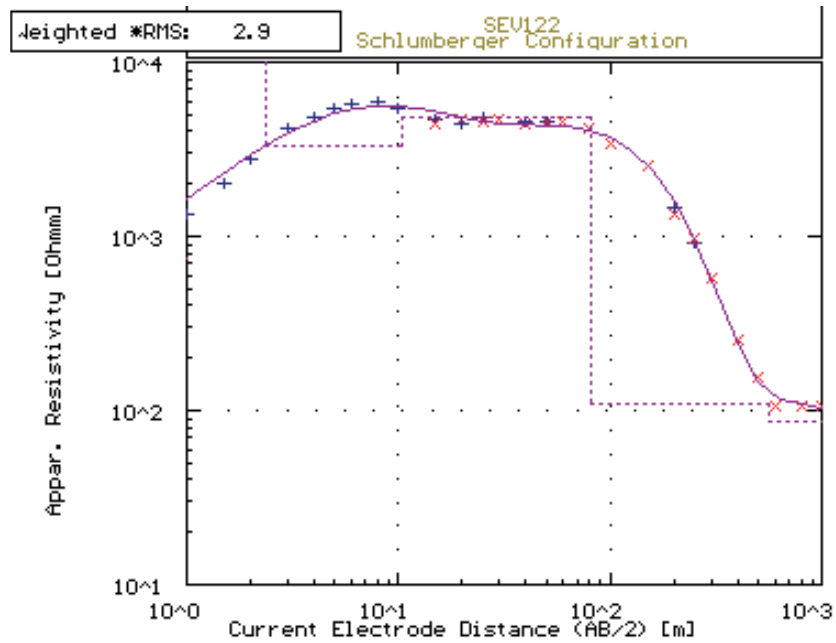
Figura I.10: SEV 120



No	Res	Thick	Depth
1	469.3	3.5	3.5
2	6920.5	2.4	5.8
3	24872.5	12.4	18.2
4	79.5	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

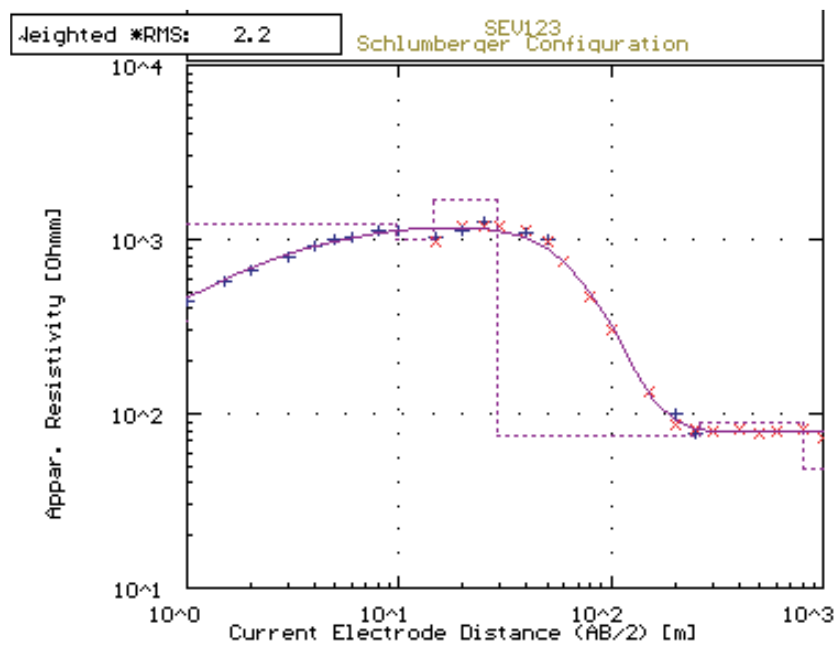
Figura I.11: SEV 121



No	Res	Thick	Depth
1	752.1	0.4	0.4
2	15336.8	1.9	2.4
3	3351.2	8.2	10.5
4	4781.6	71.5	82.0
5	110.4	478.6	560.6
6	86.1	-	-

* RMS on smoothed data

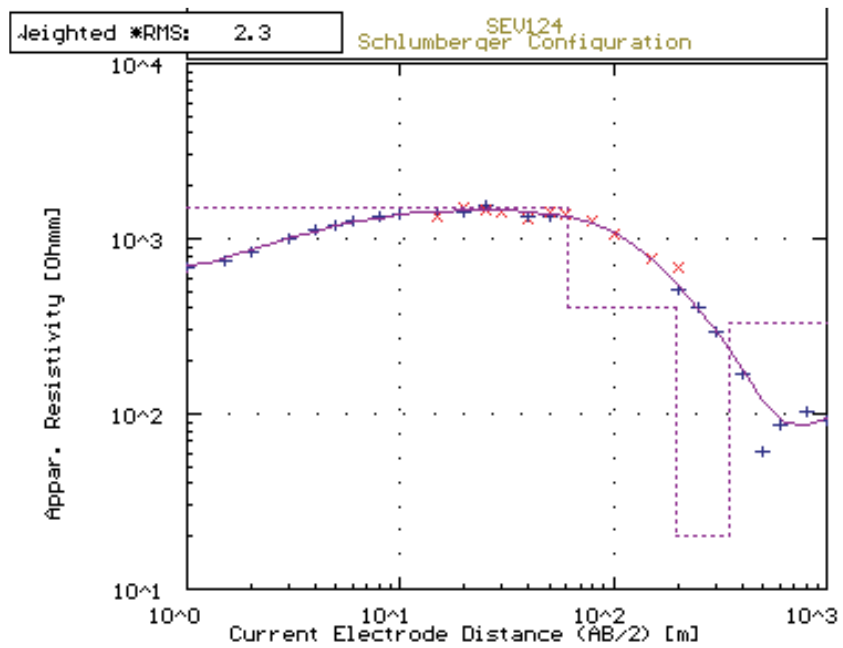
Figura I.12: SEV 122



No	Res	Thick	Depth
1	342.5	0.6	0.6
2	1231.7	9.1	9.7
3	1010.1	4.8	14.5
4	1708.0	14.7	29.2
5	74.2	232.3	261.5
6	89.8	536.9	798.4
7	48.0	-	-

* RMS on smoothed data

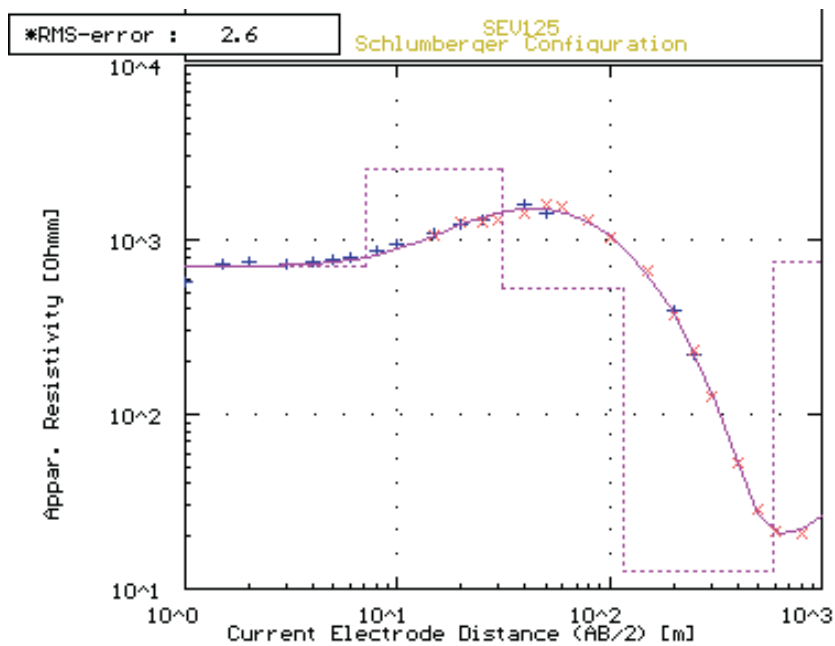
Figura I.13: SEV 123



No	Res	Thick	Depth
1	648.1	1.0	1.0
2	1489.2	59.4	60.3
3	402.0	134.6	194.9
4	20.0	153.8	348.7
5	330.0	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

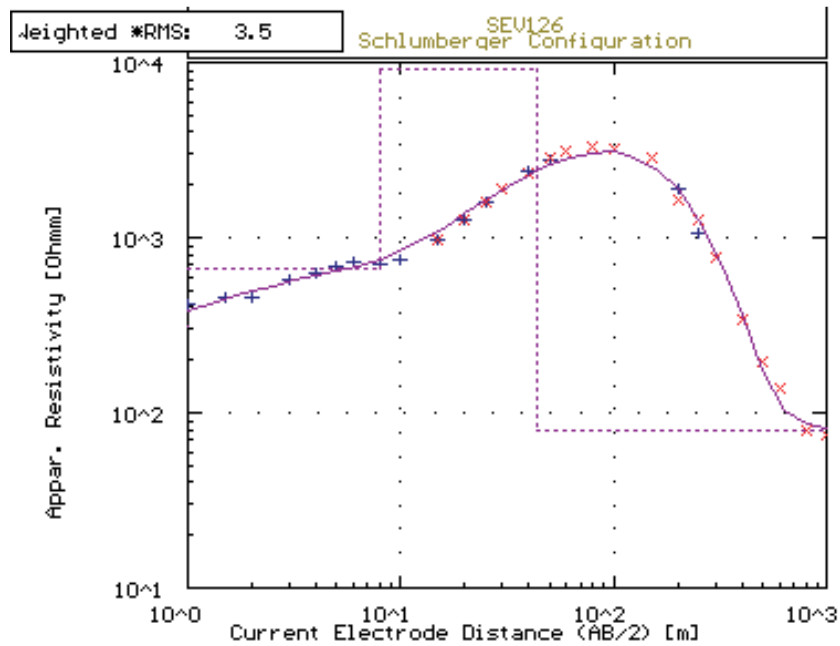
Figura I.14: SEV 124



No	Res	Thick	Depth
1	709.9	7.1	7.1
2	2564.7	24.4	31.5
3	534.1	63.3	114.8
4	12.6	473.5	588.3
5	756.7	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

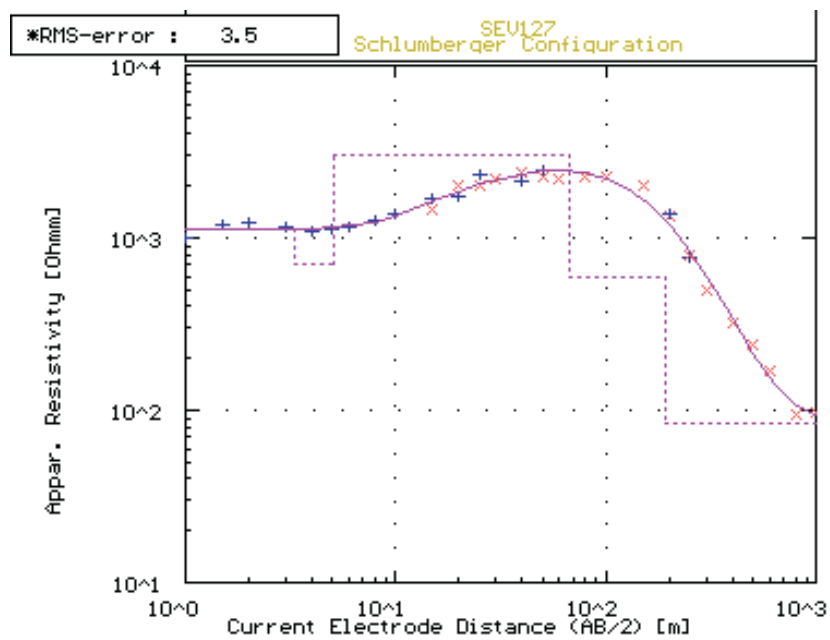
Figura I.15: SEV 125



No	Res	Thick	Depth
1	309.3	0.6	0.6
2	674.6	7.3	7.9
3	9246.5	35.5	43.4
4	79.5	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

