



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO GEOELÉTRICA DA CONTAMINAÇÃO
URBANO-INDUSTRIAL DO AQUÍFERO
RECÔNCAVO NO ENTORNO DE ALAGOINHAS,
BAHIA

GILSON LEAL RIBEIRO

SALVADOR – BAHIA

JULHO – 2008

Avaliação Geométrica da Contaminação Urbano-industrial do Aquífero
Recôncavo no Entorno de Alagoinhas, Bahia

por

GILSON LEAL RIBEIRO

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

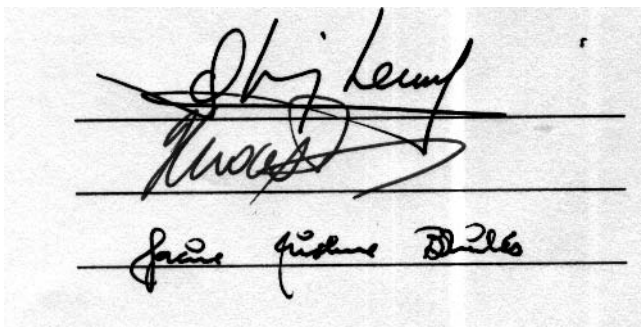
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



The image shows three handwritten signatures on a document, each on a separate line. The first signature is 'Olivar Antônio Lima de Lima', the second is 'Hédison Kiuity Sato', and the third is 'Jacira Cristina Batista de Freitas'. The signatures are written in black ink on a light-colored background.

Dr. Olivar Antônio Lima de Lima - Orientador

Dr. Hédison Kiuity Sato

Dra. Jacira Cristina Batista de Freitas

Data da aprovação: 17/07/2008

*“Se chorei ou se sorri,
o importante é que emoções eu vivi...”*

Roberto Carlos

Dedico este trabalho à Maria Alice,
Cecília e Fernanda,
os três pilares da minha vida.

RESUMO

A sede municipal de Alagoinhas-BA situa-se sobre um importante sistema aquífero granular referido como sistema aquífero Recôncavo. Este sistema compõe-se de: (i) uma unidade livre ou freática constituída de arenitos das formações Marizal e São Sebastião; (ii) uma unidade semi-confinada ou artesianana, composta por espessos pacotes arenosos intercalados com folhelhos e siltitos. Na área estudada essas duas unidades são extensivamente usadas para suprimento das populações e de atividades urbano-industriais, sendo o componente freático extremamente vulnerável à contaminação.

Neste trabalho buscou-se avaliar as condições geoambientais desse sistema aquífero através de levantamentos geofísicos por eletrorresistividade. Para isto, foram realizadas 37 sondagens elétricas verticais utilizando arranjo de eletrodos de *Schlumberger*. Os dados eletrorresistivos obtidos em campo foram invertidos unidimensionalmente utilizando o programa *RES1D* para imagear a estrutura aquífera sub-superficial e avaliar o grau atual de sua contaminação. Mapas de isorresistividade aparente e perfis geoeletricos também foram construídos para auxiliar essa avaliação geoambiental.

A geometria e o acoplamento hidráulico entre as formações Marizal e São Sebastião foram efetivamente definidos na área, sendo evidenciadas duas prováveis zonas de contaminação na fácies arenosa saturada em água da Formação São Sebastião, em sua unidade freática.

ABSTRACT

The city of Alagoinhas is located on an important aquifer system referred as the Recôncavo aquifer system. This system is composed of: (i) an upper water-table or phreatic unit of stacked sandstones bodies of the Marizal and São Sebastião formations; (ii) an artesian or semi-confined unit composed by thick sandstone horizons interlayered with shales and siltstones. In the studied area these two unities are extensively used for the water supply of human population and for urban-industrial uses. The phreatic component is extremely vulnerable to hydro chemical contamination.

In this study we try to evaluate the environmental conditions of this aquifer system using electrical geophysical methods. For this 37 electrical surveys were done using the Schlumberger electrodes arrangement. The acquired data in field were inverted unidimensionally utilizing the RES1D software to image the underground aquifer structure and to evaluate the actual level of its contamination. Apparent isoresistivity maps and geoelectrical sections were also made to aid this aquifer evaluation.

The geometry and the hydraulic coupling between the Marizal and São Sebastião sandstones were effectively defined in the area and we have found two potential zones of contaminations within sandstones zones of the São Sebastião Formation.

CAPÍTULO 4	Conclusões	28
	Agradecimentos	29
	Referências Bibliográficas	30
ANEXO I	Inversões	32

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Mapa geológico do município de Alagoinhas. Em destaque a região estudada. Adaptado de Porciúncula, (2007).	4
1.2	Mapa geológico da Bacia do Recôncavo ilustrando as principais falhas que delimitam a bacia sedimentar, o embasamento cristalino, em vermelho, e o preenchimento sedimentar, em amarelo. No corte A-A', tem-se uma seção geológica esquemática mostrando o arcabouço estrutural da bacia e as formações geológicas que a preenchem. Fonte: Projeto Caminhos Geológicos da Bahia, Petrobrás.	5
1.3	Modelo esquemático com os principais componentes do ciclo hidrológico.	7
1.4	Modelo do experimento de Darcy.	9
2.1	Distribuição das superfícies equipotenciais e fluxo de corrente para uma fonte pontual num meio homogêneo e isotrópico.	14
2.2	Distribuição das superfícies equipotenciais e fluxo de corrente para uma fonte pontual num semi-espaço homogêneo e isotrópico.	15
2.3	Modelo esquemático do arranjo de eletrodos <i>Schlumberger</i>	16
2.4	Modelo esquemático do arranjo de eletrodos <i>Wenner</i>	16
2.5	Modelo esquemático do arranjo de eletrodos dipolo-dipolo.	16
3.1	Arranjo <i>Schlumberger</i> utilizado em campo.	18
3.2	Equipamento SYSCAL-PRO utilizado na aquisição dos dados.	19
3.3	Condições de trabalho em campo.	19
3.4	Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 15 m.	22
3.5	Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 50 m.	22
3.6	Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 100 m.	23
3.7	Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 200 m.	23
3.8	Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos AB/2 de 250 m.	24
3.9	Interpretação da SEV Al-192 e modelo geoeletrico final.	25
3.10	Cortes dos perfis A-A' e B-B'.	26
3.11	Perfil geoeletrico A – A'.	26
3.12	Perfil geoeletrico B – B'.	27

I.1	Inversão da SEV A1127.	32
I.2	Inversão da SEV A1152.	32
I.3	Inversão da SEV A1169.	33
I.4	Inversão da SEV A1176.	33
I.5	Inversão da SEV A1177.	34
I.6	Inversão da SEV A1178.	34
I.7	Inversão da SEV A1179.	35
I.8	Inversão da SEV A1180.	35
I.9	Inversão da SEV A1183.	36
I.10	Inversão da SEV A1184.	36
I.11	Inversão da SEV A1192.	37
I.12	Inversão da SEV A1193.	37
I.13	Inversão da SEV A1194.	38
I.14	Inversão da SEV A1195.	38
I.15	Inversão da SEV A1198.	39
I.16	Inversão da SEV A1199.	39
I.17	Inversão da SEV A1200.	40
I.18	Inversão da SEV A1201.	40
I.19	Inversão da SEV A1202.	41

INTRODUÇÃO

A água é uma substância essencial para a manutenção da vida na Terra. Importante em diversos processos biológicos e geológicos, controla a ocupação humana dos territórios desde os primórdios da civilização. Devido ao atual crescimento populacional, e ao desenvolvimento urbano-industrial e agrícola, o consumo de água potável tem crescido aceleradamente nas últimas décadas.

A água subterrânea, como a principal fonte útil de água doce do planeta, tem papel fundamental em suprir o sustento da humanidade. Diferentemente de outros recursos naturais, a água subterrânea existe distribuída em todo mundo. No entanto, a possibilidade de ser extraída varia grandemente de local para local, dependendo das condições de precipitação e da distribuição dos aquíferos.