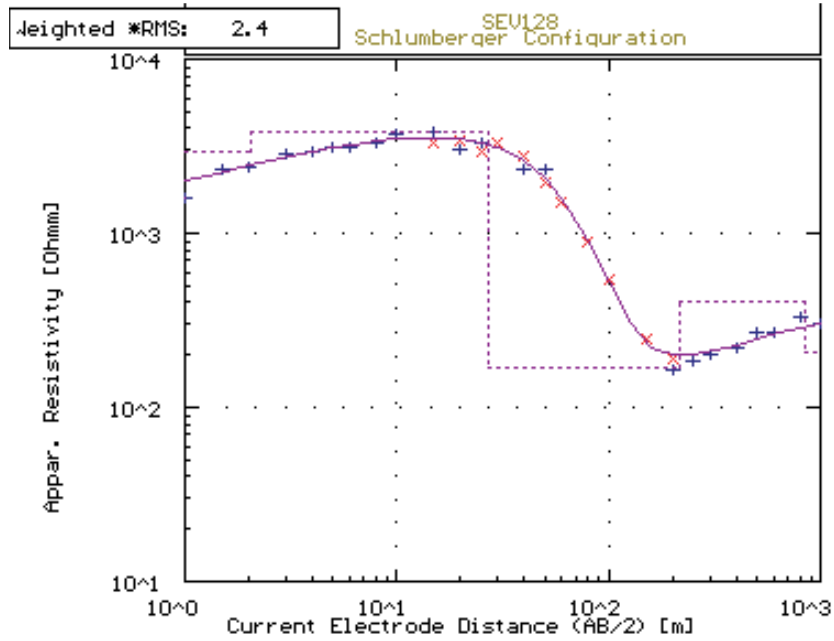
Figura I.16: SEV 126



No	Res	Thick	Depth
1	1125.4	3.3	3.3
2	709.6	1.7	5.0
3	3014.4	61.5	66.6
4	599.1	124.6	191.2
5	85.0	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

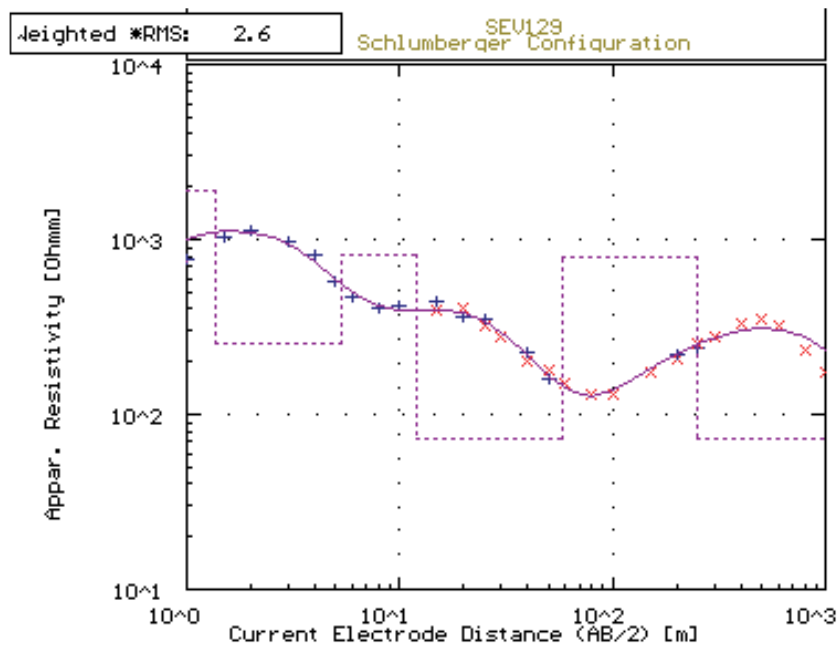
Figura I.17: SEV 127



No	Res	Thick	Depth
1	1584.5	0.5	0.5
2	2912.2	1.6	2.1
3	3843.2	24.7	26.8
4	168.3	186.7	213.5
5	410.0	622.0	835.4
6	207.1	-	-

* RMS on smoothed data

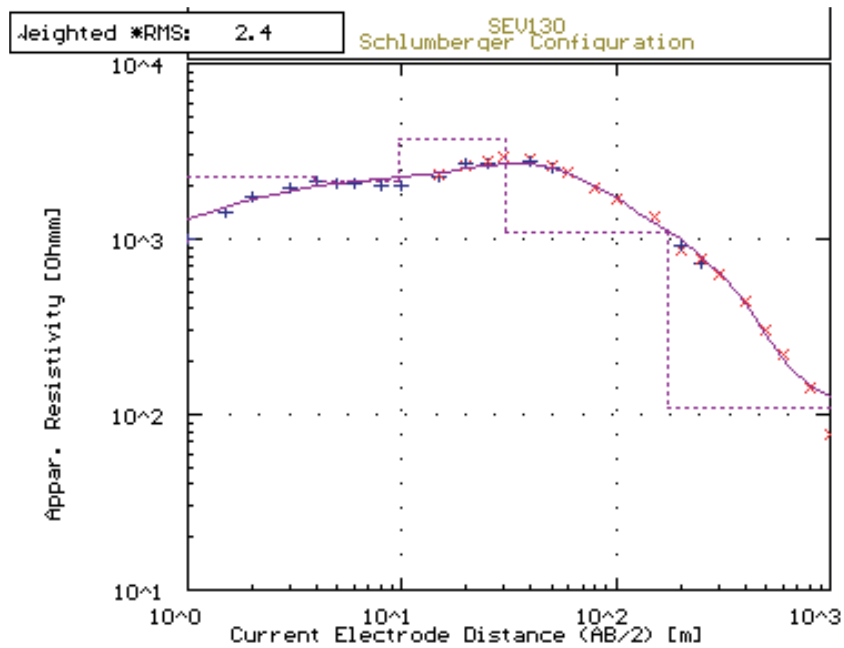
Figura I.18: SEV 128



No	Res	Thick	Depth
1	753.1	0.4	0.4
2	1888.4	0.9	1.4
3	256.8	3.9	5.3
4	806.1	6.7	11.9
5	72.5	45.5	57.4
6	794.8	190.3	247.7
7	73.5	-	-

* RMS on smoothed data

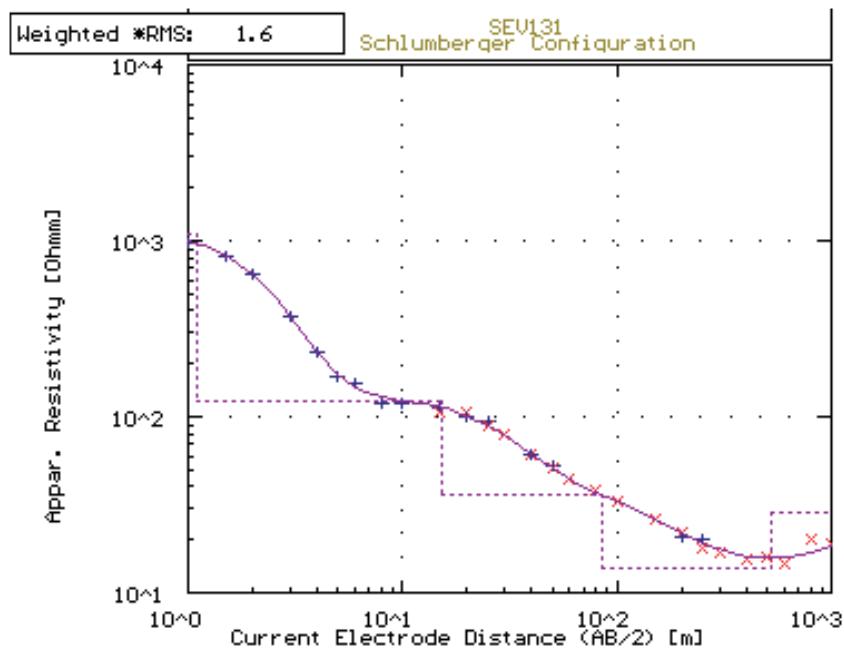
Figura I.19: SEV 129



No	Res	Thick	Depth
1	971.7	0.5	0.5
2	2269.7	3.4	3.9
3	2128.2	5.7	9.6
4	3743.3	21.2	30.8
5	1078.5	144.8	175.6
6	110.5	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

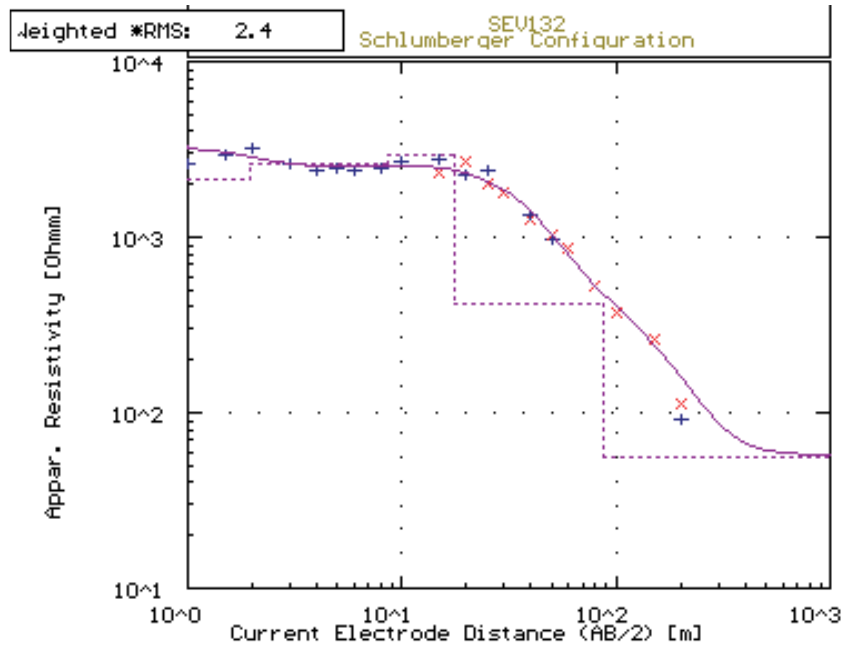
Figura I.20: SEV 130



No	Res	Thick	Depth
1	1099.5	1.1	1.1
2	123.9	14.0	15.1
3	35.7	69.5	84.7
4	13.8	432.6	517.2
5	28.4	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

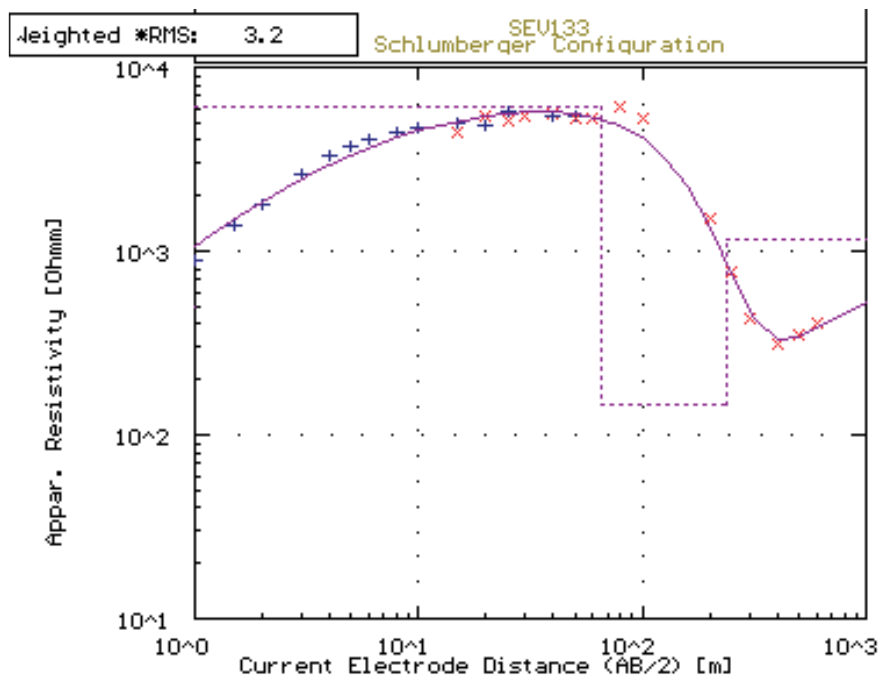
Figura I.21: SEV 131



No	Res	Thick	Depth
1	3341.6	1.0	1.0
2	2110.0	1.0	1.9
3	2627.1	6.5	8.5
4	2965.9	9.2	17.7
5	422.0	69.0	86.7
6	55.7	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