A transformação das sociedades agrárias em urbano-industriais, assim como, a produção desenfreada de bens de consumo, acentuaram as contaminações hídricas e ambientais. Na maior parte dos casos, a água subterrânea é menos contaminada do que a superficial. Entretanto, a água subterrânea poluída só pode ser descontaminada por meio de processos caros e demorados. Por isso, se faz necessária a aplicação de ciência e tecnologia no intuito de evitar ou remediar os efeitos mais nocivos da contaminação ambiental.

Neste âmbito, a Geofísica tem sido utilizada como importante ferramenta para detecção de contaminações em aquíferos. Em particular, o método eletrorresistivo é eficaz na delimitação de anomalias condutivas, geralmente associadas a contaminações localizadas dos recursos hídricos em subsuperfície.

O sistema aquífero Recôncavo é um dos mais importantes reservatórios de água potável (mineral) do estado da Bahia. Compõe-se de duas espessas unidades aquíferas: (i) uma unidade superior freática ou livre, que engloba corpos arenosos das formações Barreiras, Marizal e São Sebastião que, juntas podem atingir mais de 100 *m* de espessura; (ii) uma unidade semi-confinada ou artesianas composta de vários corpos arenosos espessos, separados por extensas camadas de folhelhos e siltitos intercalados contendo águas doces até profundidades da ordem de 1.000 *m* (Lima, 1999).

O município de Alagoinhas é famoso pelo seu grande potencial em águas subterrâneas com várias indústrias de bebidas efetuando sua exploração. Porém, estudos anteriores (Pereira e Lima, 2007) apontaram contaminações na componente freática do aquífero, provenientes de lixiviados depósitos de lixos urbanos e industriais.

A fim de elaborar um diagnóstico mais detalhado sobre possíveis alterações hidrológicas no aquífero Recôncavo no entorno da cidade de Alagoinhas, foi realizado este trabalho aplicando o método eletrorresistivo, em complementação ao trabalho efetuado anteriormente por Porciúncula (2007).

Foram executadas 37 sondagens elétricas verticais utilizando arranjo *Schlumberger* de eletrodos com máximos espaçamentos $AB/2$ entre eletrodos de corrente de 300 m. Essas sondagens foram distribuídas ao longo de ruas e estradas disponíveis no entorno da cidade, objetivando mapear melhor uma anomalia geoeétrica apontada no trabalho de Porciúncula (2007).

CAPÍTULO 1

Caracterização da Área em Estudo

1.1 Características Gerais

1.1.1 Localização

O município de Alagoinhas localiza-se a leste do estado da Bahia, entre as coordenadas geográficas $11^{\circ}55'51''$ e $12^{\circ}15'23''$ de latitude Sul e $38^{\circ}15'00''$ e $38^{\circ}35'00''$ de longitude Oeste. Situado 107 km a norte da capital baiana, limita-se ao norte com o município de Inhambupe, ao sul com o município de Catu, a leste com o município de Araçás, a oeste com o município de Aramari, a nordeste com o município de Entre Rios e a sudoeste com o município de Teodoro Sampaio (Figura 1.1).

1.1.2 Aspectos Geográficos e Meio Físico

Com uma área de 734 km^2 , correspondendo a $0,21\%$ da área do estado da Bahia, e uma população de 132.725 habitantes (IBGE, 2007), o município de Alagoinhas é o melhor urbanizado e mais populoso município da região litoral norte baiana. Sua economia possui estrutura setorial distribuída em $3,61\%$ para agropecuária, $46,27\%$ para indústria e $50,12\%$ para serviços.

A área de Alagoinhas inclui os tipos climáticos úmido e subúmido, com totais anuais de chuvas de 1280 mm, temperatura média em torno de 24°C (SEI, 1994). O município se encontra na área das bacias hidrográficas do Recôncavo Norte, onde destacam-se os rios Catu, Cabuçu, Piabas e Sauípe. Sob condições privilegiadas no que diz respeito a ocorrência de águas subterrâneas, Alagoinhas apresenta elevado potencial de recursos hídricos de sub-superfície representado pelo sistema aquífero Recôncavo e um bem desenvolvido sistema de drenagem superficial, de caráter intermitente em alguns meses do ano, com algumas lagoas remanescentes.

A vegetação é do tipo ombrófila densa, atualmente bastante devastada pela implantação de atividades agro-pastoris, principalmente grandes plantações de eucalipto. Os solos são

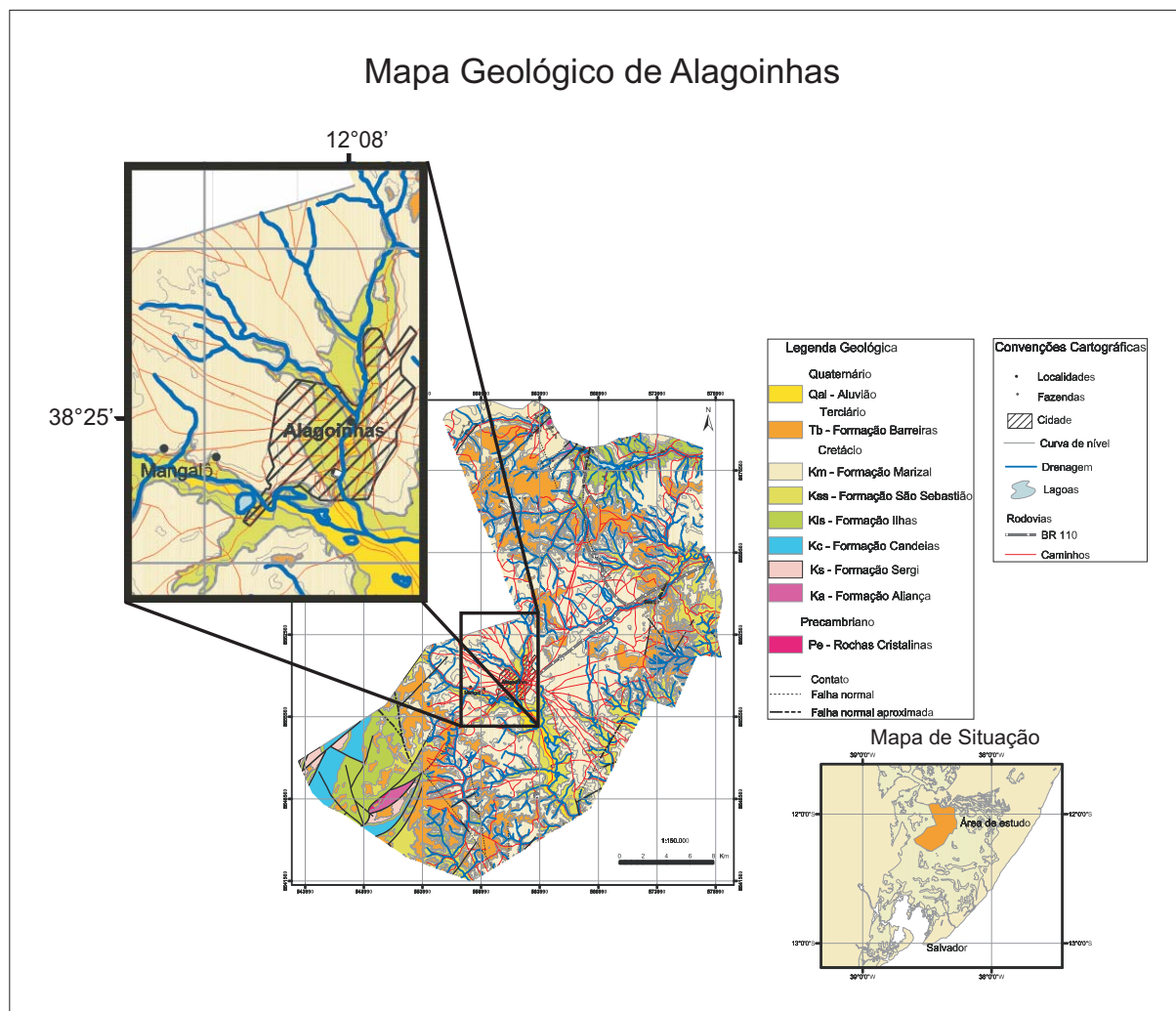


Figura 1.1: Mapa geológico do município de Alagoíneas. Em destaque a região estudada. Adaptado de Porciúncula, (2007).

podzólicos vermelho-amarelo álico quartzosos, latossolos álicos e amarelo distróficos e vertissolos. Tratam-se de solos insaturados, ácidos, aluminosos e de textura arenosa, com exceção dos vertissolos que são normalmente saturados e argilosos (Nascimento et. al., 2004).

1.2 Características Geológicas

Inserido na bacia sedimentar do Recôncavo Norte (Figura 1.2), o município de Alagoíneas pertence ao sistema de bacias cretáceas do leste brasileiro. Preenchido com sedimentos de origem continental (Super-Grupo Bahia), com espessuras locais de até 6.500 m, seu pacote sedimentar apresenta condições geológicas favoráveis à geração e armazenamento de petróleo e gás (Ghignone, 1979). Sua cobertura sedimentar superficial é composta pelas formações Quaternária, São Sebastião, Marizal e Barreiras (Figura 1.1).

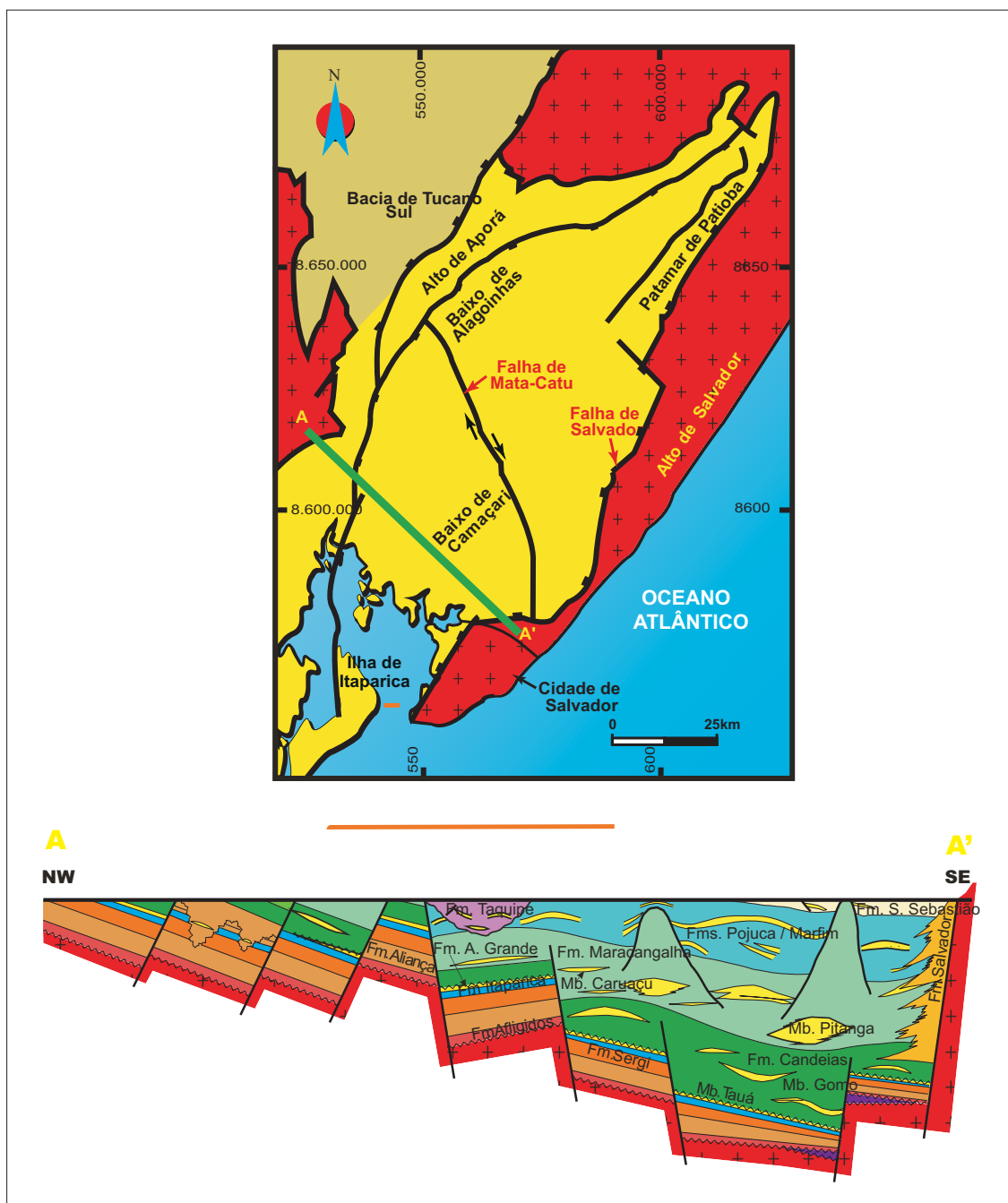


Figura 1.2: Mapa geológico da Bacia do Recôncavo ilustrando as principais falhas que delimitam a bacia sedimentar, o embasamento cristalino, em vermelho, e o preenchimento sedimentar, em amarelo. No corte A-A', tem-se uma seção geológica esquemática mostrando o arcabouço estrutural da bacia e as formações geológicas que a preenchem. Fonte: Projeto Caminhos Geológicos da Bahia, Petrobrás.

A Formação Quaternária abrange os sistemas deposicionais mais recentes sendo composta por sedimentos inconsolidados de origem eólica e fluvial.

No topo de preenchimento da sequência da bacia Recôncavo-Tucano encontra-se a Formação São Sebastião, com espessura de até 3000 m e idade Cretáceo Inferior, constituída de arenitos grossos a finos, amarelo-avermelhados, friáveis, feldspáticos, intercalados com argilas sílticas alternadas (Ghignone, 1979).

Recobrimo em discordância erosiva os arenitos São Sebastião, a Formação Marizal (Cretáceo Inferior), com espessura entre 0 e 30 m, é composta por conglomerados, arenitos, siltitos, folhelhos e calcáreos (Ghignone, 1979).

Os sedimentos da Formação Barreiras ocorrem sob a forma de extensos tabuleiros ligeiramente inclinados em direção à costa, repousando discordantemente sobre rochas das bacias sedimentares mesozóicas e do embasamento cristalino. Com espessura média de 50 m, esta se compõe de areias finas a grossas, argilas cinzas-avermelhadas, roxas e amareladas. Os arenitos são grosseiros a conglomeráticos, com matriz caulínica, pouco consolidados, pobremente selecionado, cinza-esbranquiçados, amarelados e avermelhados (Ghignone, 1979).

O município de Alagoinhas possui alto potencial de ocorrência de águas subterrâneas: suas reservas detêm cerca de 6 a 7% do volume total dos recursos hídricos de subsuperfície existentes na Bacia do Recôncavo Baiano, enquanto que o consumo do município não atinge 20% da sua potencialidade (Nascimento et al., 2004).

Para estudar os aspectos hidrogeológicos do aquífero da área em estudo, introduziremos conceitos fundamentais da hidrogeologia.

1.2.1 Hidrogeologia: Conceitos Fundamentais

A Hidrogeologia é o ramo da geologia que estuda as águas subterrâneas quanto ao controle geológico de seu movimento, volume, distribuição e qualidade. Água subterrânea é toda água que ocorre abaixo da superfície terrestre, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactadas e cristalinas. No planeta, seu volume ($10.360.230 \text{ km}^3$) é aproximadamente 100 vezes superior ao volume de águas superficiais dos rios e lagos (92.168 km^3) (Shiklomanov, 1998). Com relação as águas superficiais, seu uso é mais vantajoso, pois as águas subterrâneas são purificadas naturalmente através da percolação e filtrações admitindo menos influências de variações climáticas.

1.2.2 Água Subterrânea e Ciclo da Água

A Água da Terra encontra-se em três reservatórios principais: oceanos, continentes e atmosfera, entre os quais existe uma circulação contínua ou ciclo hidrológico, ou os ciclos das águas. Este ciclo é responsável pela renovação e purificação de água doce no planeta.