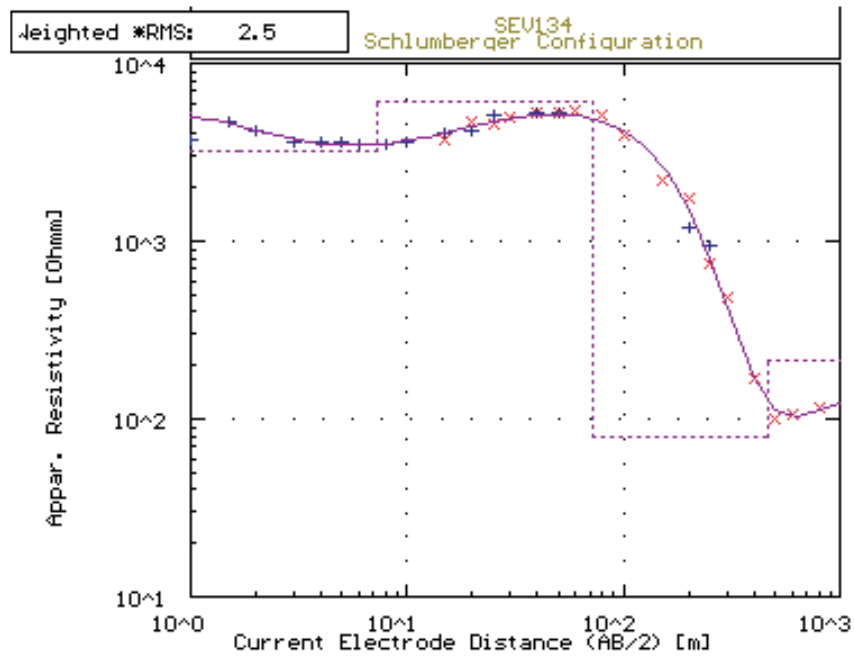
Figura I.22: SEV 132



No	Res	Thick	Depth
1	495.1	0.4	0.4
2	6125.6	65.6	66.0
3	147.1	169.4	235.4
4	1157.9	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

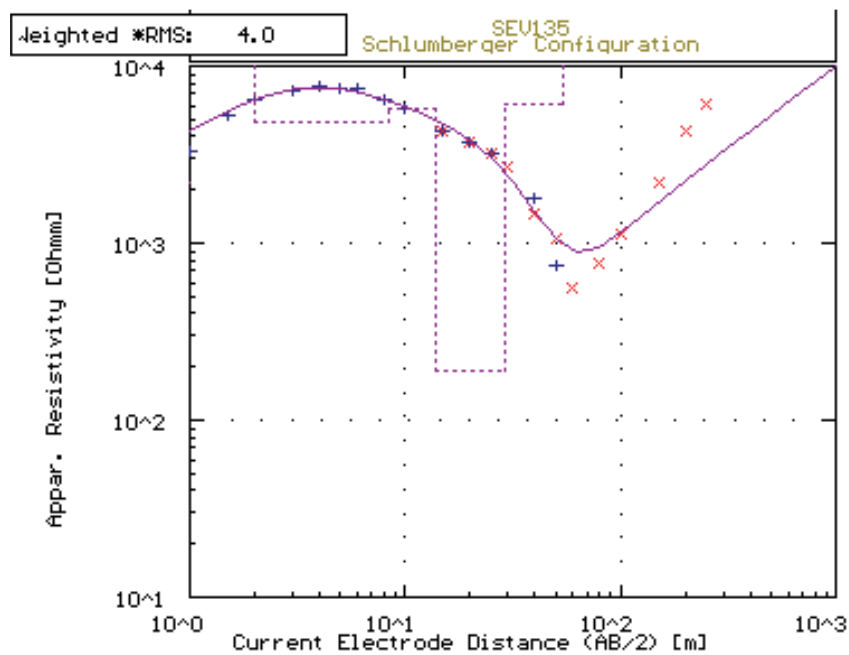
Figura I.23: SEV 133



No	Res	Thick	Depth
1	5323.7	0.8	0.8
2	3193.9	0.9	1.7
3	3214.2	5.5	7.2
4	6011.3	65.0	72.2
5	79.7	397.0	469.2
6	215.1	-	-

* RMS on smoothed data

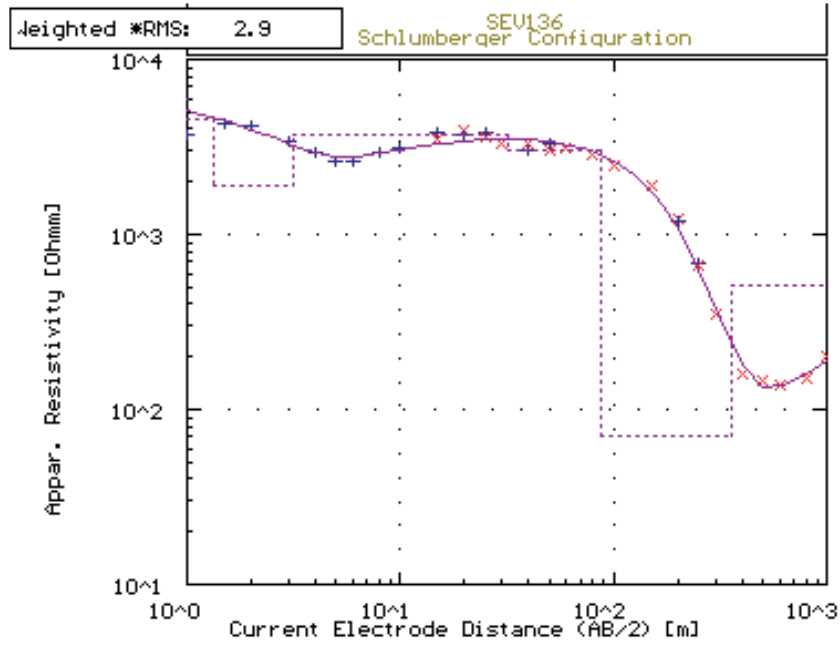
Figura I.24: SEV 134



No	Res	Thick	Depth
1	2209.4	0.4	0.4
2	12553.0	1.6	2.0
3	4758.7	6.4	8.4
4	5756.9	5.6	13.9
5	191.0	15.2	29.1
6	6153.8	25.2	54.3
7	58293.1	-	-

* RMS on smoothed data

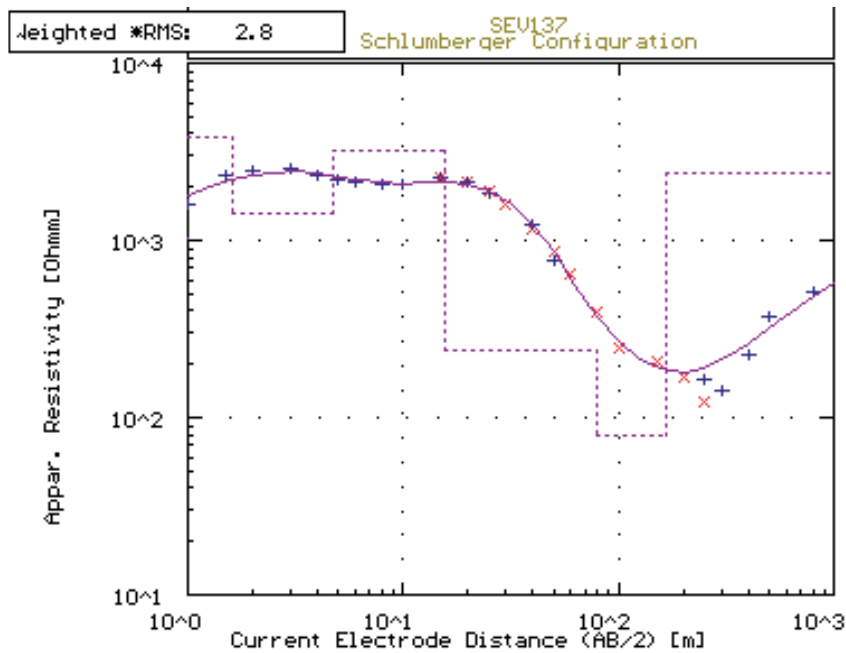
Figura I.25: SEV 135



No	Res	Thick	Depth
1	5839.4	0.4	0.4
2	4492.0	0.9	1.3
3	1875.2	1.8	3.1
4	3696.2	28.0	32.0
5	3062.6	55.0	57.0
6	71.0	266.7	354.0
7	516.2	-	-

* RMS on smoothed data

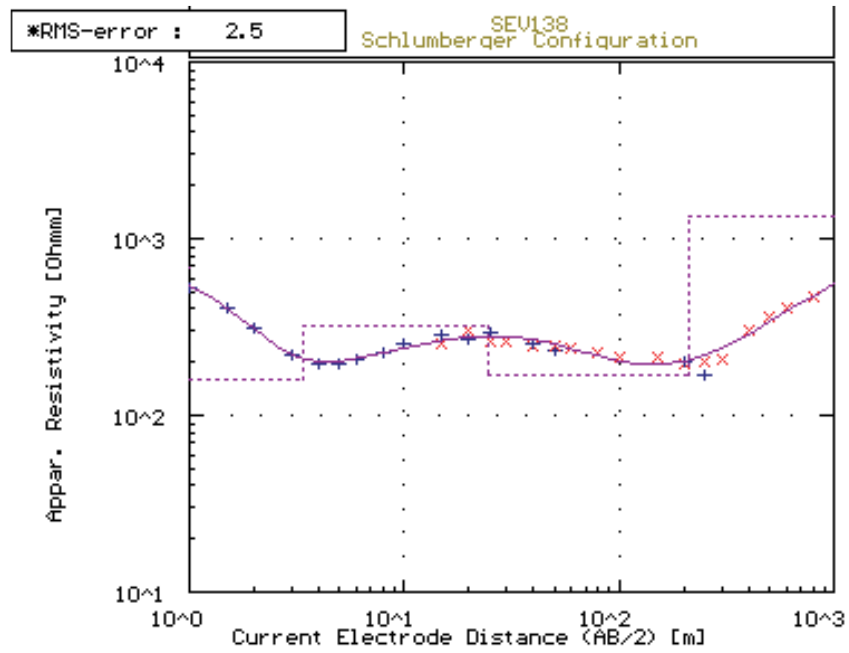
Figura I.26: SEV 136



No	Res	Thick	Depth
1	1038.2	0.4	0.4
2	3863.3	1.2	1.6
3	1402.1	3.1	4.7
4	3232.3	11.0	15.7
5	240.7	63.9	79.6
6	79.2	87.0	166.6
7	2393.0	-	-

* RMS on smoothed data

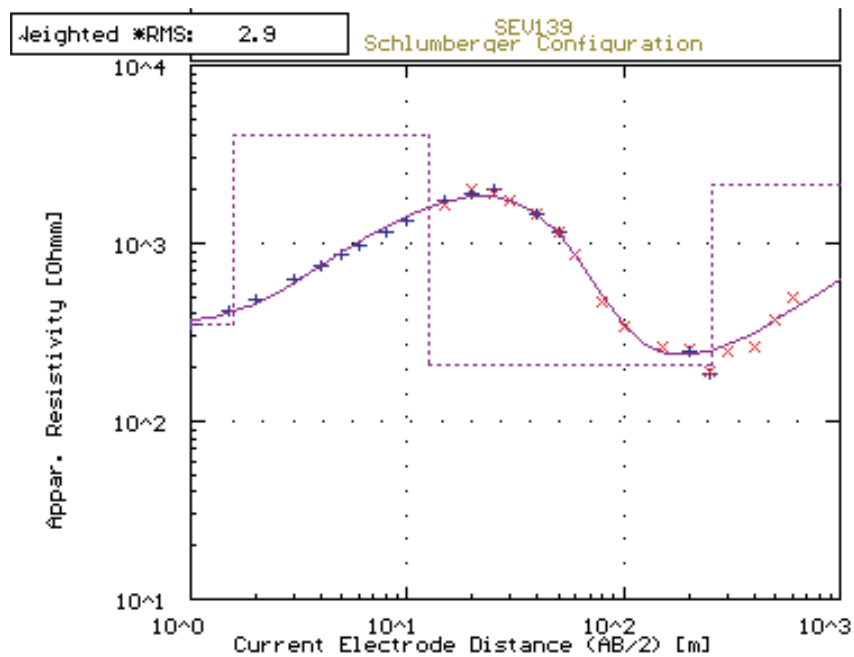
Figura I.27: SEV 137



No	Res	Thick	Depth
1	682.0	0.7	0.7
2	158.4	2.7	3.4
3	318.3	21.4	24.8
4	168.8	187.4	212.1
5	1353.7	-, -	-, -

* RMS on smoothed data

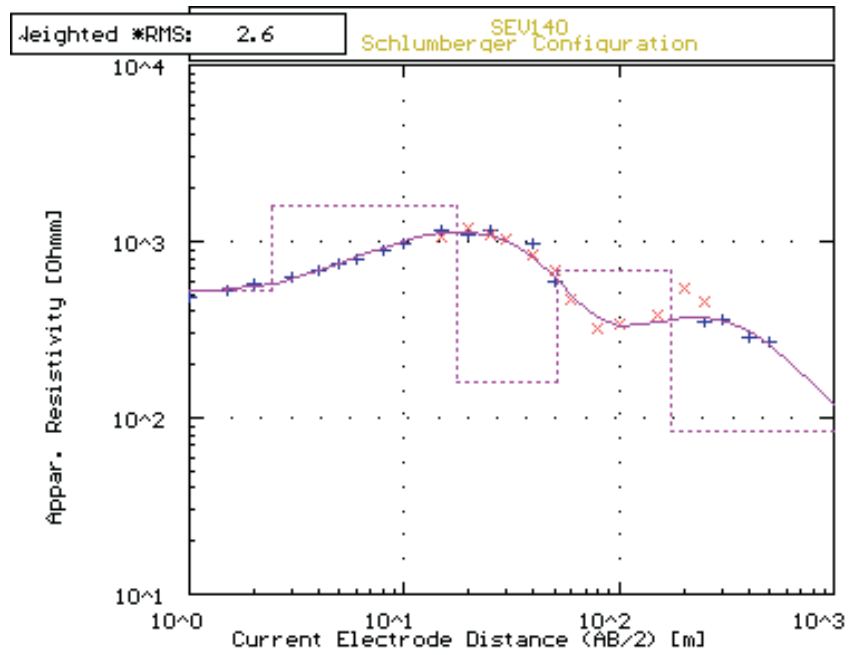
Figura I.28: SEV 138



No	Res	Thick	Depth
1	349.4	1.6	1.6
2	4024.2	11.0	12.6
3	206.6	244.9	257.5
4	2107.0	-, -	-, -

* RMS on smoothed data

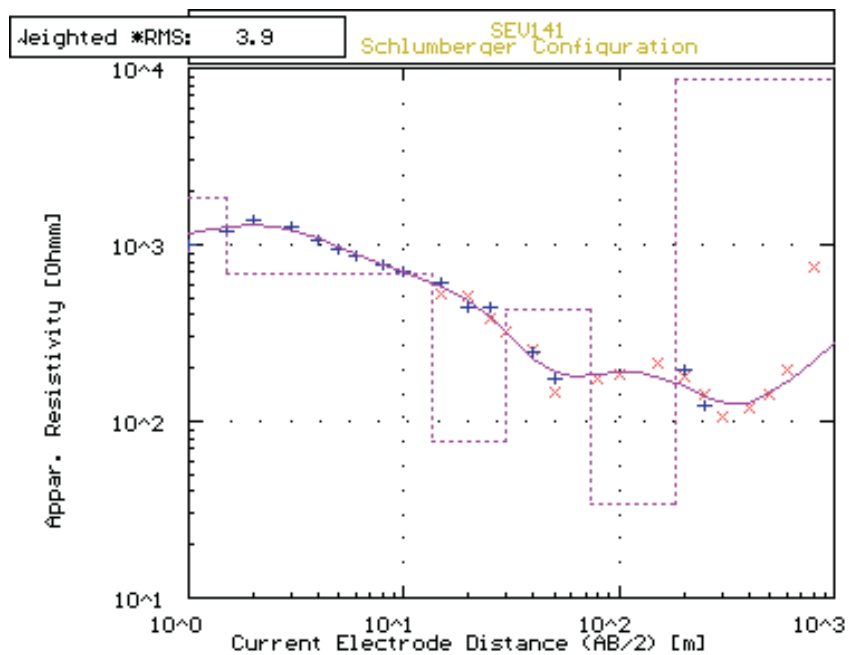
Figura I.29: SEV 139



No	Res	Thick	Depth
1	524.5	2.4	2.4
2	1586.0	15.1	17.5
3	159.2	34.2	51.7
4	685.3	122.7	174.4
5	83.4	—	—

* RMS on smoothed data

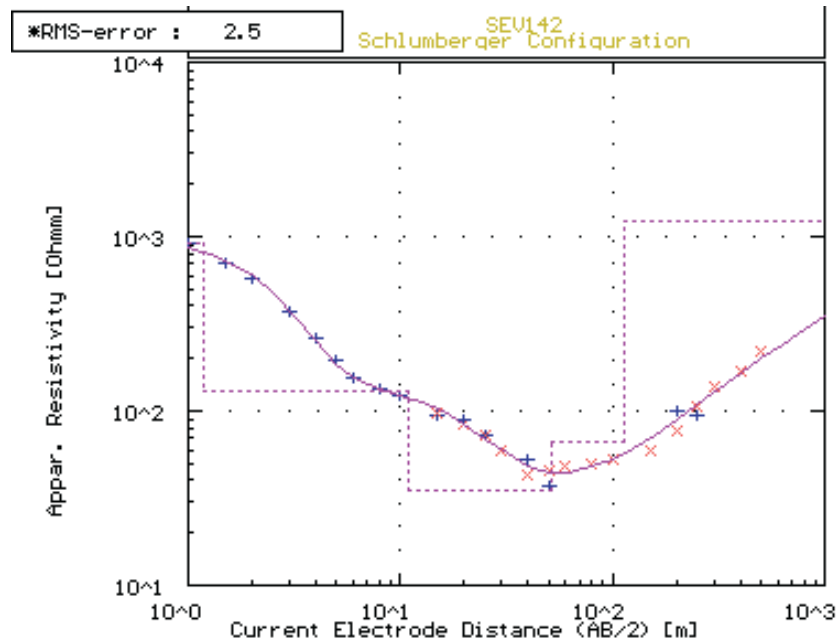
Figura I.30: SEV 140



No	Res	Thick	Depth
1	920.7	0.4	0.4
2	1821.9	1.0	1.5
3	676.1	12.0	13.5
4	77.8	16.6	30.1
5	429.6	43.7	73.8
6	34.0	108.8	182.5
7	8665.5	—	—

* RMS on smoothed data

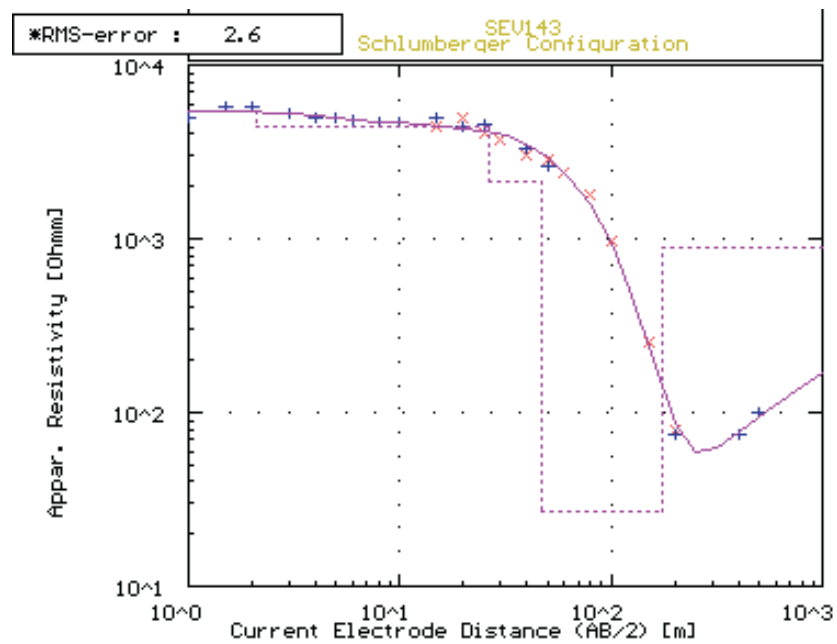
Figura I.31: SEV 141



No	Res	Thick	Depth
1	928.1	1.2	1.2
2	129.5	9.6	10.8
3	35.1	40.6	51.4
4	67.0	61.7	113.1
5	1237.0	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

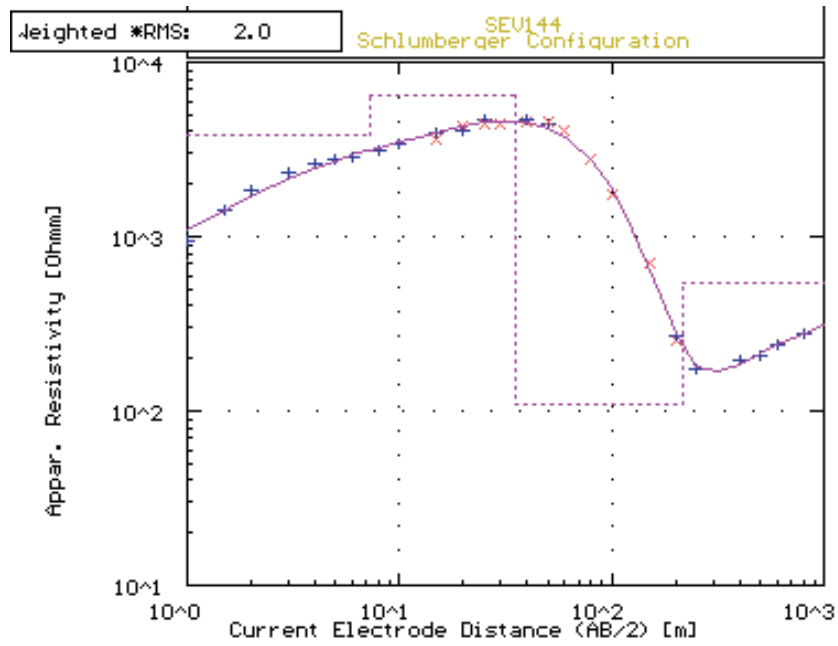
Figura I.32: SEV 142



No	Res	Thick	Depth
1	5488.0	2.1	2.1
2	4463.7	24.2	26.3
3	2109.1	20.7	47.0
4	26.7	129.3	176.3
5	884.9	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

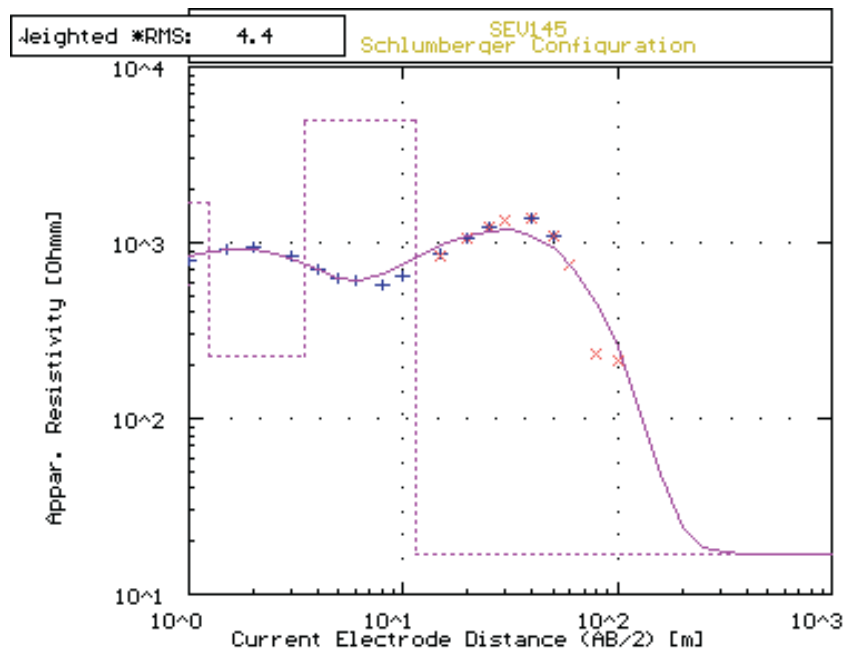
Figura I.33: SEV 143



No	Res	Thick	Depth
1	735.1	0.6	0.6
2	3802.9	6.7	7.3
3	6422.6	28.2	35.5
4	109.0	180.2	215.7
5	536.7	-	-