A água subterrânea faz parte do ciclo hidrológico e, portanto, encontra-se relacionada com processos atmosféricos e climáticos, com regime de águas superficiais de rios e lagos e com as nascentes e as terras úmidas que a água subterrânea alimenta naturalmente ao chegar a superfície. Todas essas fontes são complementares entre si, mas podem ser extremamente variadas estendendo-se desde as zonas secas, onde praticamente não existe água, até zonas com abundante água superficial e elevada precipitação.

A água subterrânea constitui a parte invisível de um ciclo da água, no qual, a evaporação, precipitação, infiltração e descarga são os principais componentes (Figura 1.3).



Figura 1.3: Modelo esquemático com os principais componentes do ciclo hidrológico.

A quantidade de água subterrânea envolvida, atualmente, no ciclo hidrológico é bem menor que o volume de água subterrânea que se encontra armazenada em estratos porosos ou fraturados a uma profundidade de poucos milhares de metros abaixo da superfície (Pangeo,2007).

1.2.3 Tipos de Reservas de Água Subterrânea

Segundo sua capacidade de armazenar e transmitir água, uma formação geológica pode ser classificada como: aquífero, aquífero, aquífero, aquífero e aquífero.

Um aquífero é uma formação ou grupo de formações geológicas composta por rochas porosas e permeáveis capazes de reter água e de a ceder em quantidades economicamente aproveitáveis. Segundo o meio de circulação das águas de um aquífero, este pode ser classificado como:

- Poroso - formado por formações geológicas detríticas, por vezes consolidadas por cimento. A água circula através de poros;
- Fraturados e/ou fissurados - composto por formações como granitos, gabros e filões de quartzo fragmentados. A água circula através de fraturas ou pequenas fissuras;
- Cársticos - constituídos por formações dos diversos tipos de calcáreo. A água circula em condutos que resultaram do alargamento da diáclases por dissolução.

Em função da pressão a que está submetida as águas de um aquífero, este pode ser classificado como:

- Livre - uma camada impermeável serve de base a uma zona superior permeável, saturada em água. A superfície superior da zona de saturação está submetida a pressão atmosférica;
- Confinado - formações impermeáveis delimitam a base e o topo da zona saturada em água, que fica submetida a uma pressão maior que a pressão atmosférica (Formiga, 2001).

Um aquitardo é uma formação geológica de natureza semipermeável que pode armazenar quantidades importantes de água, no entanto, transmitindo-a a uma velocidade muito baixa. Sua exploração econômica é inferior à dos aquíferos, entretanto, em determinadas condições podem contribuir significativamente para a recarga vertical destes (Formiga, 2001).

Um aquicludo é uma formação geológica onde a água fica retida, mas circula a uma taxa praticamente desprezível.

Já o aquifugo é uma formação geológica impermeável que não armazena nem transmite água (Formiga, 2001).

1.2.4 Principais Características de um Aquífero

As características mais importantes para descrição da qualidade de um reservatório são a porosidade e a permeabilidade.

Porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de espaços vazios de uma rocha e o volume total da mesma, expressa em percentual ou fração. Pode ser porosidade absoluta - considera apenas o volume total de vazios - e porosidade efetiva - considera apenas os espaços vazios interconectados. Ainda é classificada como:

- Porosidade primária ou deposicional - é aquela adquirida pela rocha durante a sua deposição ou bioconstrução;

- Porosidade secundária ou pós-deposicional - resulta de processos geológicos subsequentes à formação da rocha (Nery, 2004).

A permeabilidade é definida basicamente como a medida da capacidade de uma rocha transmitir fluidos. Usa-se também permeabilidade absoluta - capacidade de fluxo de um fluido que satura 100% dos poros interconectados e/ou fraturas do meio - e permeabilidade intrínseca - capacidade de fluxo característica do meio poroso. A unidade de permeabilidade intrínseca é o *darcy* ou, mais habitualmente, o *mili-darcy* ($1 \text{ darcy} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$). A permeabilidade é usada para calcular taxas de fluxo através da Lei de Darcy.

1.2.5 Lei de Darcy

Em 1856, em Dijon, França, Henry Darcy conduziu seu famoso experimento de despejar água através de tubos preenchidos com sedimentos para ver a quantidade que fluiria por eles em um determinado período de tempo (volume do fluxo por unidade de tempo) (Figura 1.4).

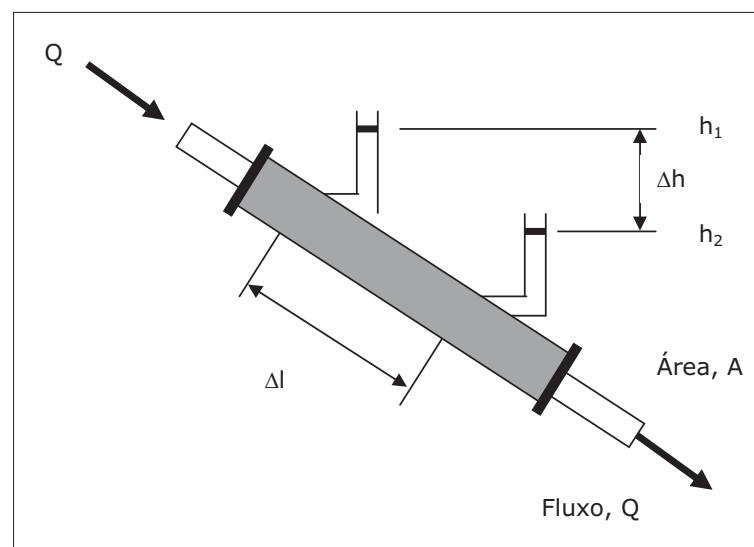


Figura 1.4: Modelo do experimento de Darcy.

O fluxo através da coluna é Q dado em m^3/s . O fluxo por unidade de área, q , dado em m/s , é a descarga específica,

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1.1)$$

também chamada de velocidade Darciana ou fluxo Darciano, mas não é a verdadeira velocidade do fluido.

Através desse experimento, Darcy mostrou que:

- Q está na direção do decréscimo da carga hidráulica (h);

- q é proporcional ao potencial hidráulico, p , ($p = h_1 - h_2$), dado que Δl é fixo;
- q é inversamente proporcional a Δl , dado que p é fixo;

A constante de proporcionalidade é K , condutividade hidráulica, e o fluxo do fluido vai do potencial mais alto ao mais baixo.

$$\vec{q} = -K\nabla p \quad (1.2)$$

A condutividade hidráulica K é dada em m/s e é função tanto do meio quanto do fluido.

1.3 Aspectos Hidrogeológicos da Área em Estudo

As reservas de água subterrânea do município de Alagoinhas, assim como no Recôncavo Baiano, em geral, estão concentradas no sistema aquífero superior representado pelas Formações Marizal e São Sebastião que se distribuem por cerca de 45 a 60% do território do município (Nascimento, 2004).

O sistema aquífero Marizal-São Sebastião apresenta dois componentes acoplados: um componente livre ou freático, representado pelas coberturas das Formações Marizal - eventualmente com sedimentos Barreiras sobrepostos - e pela parte superior da Formação São Sebastião, e um componente semi-confinado ou artesiano, representado pelos pacotes de arenitos contidos totalmente na Formação São Sebastião (Lima, 1999). Normalmente, o componente freático é um reservatório de armazenamento limitado, mas que controla, substancialmente, a carga do sistema artesiano regional (Nascimento, 2004).

O potencial aquífero na Formação Barreiras é reduzido, sem aproveitamento direto na região. Este age como exutório natural para a Formação Marizal.