* RMS on smoothed data

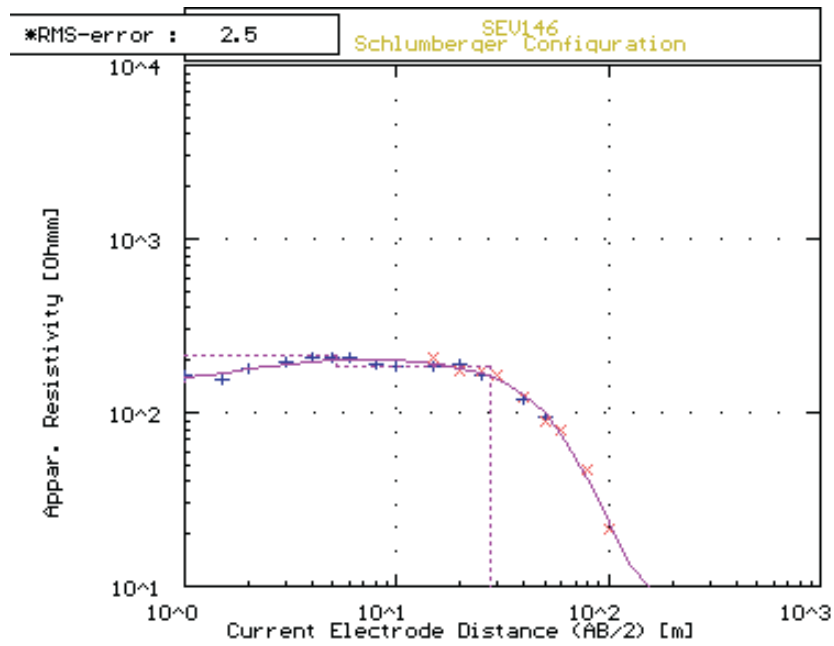
Figura I.34: SEV 144



No	Res	Thick	Depth
1	568.3	0.4	0.4
2	1709.3	0.8	1.2
3	227.7	2.2	3.5
4	4989.1	7.8	11.3
5	16.8	-	-

* RMS on smoothed data

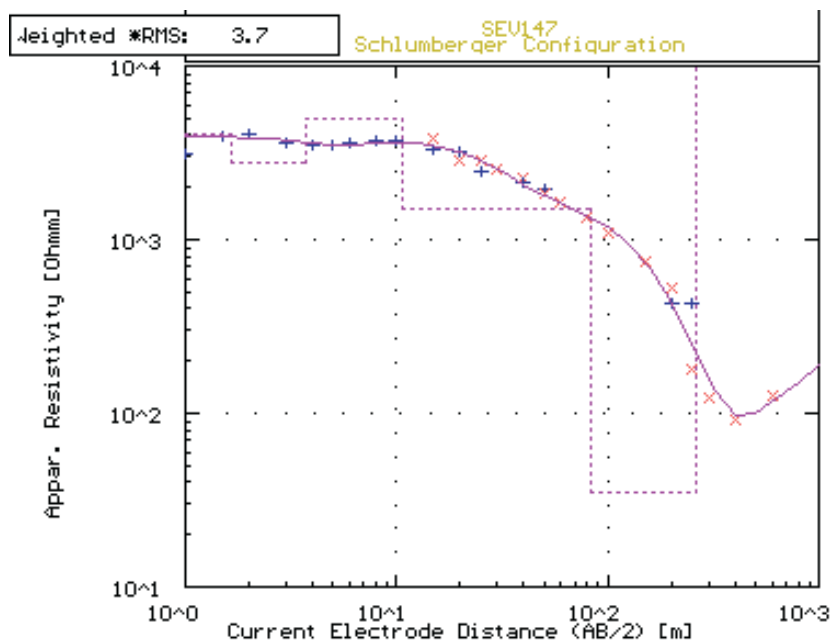
Figura I.35: SEV 145



No	Res	Thick	Depth
1	150.7	0.8	0.8
2	215.2	4.4	5.2
3	184.1	22.6	27.8
4	7.6	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

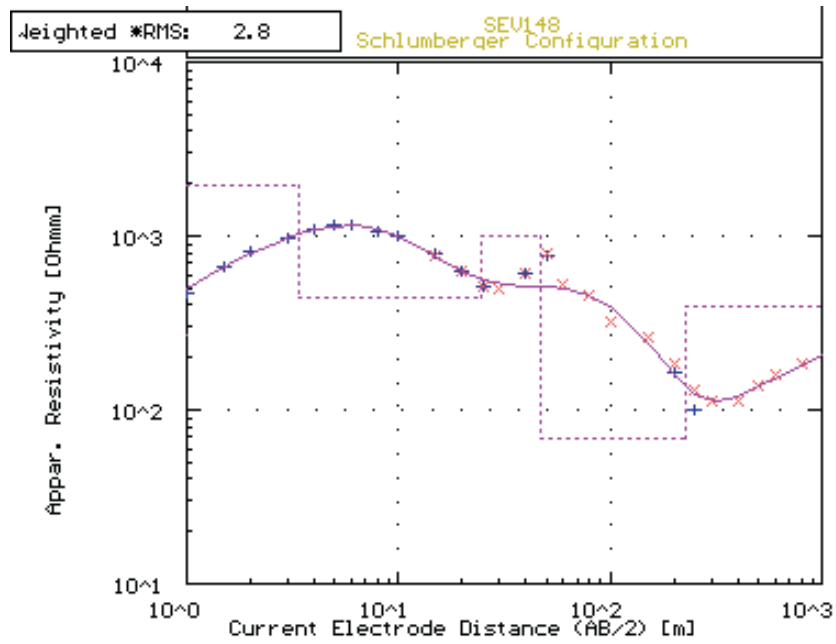
Figura I.36: SEV 146



No	Res	Thick	Depth
1	3944.4	0.3	0.3
2	4054.4	1.0	1.0
3	2757.7	2.1	3.7
4	4897.0	6.0	10.6
5	1522.6	72.0	83.4
6	35.2	180.0	264.0
7	15169.6	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

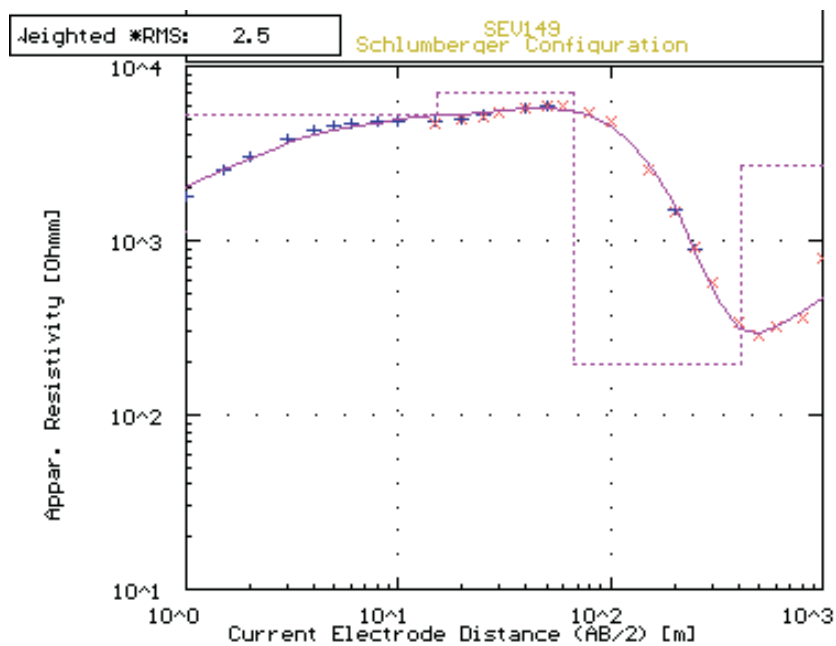
Figura I.37: SEV 147



No	Res	Thick	Depth
1	271.1	0.4	0.4
2	1968.4	3.0	3.4
3	440.3	21.3	24.7
4	1005.3	22.3	47.1
5	67.7	180.9	228.0
6	391.0	-. -	-. -

* RMS on smoothed data

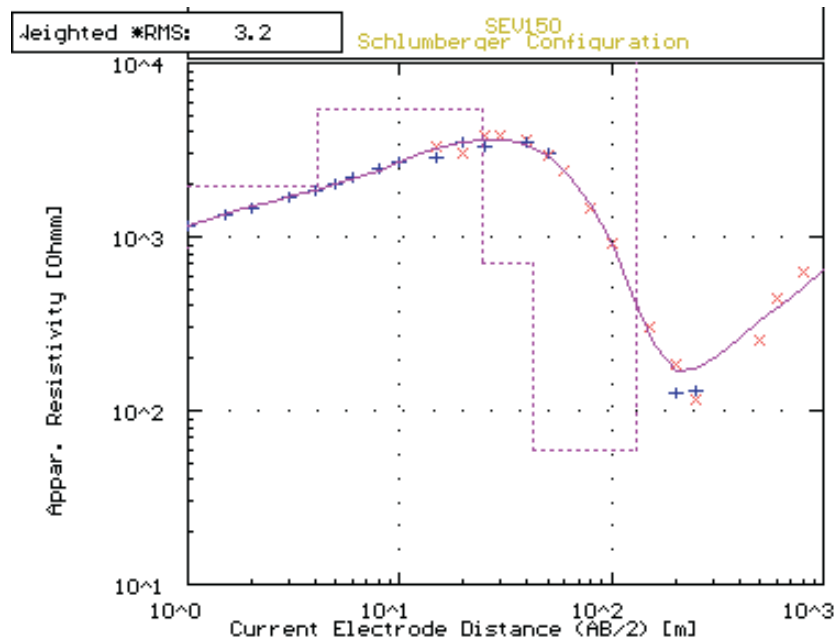
Figura I.38: SEV 148



No	Res	Thick	Depth
1	1108.5	0.4	0.4
2	5289.4	14.9	15.3
3	7015.0	51.1	66.4
4	192.8	350.2	416.6
5	2707.1	-. -	-. -

* RMS on smoothed data

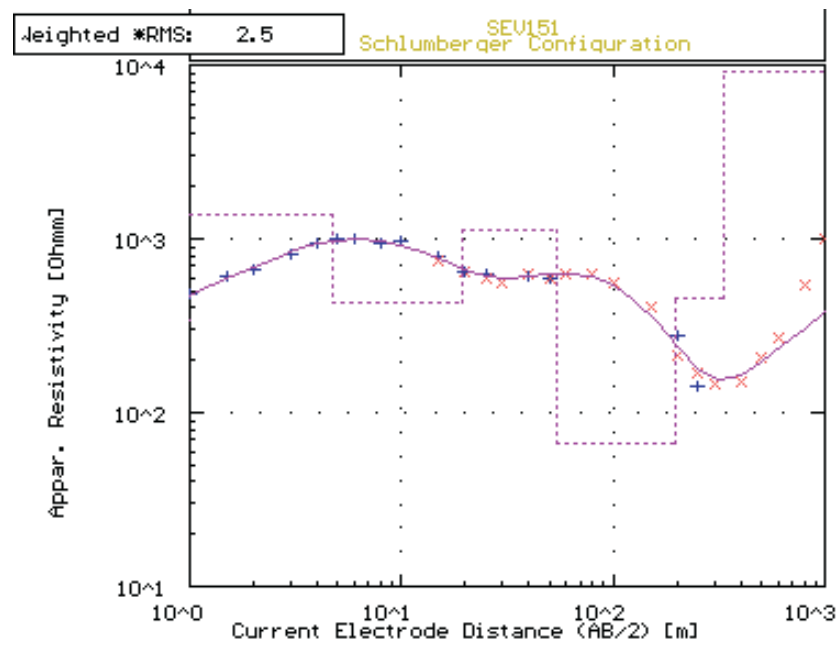
Figura I.39: SEV 149



No	Res	Thick	Depth
1	874.4	0.5	0.5
2	1946.6	3.6	4.1
3	5483.7	20.6	24.8
4	709.7	18.0	42.7
5	59.4	86.6	129.3
6	13077.3	-	-