Devido, principalmente a sua sequência conglomerática basal, a Formação Marizal apresenta possibilidades aquíferas muito significativas. Mesmo tendo menor potencialidade como reservatório que a Formação São Sebastião, a Formação Marizal controla a maior parte de sua recarga. Estudos de Lima e Ribeiro (1982) confirmaram a transferência vertical de águas entre as duas formações, nos trechos de contato direto entre a Formação Marizal e os arenitos da Formação São Sebastião. Quando a sobreposição ocorre sobre os folhelhos da Formação São Sebastião, formam-se fontes de surgência naturais, que funcionam como exutório do aquífero. A recarga sucede diretamente através da precipitação pluviométrica nas áreas de afloramento e pelas exudações provenientes da Formação Barreiras (Nascimento, 2004).

Um comportamento de aquífero semi-confinado é conferido a trechos da Formação São Sebastião aonde há intercalações entre camadas de arenitos, folhelhos e siltitos. A água neste último aquífero está sob pressão graças ao confinamento pelos folhelhos (Nascimento, 2004).

O fluxo de água subterrânea no sistema Marizal-São Sebastião, dentro do município de Alagoinhas, coincide com a direção geral dos maiores rios, de noroeste para sudeste, seguindo o padrão geral do Recôncavo Baiano e tendo a Serra do Roncador como uma grande área de recarga. Em escala local, entretanto, a drenagem subterrânea se faz em direção aos vales e interflúvios da rede de drenagem superficial (Nascimento, 2004).

CAPÍTULO 2

Fundamentos do Método Eletrorresistivo

O método eletrorresistivo baseia-se na medida da diferença de potencial elétrico entre dois pontos causada pela introdução artificial de uma corrente elétrica no meio geológico subterrâneo. Com esta diferença de potencial é possível determinar a distribuição das propriedades elétricas em subsuperfície (Sato, 2002).

2.1 Propriedades elétricas das rochas

A resistividade elétrica de uma rocha é dada basicamente pela condução eletrolítica do fluido contido em seus poros, fraturas ou falhas. Neste processo, os responsáveis pelo transporte das cargas elétricas são os íons oriundos da dissociação de sais. Assim a quantidade de íons presentes na solução influencia na resistividade da rocha: quanto maior a quantidade de íons maior será a condutividade elétrica da rocha.

Outros parâmetros importantes no entendimento das propriedades elétricas dos meios geológicos são: porosidade, saturação e argilosidade.

Na primeira metade do século XX, Archie, trabalhando com arenitos limpos (isentos de argilas ou minerais condutivos), com porosidade (ϕ) entre 10% e 28% e águas com 20.000 a 100.000 ppm de sais, estudou o efeito da porosidade na resistividade das rochas através de uma série de experimentos estabelecendo empiricamente que a resistividade da rocha é dada por:

$$\rho_r = a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_e \quad (\text{Lei de Archie}), \quad (2.1)$$

onde:

ϕ é a porosidade efetiva;

S_w é a saturação em água;

ρ_e é a resistividade do eletrólito;

a, m, n são constantes que variam: $0,5 \leq a \leq 2,5$; $1,3 \leq m \leq 2,5$; e $n \cong 2$.

Observamos na equação 2.1 que a porosidade e a saturação influem potencialmente sobre ρ_r . A resistividade do eletrólito entretanto, influi linearmente.

Os argilominerais possuem cargas negativas distribuídas em sua superfície quando umidificados. Estas cargas atraem cátions das soluções que são fortemente ligados por atração eletrostática, formando, assim, uma camada fixa em volta do argilomineral. Em torno desta camada fixa, forma-se uma camada difusa constituída por outros cátions. Como as forças eletrostáticas na camada difusa não são suficientes para conter estes íons, eles podem mover-se quando submetidos a um campo elétrico. Desta forma, os argilominerais funcionam como um caminho superficial para a condução da corrente elétrica, aumentando a condutividade da rocha.

2.2 Conceitos Fundamentais do Método Eletroresistivo

A aquisição de dados no método eletroresistivo pode ser realizada segundo dois procedimentos:

- Sondagem Elétrica Vertical (SEV): conjunto de determinações da resistividade aparente ρ_a , efetuadas com uma mesma configuração e separação crescente entre os eletrodos de corrente (emissão) e potencial (recepção). Este conjunto de valores compõem as medidas de uma SEV;
- Perfilagem Elétrica (PE): destina-se a exploração horizontal a uma profundidade constante. Este é muito utilizado para detectar estruturas que apresentam descontinuidades laterais de resistividade.

2.2.1 Potencial num Meio Homogêneo

Considerando um fluxo de corrente contínua num meio isotrópico e homogêneo (Figura 2.1), se δA é um elemento de superfície esférica que inclui a fonte e \vec{J} a densidade de corrente em A/m², então temos que a corrente que passa através de δA é:

$$\vec{I} = \vec{J} \cdot \delta A \quad (2.2)$$

Em condições estacionárias, $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ e $\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$, com \vec{E} sendo o campo elétrico conservativo. Portanto, tem-se que $\vec{E} = -\nabla V$, onde V é o potencial elétrico gerado pela fonte.

A densidade de corrente \vec{J} e o campo elétrico \vec{E} são relacionados segundo a Lei de Ohm:

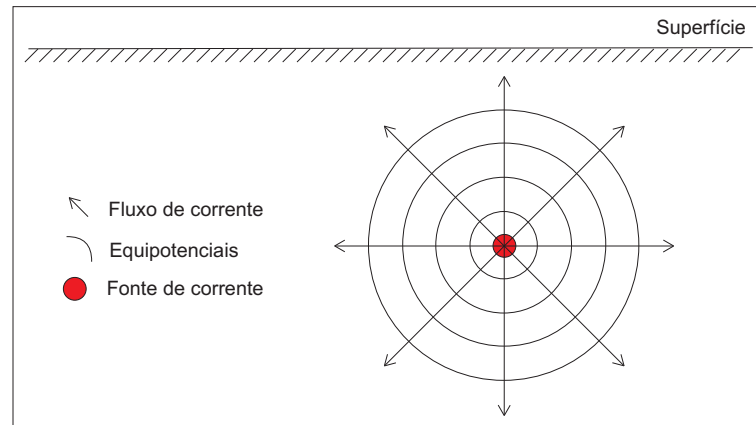


Figura 2.1: Distribuição das superfícies equipotenciais e fluxo de corrente para uma fonte pontual num meio homogêneo e isotrópico.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad , \quad (2.3)$$

onde:

σ é a condutividade do meio.

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

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.4)$$

Dada a simetria esférica do problema, o potencial será uma função apenas de r , assim:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Resolvendo a Equação de Laplace, 2.5, com sucessivas integrações, temos que:

$$V = \frac{A}{r} + B \quad (2.6)$$

Com A e B constantes a serem determinadas através das condições de contorno, que são: a conservação da corrente elétrica no meio, da qual se obtém:

$$A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (2.7)$$

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

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (2.8)$$

2.2.2 Potencial num Semi-espço Homogêneo

Considerando que uma fonte de corrente esteja na superfície do semi-espço homogêneo (Figura 2.2), a corrente fluirá sobre uma superfície semi-esférica no meio inferior condutor. Supondo que o meio superior seja o ar, com condutividade $\sigma = 0$, temos que:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.9)$$

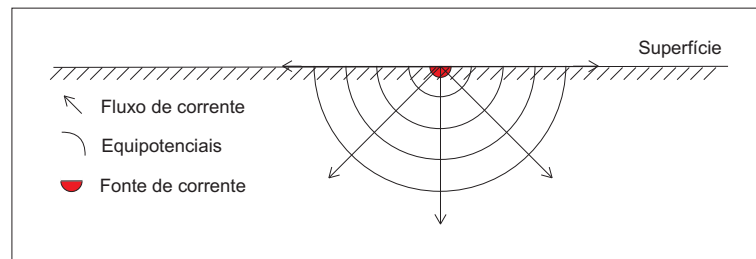


Figura 2.2: Distribuição das superfícies equipotenciais e fluxo de corrente para uma fonte pontual num semi-espço homogêneo e isotrópico.