* RMS on smoothed data

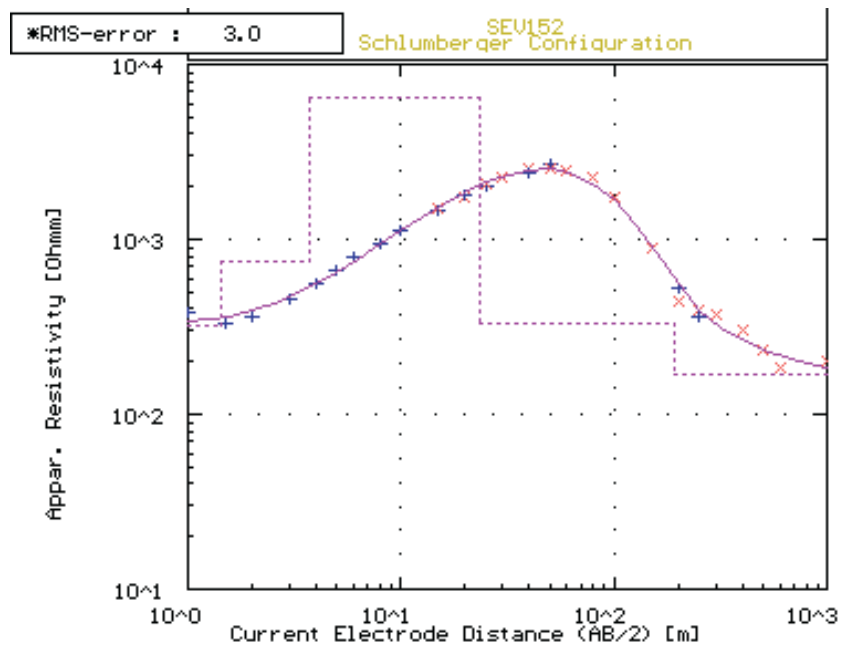
Figura I.40: SEV 150



No	Res	Thick	Depth
1	341.7	0.6	0.6
2	1396.3	4.2	4.4
3	424.9	14.7	19.8
4	1138.8	34.0	50.0
5	67.0	145.0	198.0
6	456.7	134.2	332.7
7	9263.4	-	-

* RMS on smoothed data

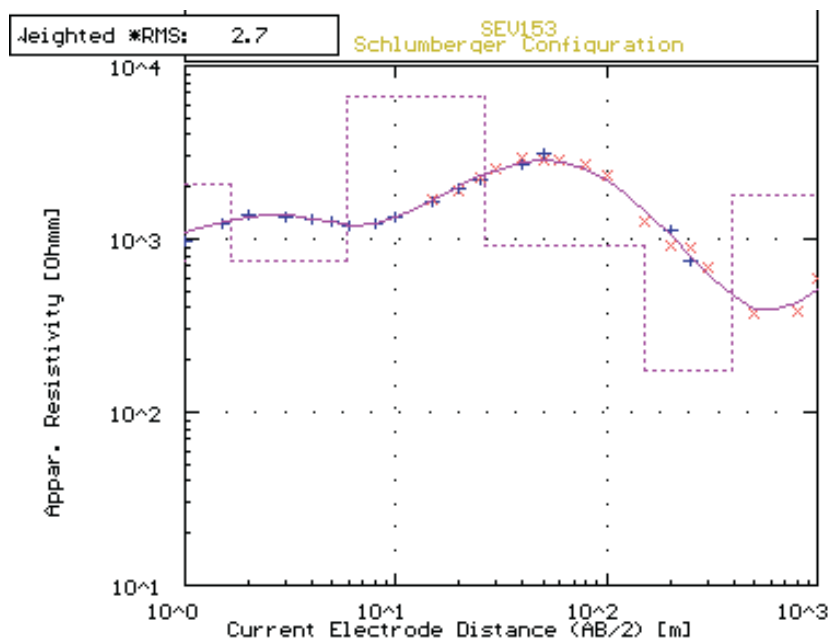
Figura I.41: SEV 151



No	Res	Thick	Depth
1	325.5	1.4	1.4
2	738.0	2.3	2.3
3	6474.8	19.5	23.3
4	326.0	169.6	192.9
5	170.9	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

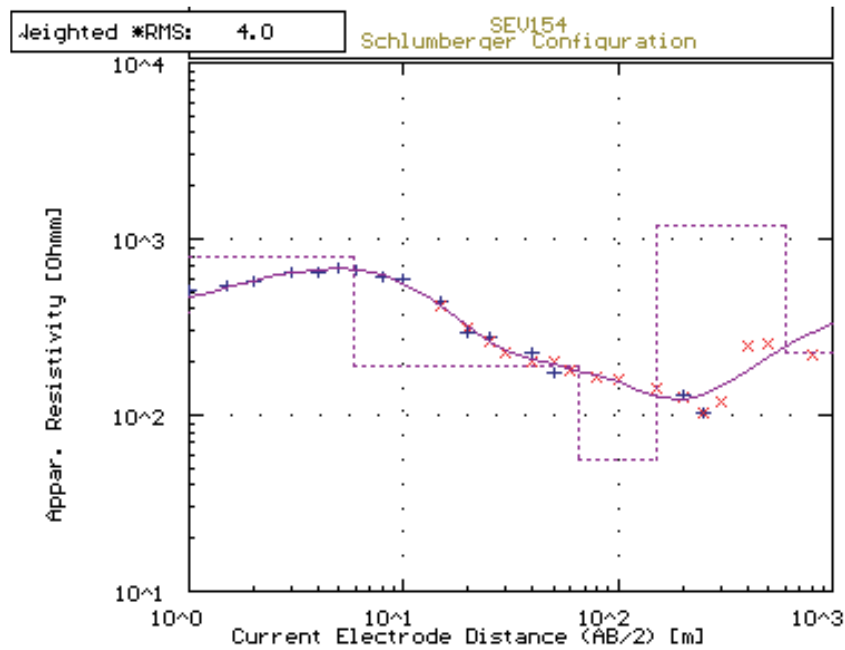
Figura I.42: SEV 152



No	Res	Thick	Depth
1	744.0	0.4	0.4
2	2065.0	1.2	1.6
3	739.0	4.3	5.9
4	6575.7	20.3	26.2
5	910.6	125.0	151.1
6	176.3	242.4	393.6
7	1771.9	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

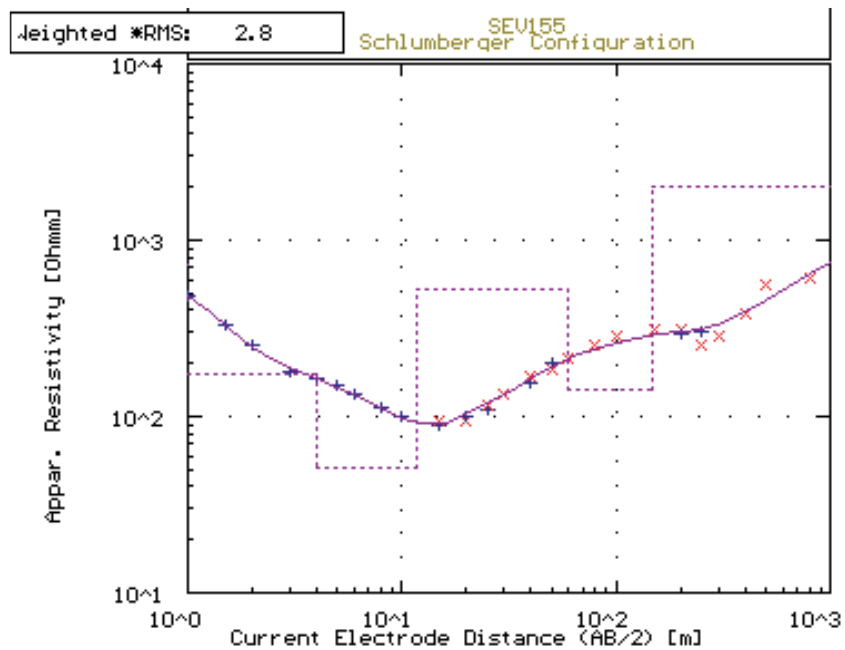
Figura I.43: SEV 153



No	Res	Thick	Depth
1	387.5	0.6	0.6
2	789.5	5.3	5.9
3	192.4	59.0	64.9
4	55.1	86.8	151.7
5	1185.4	456.5	608.1
6	225.8	-. -	-. -

* RMS on smoothed data

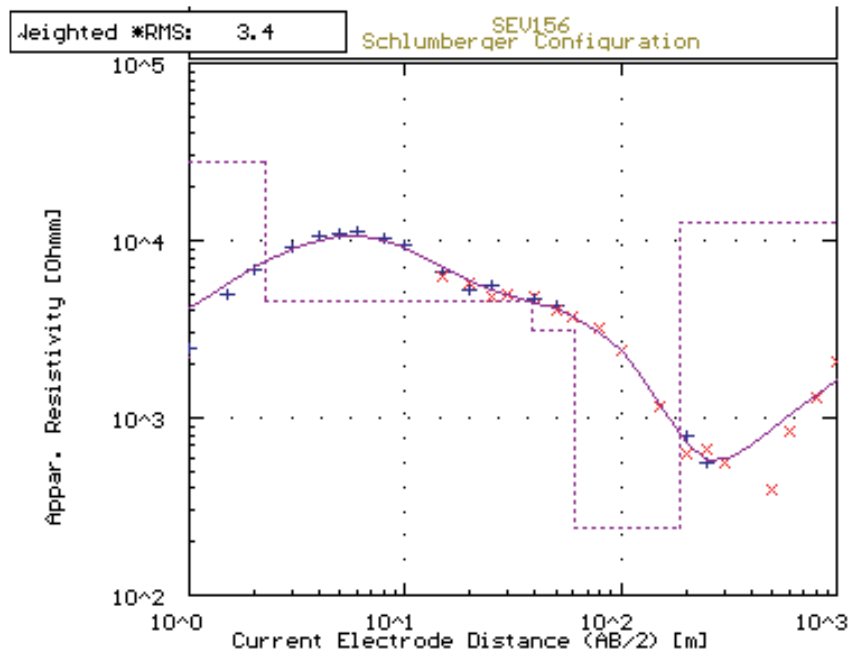
Figura I.44: SEV 154



No	Res	Thick	Depth
1	734.7	0.5	0.5
2	171.9	3.4	4.0
3	50.7	7.8	11.8
4	532.0	48.2	60.0
5	140.9	89.2	149.1
6	2001.3	-. -	-. -

* RMS on smoothed data

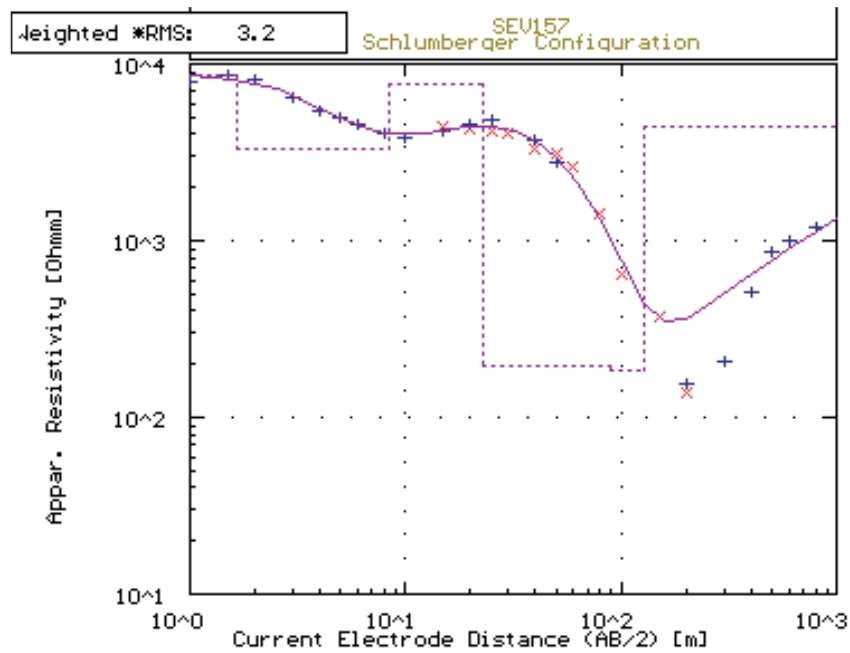
Figura I.45: SEV 155



No	Res	Thick	Depth
1	2215.9	0.5	0.5
2	27473.6	1.8	2.2
3	4599.1	36.3	38.5
4	3123.8	22.1	60.6
5	242.8	127.2	187.8
6	12551.9	-	-

* RMS on smoothed data

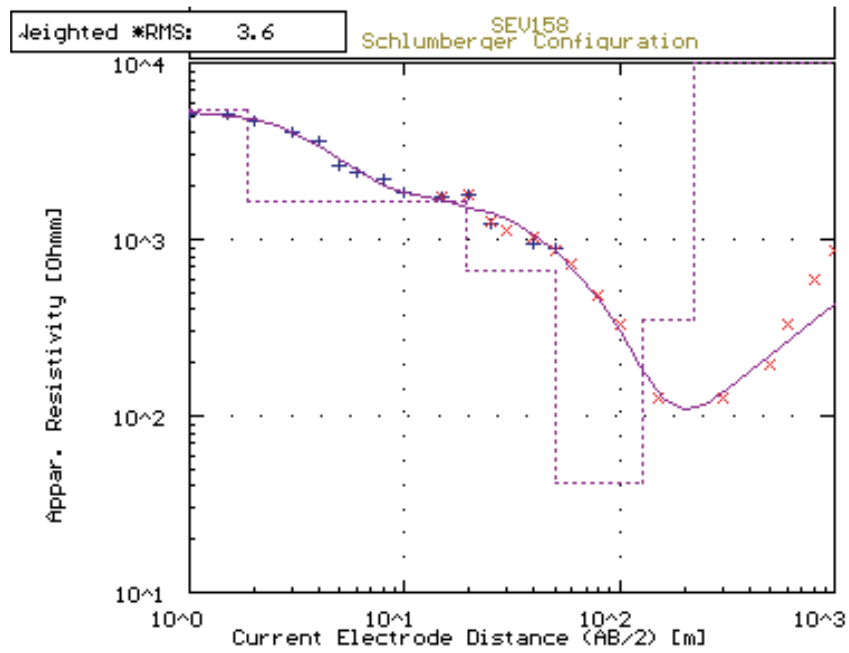
Figura I.46: SEV 156



No	Res	Thick	Depth
1	8727.4	1.7	1.7
2	3304.1	6.8	8.4
3	7612.5	14.0	22.9
4	197.8	66.9	89.8
5	184.0	37.2	127.0
6	4366.6	-	-

* RMS on smoothed data

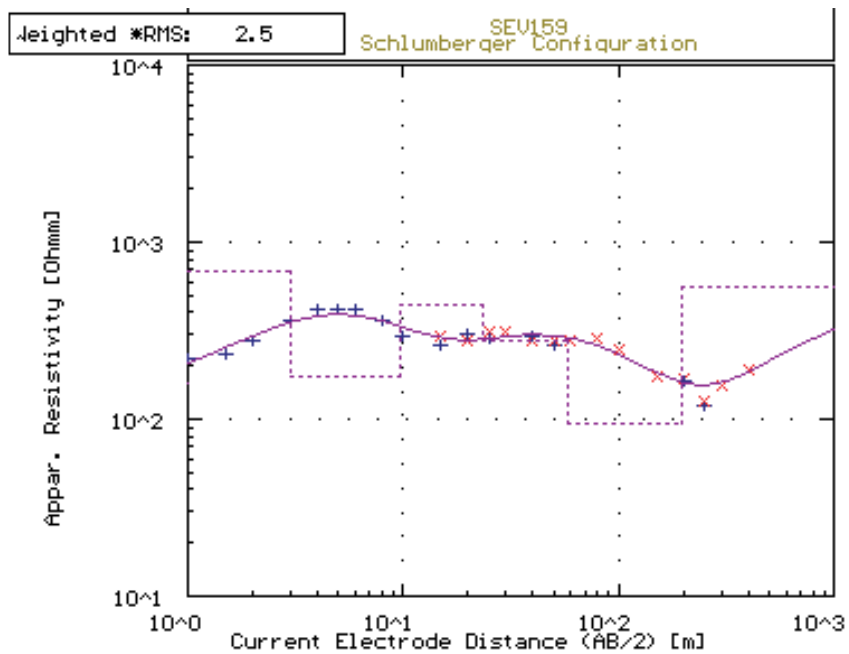
Figura I.47: SEV 157



No	Res	Thick	Depth
1	5358.1	1.8	1.8
2	1644.7	17.4	19.2
3	659.5	30.8	50.0
4	41.5	78.6	128.6
5	353.5	91.3	219.9
6	9995.8	-	-

* RMS on smoothed data

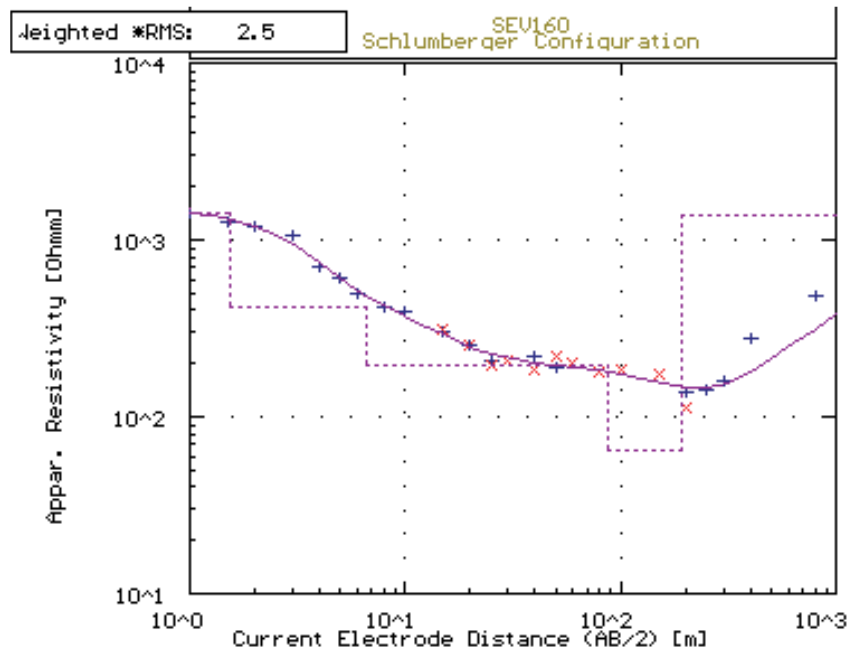
Figura I.48: SEV 158



No	Res	Thick	Depth
1	160.4	0.7	0.7
2	679.4	2.3	3.0
3	173.6	6.7	9.7
4	441.2	13.9	23.7
5	273.6	33.9	57.6
6	95.6	137.6	195.2
7	558.2	-	-

* RMS on smoothed data

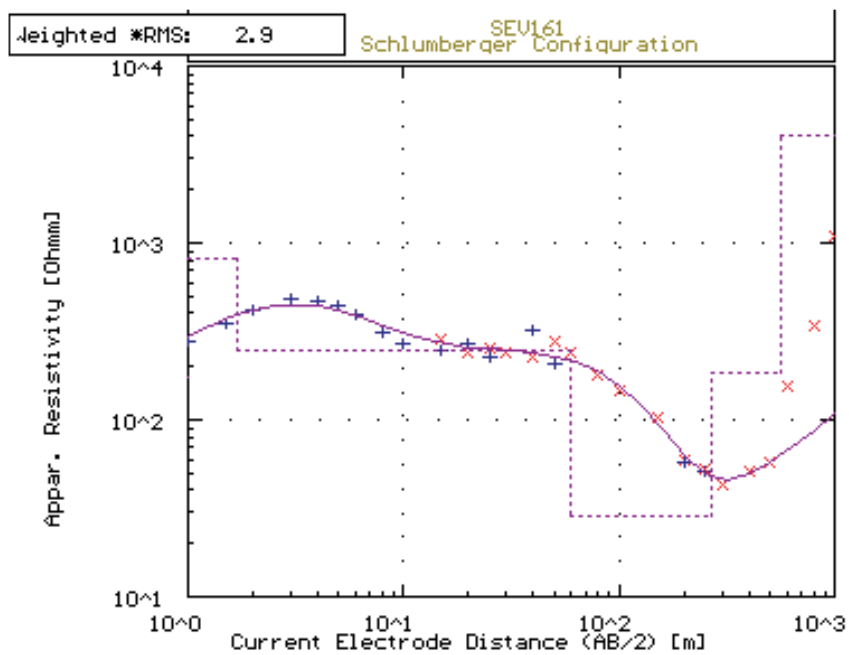
Figura I.49: SEV 159



No	Res	Thick	Depth
1	1515.3	0.5	0.5
2	1406.9	1.1	1.5
3	415.4	5.1	6.6
4	194.2	80.3	86.9
5	65.0	103.4	190.3
6	1368.9	-	-

* RMS on smoothed data

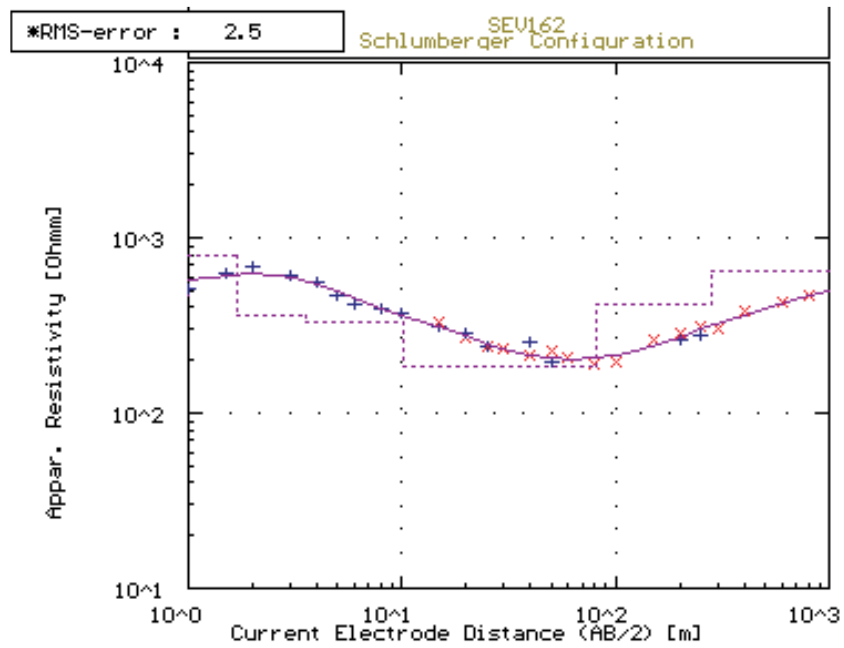
Figura I.50: SEV 160



No	Res	Thick	Depth
1	176.0	0.4	0.4
2	808.5	1.3	1.7
3	246.0	58.1	59.7
4	28.0	207.2	267.0
5	188.8	290.3	557.3
6	4015.0	-	-

* RMS on smoothed data

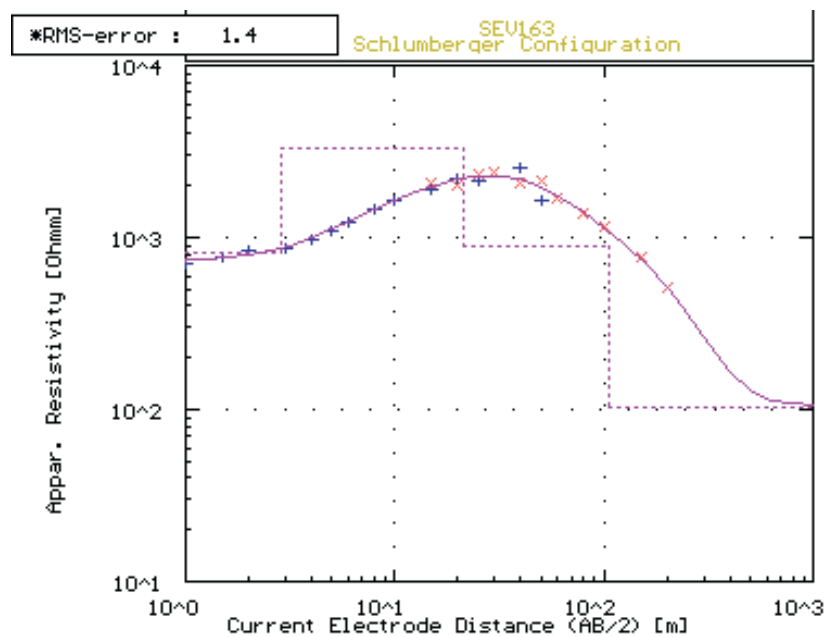
Figura I.51: SEV 161



No	Res	Thick	Depth
1	473.5	0.4	0.4
2	793.6	1.2	1.7
3	358.1	1.9	3.6
4	334.8	6.6	10.2
5	184.5	70.8	81.0
6	416.0	197.9	278.9
7	639.4	-	-