Utilizando um dispositivo com quatro eletrodos, sendo dois de corrente, A e B e outros dois de potencial, M e N , calcula-se a diferença de potencial entre M e N (Figuras 2.3 a 2.5), $\Delta V = V_m - V_n$, sendo:

$$V_m = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] \quad (2.10)$$

e

$$V_n = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] \quad (2.11)$$

de modo que

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2.12)$$

Fazendo o fator geométrico do arranjo de eletrodos utilizado K como sendo:

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (2.13)$$

Substituindo 2.13 em 2.12 temos:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.14)$$

Esta expressão permite determinar a resistividade elétrica de um semi-espaço homogêneo, a partir das medidas da diferença de potencial elétrico e da intensidade da corrente injetada, conhecendo a geometria do arranjo.

Na literatura, temos alguns arranjos mais comuns aplicados em campo, que são:

- Arranjo *Schlumberger* (Figura 2.3)

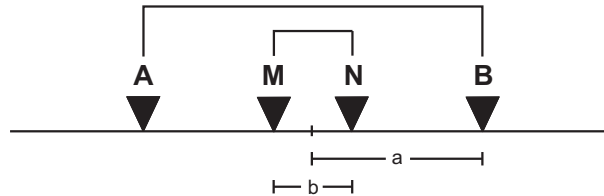


Figura 2.3: Modelo esquemático do arranjo de eletrodos *Schlumberger*.

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

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad (2.15)$$

- Arranjo *Wenner* (Figura 2.4)

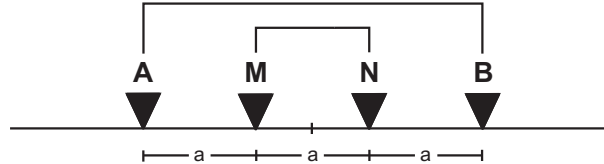


Figura 2.4: Modelo esquemático do arranjo de eletrodos *Wenner*.

Sendo $AM = MN = NB = a$

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \quad (2.16)$$

- Dipolo-Dipolo (Figura 2.5)

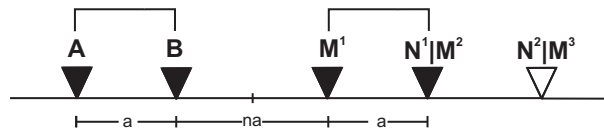


Figura 2.5: Modelo esquemático do arranjo de eletrodos dipolo-dipolo.

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

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \pi a n (n + 1) (n + 2) \quad (2.17)$$

2.2.3 Potencial num Meio com Multicamadas Homogêneas Horizontais

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

$$\rho = a^2 \int_0^{\infty} K(\lambda) J_1(\lambda a) \lambda d\lambda, \quad (2.18)$$

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 *Slicher* (Koefoed, 1979). A integral numérica da equação 2.18 é avaliada usando a teoria de filtragem linear digital.

CAPÍTULO 3

Aquisição, Tratamento e Interpretação dos Dados Geoelétricos

3.1 Aquisição dos Dados

A fim de investigar as formações geológicas no subsolo do entorno de Alagoinhas e as possíveis contaminações em seus horizontes aquífero, foi realizado um estudo geoelétrico baseado na aplicação da técnica da sondagem elétrica vertical, utilizando o arranjo *Schlumberger* (Figura 3.1) com espaçamentos $AB/2$ variando entre 1 e 300 m. Em geral a distância entre as SEVs foi de aproximadamente 500 m, exceto ao atravessar áreas urbanizadas, chegando até 2 km.



Figura 3.1: Arranjo *Schlumberger* utilizado em campo.

O equipamento utilizado para a aquisição dos dados foi o resistímetro modelo *Syscal-Pro*, fabricado pela *Iris Instruments*, pertencente ao CPGG/UFBA (Figura 3.2). Composto por uma unidade transmissora/receptora, seu sistema operacional baseia-se na leitura simultânea da resistividade e da cargabilidade aparentes, através da aplicação de uma corrente elétrica, com o auxílio de eletrodos de aço que fazem contato com o terreno.



Figura 3.2: Equipamento SYSCAL-PRO utilizado na aquisição dos dados.

Foram realizadas 37 SEVs (AL-170 a AL-205) em duas etapas de aquisição, nos meses de janeiro e março de 2008, intercaladas entre outras 18 SEVs anteriormente realizadas por Porciúncula (2007).

Para reduzir a resistência de contato com o terreno, foi aplicada uma solução salina nas regiões de contato entre os eletrodos e o solo. Para monitorar a qualidade dos dados, gráficos de $\rho_a \times AB/2$ foram gerados, para obtenção da curva de campo, sendo empregado também o procedimento conhecido como embreagem.



Figura 3.3: Condições de trabalho em campo.

3.2 Processamento dos Dados

O processamento dos dados consistiu na construção de mapas de isocontornos de resistividade aparente e na inversão unidimensional das SEVs.

Os mapas de isocontornos de resistividade aparente foram construídos utilizando o programa gráfico *SURFER 8* da *Golden Software*. Foram selecionados espaçamentos $AB/2$ de: 15, 50, 100, 200 e 250 m, investigando profundidades de aproximadamente: 7,5, 25, 50, 100 e 125 m, respectivamente.

Os dados das sondagens foram invertidos utilizando o programa *RES1D* da *Geotomo Software*. Este executa a modelagem direta e inversa de sondagens elétricas. No modo de inversão é utilizada uma subrotina para determinar espessuras e resistividades das camadas de um modelo $1D$ introduzido pelo intérprete que é ajustado aos valores medidos no campo. O método de otimização usado é o dos Mínimos Quadrados (Lines e Treitel, 1984). Neste método o modelo inicial deve ser fornecido, e a subrotina de inversão modifica as espessuras e resistividades das camadas no intuito de reduzir a diferença entre os valores calculados e os medidos.

Um pré-processamento dos dados foi realizado, descartando pontos discordantes (ruídos) em algumas curvas, a fim de suavizá-las.

3.3 Fontes de Erro

As etapas de aquisição, processamento e interpretação dos dados de campo estão passíveis a fontes de erro.

Na aquisição, os dados podem ser distorcidos pela topografia do terreno, heterogeneidade das camadas geológicas (variações laterais de resistividade, efeito das inclinações das camadas, presença de lentes de argila, dentre outros) e erros de medidas nas distâncias entre os eletrodos.

As condições topográficas do terreno influenciam as medidas de resistividade, uma vez que podem produzir falsas anomalias ou distorcer anomalias reais pela alteração das superfícies equipotenciais. O fluxo de corrente é espalhado nos vales e concentrados nos morros. Caso as variações de topografia sejam pequenas em relação às variações de espaçamentos entre os eletrodos, o efeito da topografia pode ser desprezível nos resultados.

As heterogeneidades geológicas das camadas podem distorcer as linhas de fluxo e as superfícies equipotenciais. A teoria básica dos métodos elétricos considera um modelo de subsuperfície com meios homogêneos e isotrópicos, distribuído em camadas plano-paralelas e horizontalizadas, diferentemente do encontrado na realidade geológica.

Nas etapas de processamento, erros podem ocorrer desde a digitação dos dados de entrada para as construções dos mapas e perfis, até erros na definição do modelo inicial proposto na fase de inversão.

A fase interpretativa está sujeita a erros de leitura de gráficos, mapas e perfis, segundo a sensibilidade humana e a más associações dos resultados geofísicos com o modelo geológico da área, diminuindo a medida que aumenta a experiência profissional do intérprete.

3.4 Resultados

Cinco mapas de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 15, 50, 100, 200 e 250 m foram produzidos para avaliar a variação desta, segundo a profundidade investigada.

Os mapas para espaçamentos $AB/2$ de 15 e 50 m investigam, aproximadamente, 7 e 25 m de profundidade (Figura 3.4 e Figura 3.5). Nestes, observa-se a presença de zonas bem definidas, com elevadas resistividades, $\rho_a > 3000$ ohm.m, zonas mais condutivas entre $200 < \rho_a < 2000$ ohm.m e pequenas anomalias mais condutivas distribuídas localmente na área. Já os mapas para $AB/2$ 100, 200 e 250 m, investigaram as profundidades de 50, 100 e 125 m (Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8), respectivamente, mapeando em sua quase totalidade resistividades inferiores a 2000 ohm.m com distribuições superficiais de resistividade inferior a 250 ohm.m aumentando a área com a profundidade.

As resistividades aparentes superiores a 2000 ohm.m são interpretadas e atribuídas às áreas aflorantes da Formação Marizal. São áreas de topografia mais elevada onde ocorre uma espessa zona vadosa do componente aquífero freático, daí os elevados valores de ρ_a . Áreas menos resistivas com $150 < \rho_a < 900$ ohm.m podem estar associadas a arenitos mais espessos da porção superior da Formação São Sebastião. Zonas com resistividades inferiores a 100 ohm.m podem estar relacionadas com a fácies argilosas da Formação São Sebastião.

As anomalias condutivas mais superficiais podem estar correlacionadas com possíveis fontes de contaminação do aquífero.

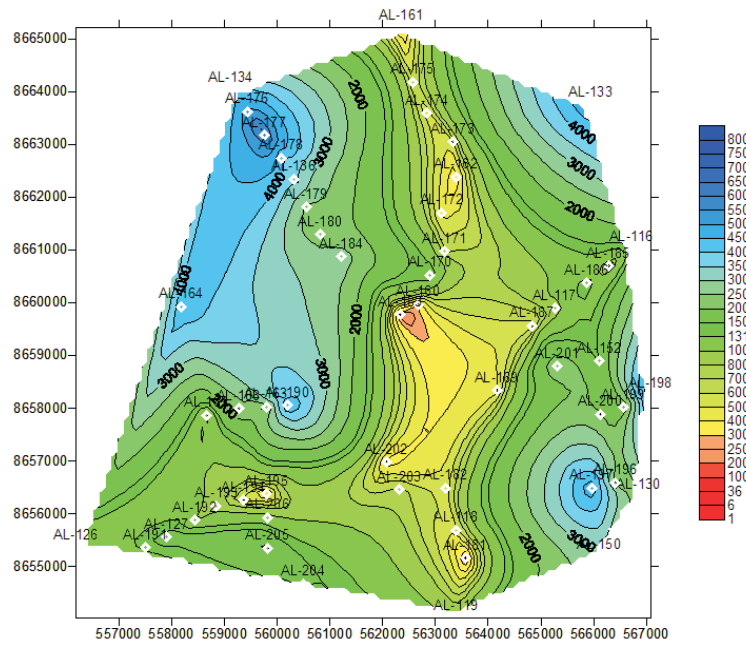


Figura 3.4: Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 15 m.

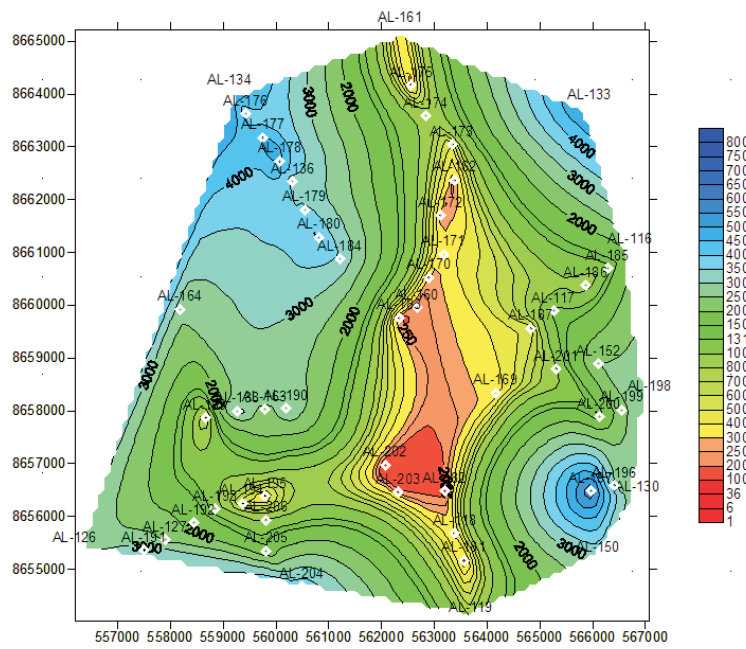


Figura 3.5: Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 50 m.

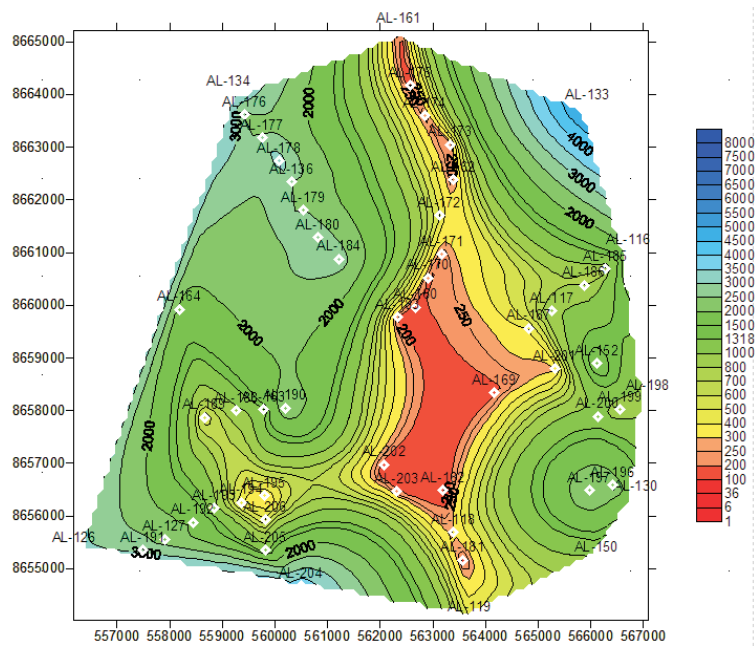


Figura 3.6: Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 100 m.

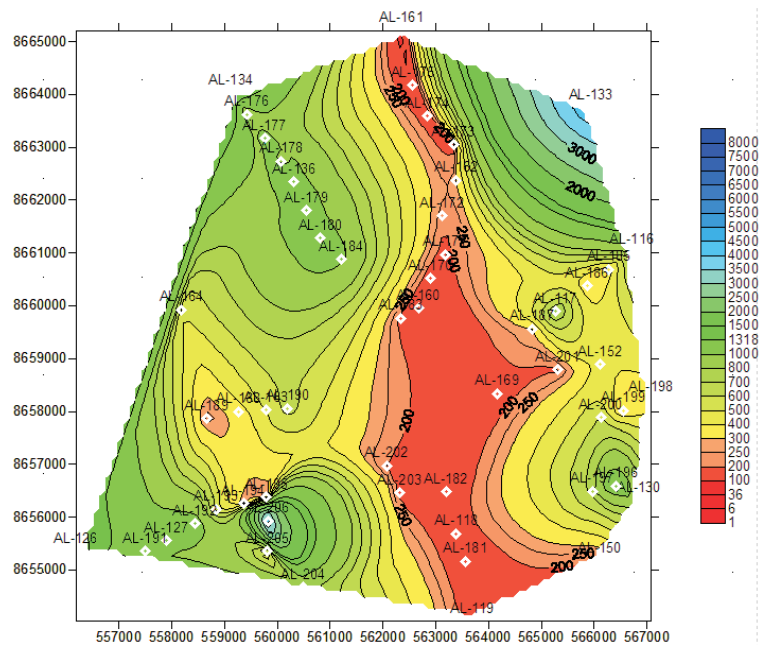


Figura 3.7: Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 200 m.