* RMS on smoothed data

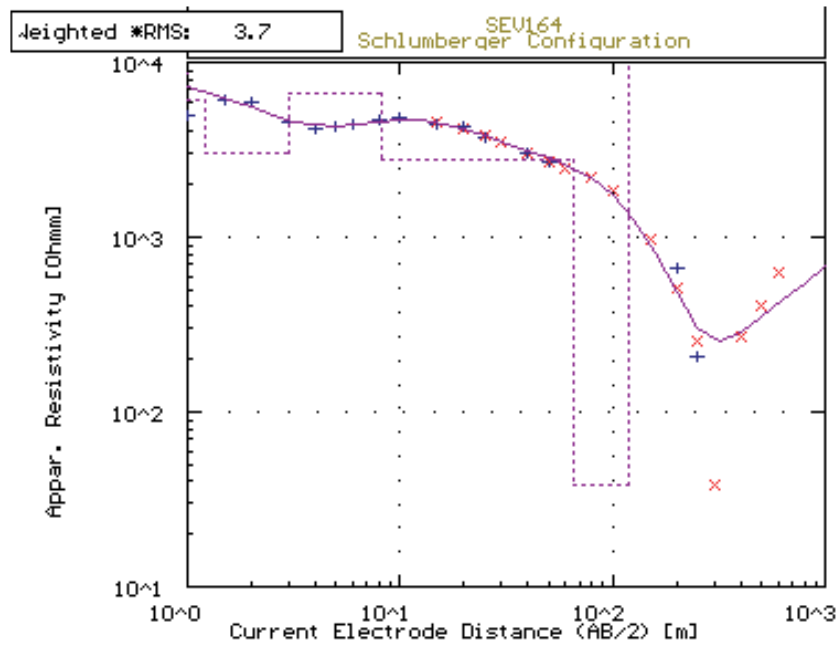
Figura I.52: SEV 162



No	Res	Thick	Depth
1	724.7	0.9	0.9
2	815.2	1.9	2.8
3	3323.2	18.3	21.1
4	896.2	85.4	106.5
5	102.4	-	-

* RMS on smoothed data

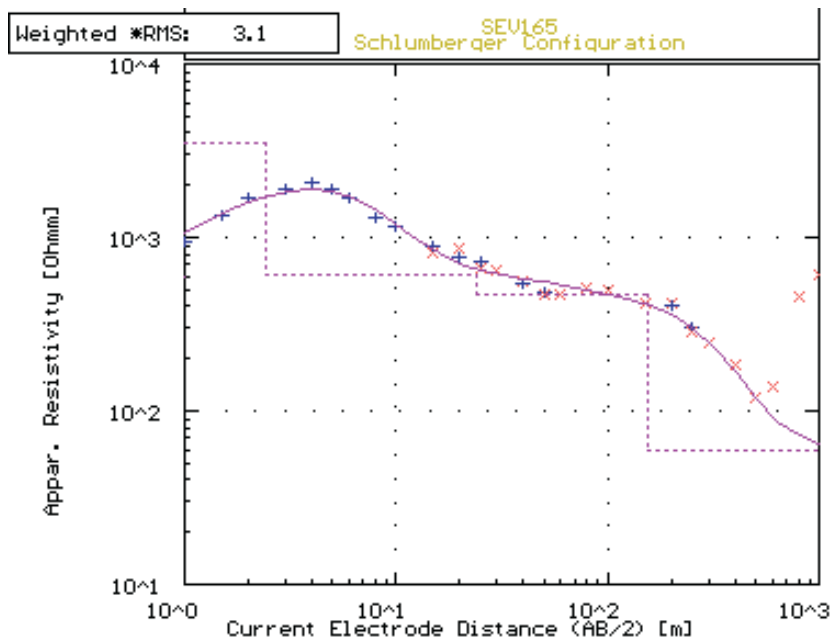
Figura I.53: SEV 163



No	Res	Thick	Depth
1	8727.9	0.4	0.4
2	6110.4	0.8	1.2
3	3057.8	1.8	3.0
4	6680.1	5.1	8.2
5	2788.0	57.2	65.4
6	38.7	52.8	118.2
7	10454.5	-	-

* RMS on smoothed data

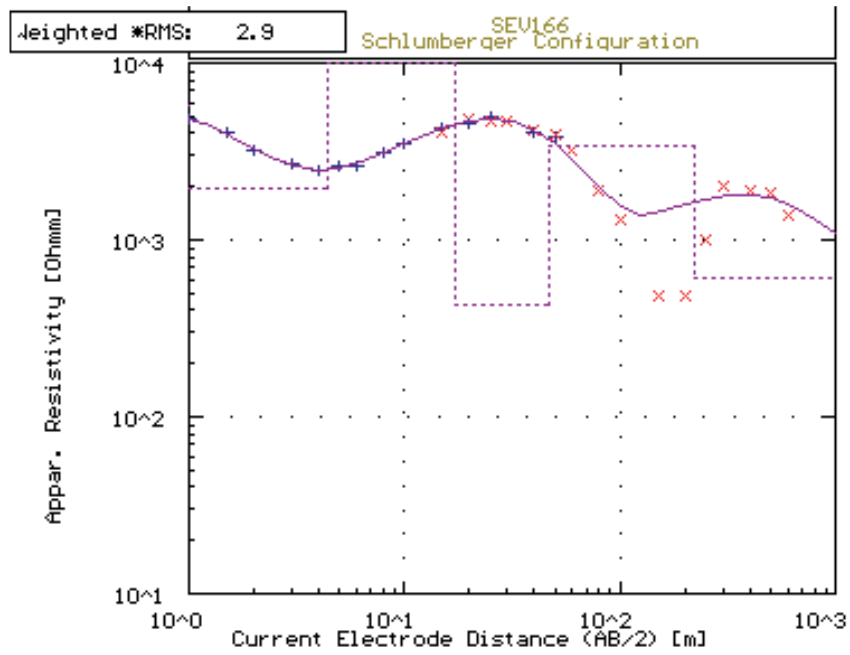
Figura I.54: SEV 164



No	Res	Thick	Depth
1	591.9	0.4	0.4
2	3479.3	2.0	2.4
3	614.2	21.5	23.9
4	465.5	130.4	154.3
5	59.3	-	-

* RMS on smoothed data

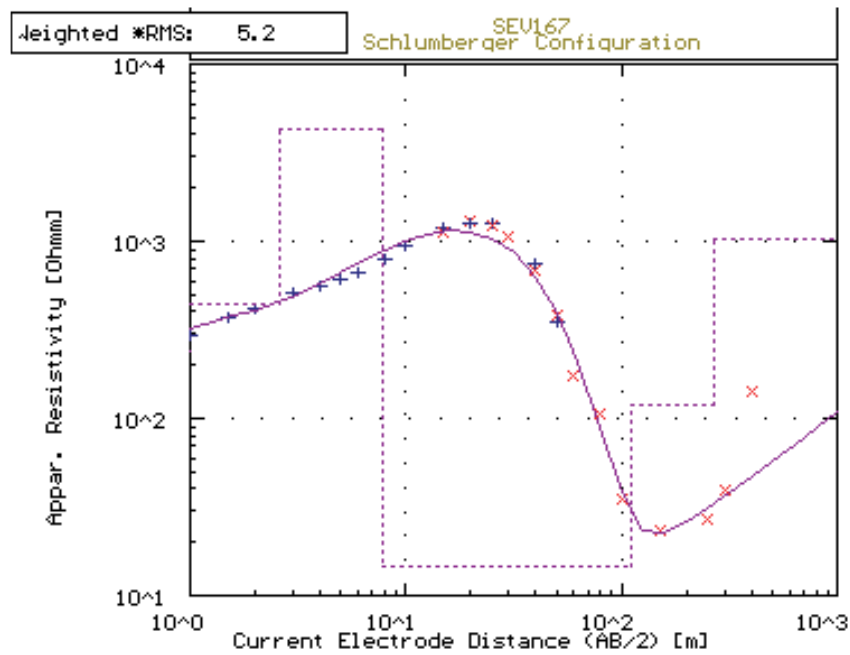
Figura I.55: SEV 165



No	Res	Thick	Depth
1	5665.1	0.8	0.8
2	1955.1	3.6	4.4
3	10036.3	13.0	17.4
4	435.7	29.7	47.0
5	3425.0	174.3	221.3
6	602.5	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

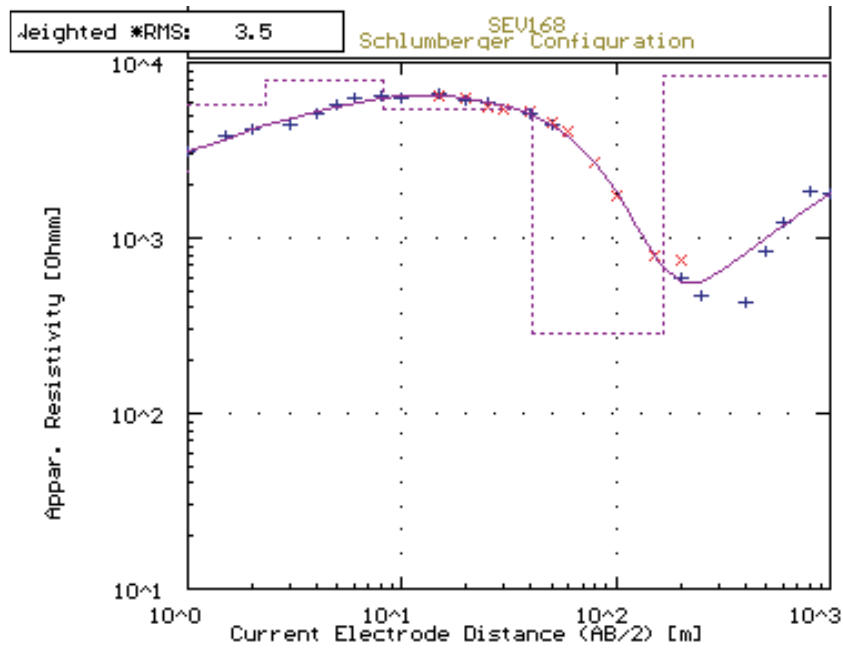
Figura I.56: SEV 166



No	Res	Thick	Depth
1	241.4	0.4	0.4
2	441.2	2.2	2.6
3	4326.9	5.2	7.8
4	14.8	103.8	111.5
5	118.6	156.3	267.8
6	1040.5	-.-	-.-

* RMS on smoothed data

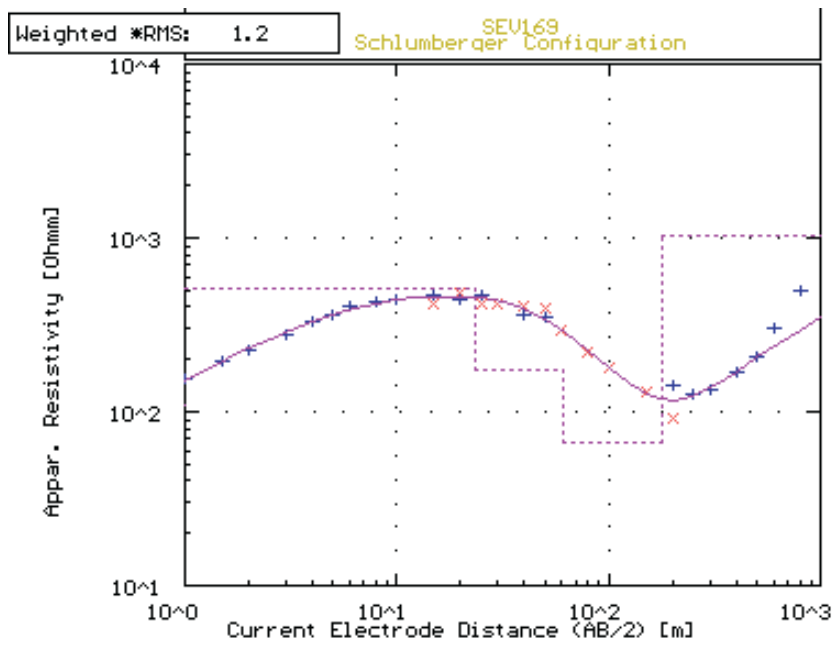
Figura I.57: SEV 167



No	Res	Thick	Depth
1	2369.3	0.5	0.5
2	5733.5	1.8	2.3
3	7811.9	5.8	8.1
4	5401.6	32.6	40.8
5	284.0	126.2	167.0
6	8371.5	-	-

* RMS on smoothed data

Figura I.58: SEV 168



No	Res	Thick	Depth
1	109.2	0.6	0.6
2	506.4	23.0	23.6
3	172.4	37.3	60.9
4	66.7	117.0	177.9
5	1034.5	-	-

* RMS on smoothed data

Figura I.59: SEV 169