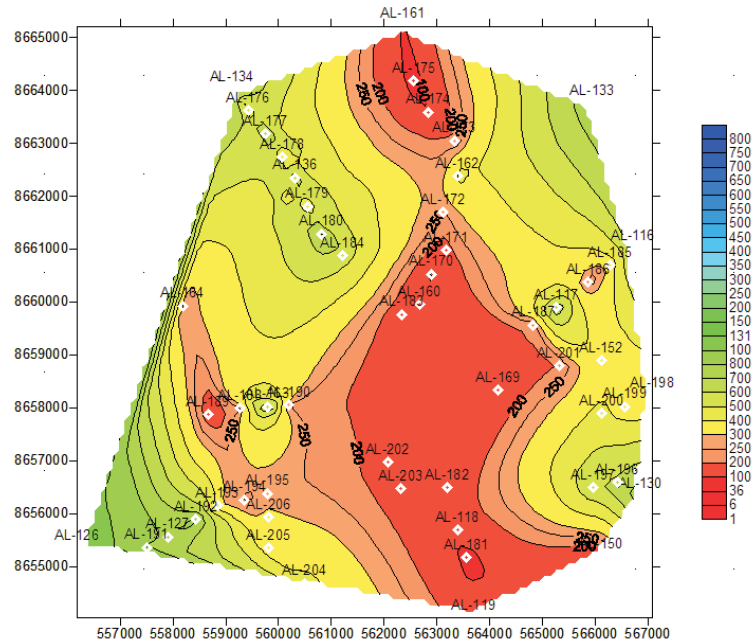


Figura 3.8: Mapa de isocontornos da função resistividade aparente para espaçamentos $AB/2$ de 250 m.

Assim, nos mapas das Figuras 3.4 a 3.6, as áreas mais resistivas ($\rho_a > 2000$ ohm.m) correspondem as áreas de afloramento dos arenitos da Formação Marizal. Nas áreas correspondentes nos mapas das Figuras 3.7 e 3.8 os valores de ρ_a (400 a 1.000 ohm.m) sugerem que o aquífero subjacente está saturado com água de baixa salinidade provavelmente de boa qualidade química. Todavia, as pequenas manchas condutivas observadas nas Figuras 3.4 e 3.5 (nos quais $\rho_a < 300$ ohm.m) aumentam de extensão com a profundidade, definindo uma anomalia condutiva fechada centrada ao longo do rio Catu.

As inversões das SEVs, em geral, resultaram em modelos unidimensionais contendo entre 3 e 6 camadas, distribuídas dentro das formações Marizal e São Sebastião. A Figura 3.9 mostra um exemplo de curva de sondagem na qual encontra-se as medidas realizadas no campo, a curva de resistividade aparente teórica e o modelo invertido. Esta demonstra a presença de um intervalo arenoso da Formação São Sebastião saturado em água. A Formação Marizal depositada acima desta, também foi mapeada.

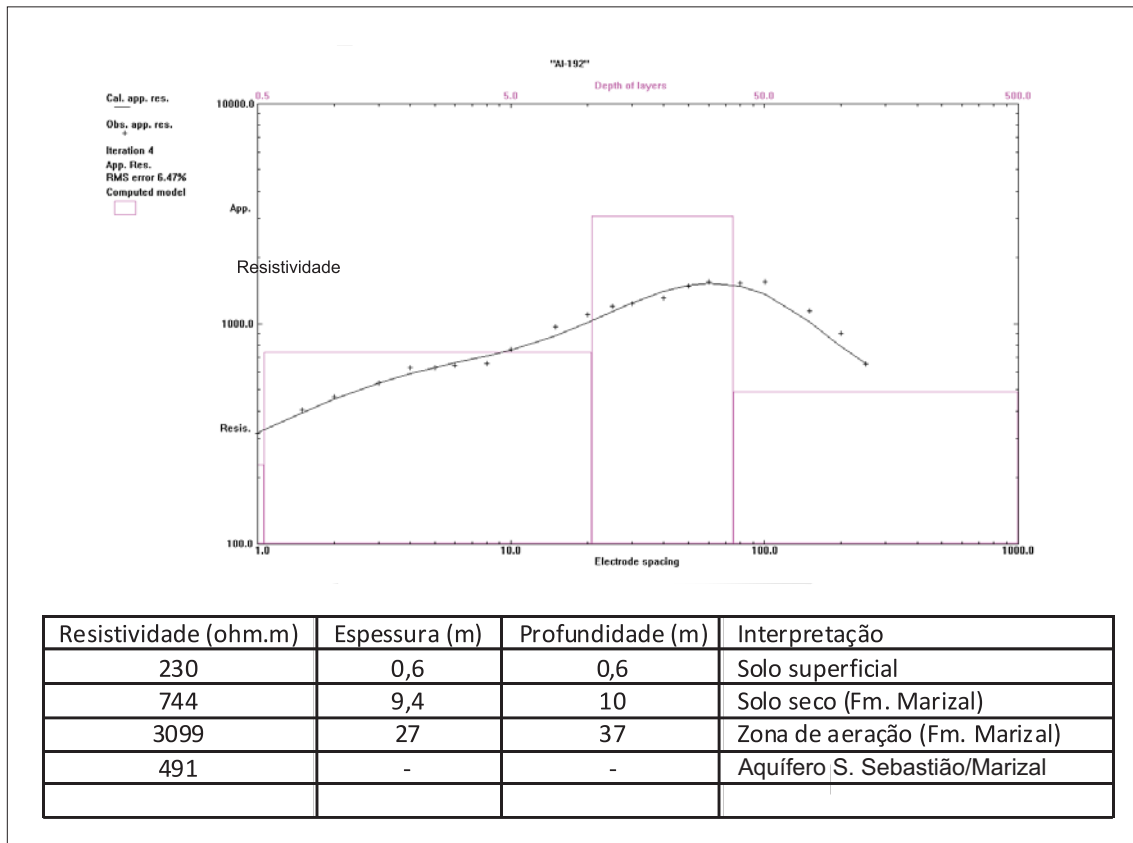


Figura 3.9: Interpretação da SEV Al-192 e modelo geológico final.

Partindo das SEVs interpretadas, dois perfis geoeletricos foram construídos nos cortes A-A' e B-B' representados na Figura 3.10.

A seção A – A' foi composta pelas SEVs: 127, 152, 169, 192, 193, 194, 195, 201 e 202 (Figura 3.11). Duas porções da Formação Marizal foram interpretadas ($\rho_a > 2000$ ohm.m), situadas acima da provável fácies arenosas da Formação São Sebastião.

A seção B – B' utilizou como base as SEVs: 169, 176, 177, 178, 179, 180, 183, 184, 198, 199 e 200 (Figura 3.12). Nesta, também foram interpretadas duas porções da Formação Marizal com espessuras médias de 30 m, possíveis fácies arenosas e o provável topo de uma das fácies argilosas da Formação São Sebastião.

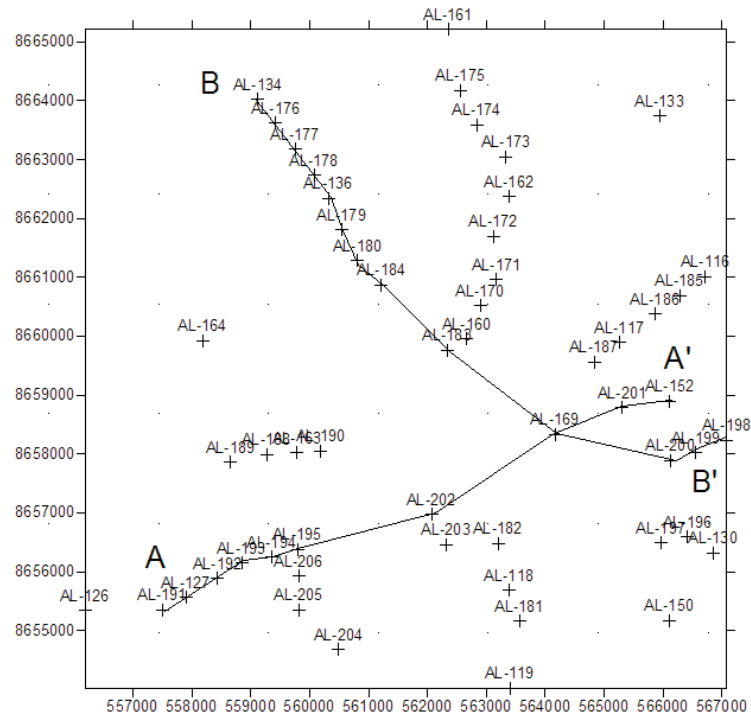


Figura 3.10: Cortes dos perfis A-A' e B-B'.

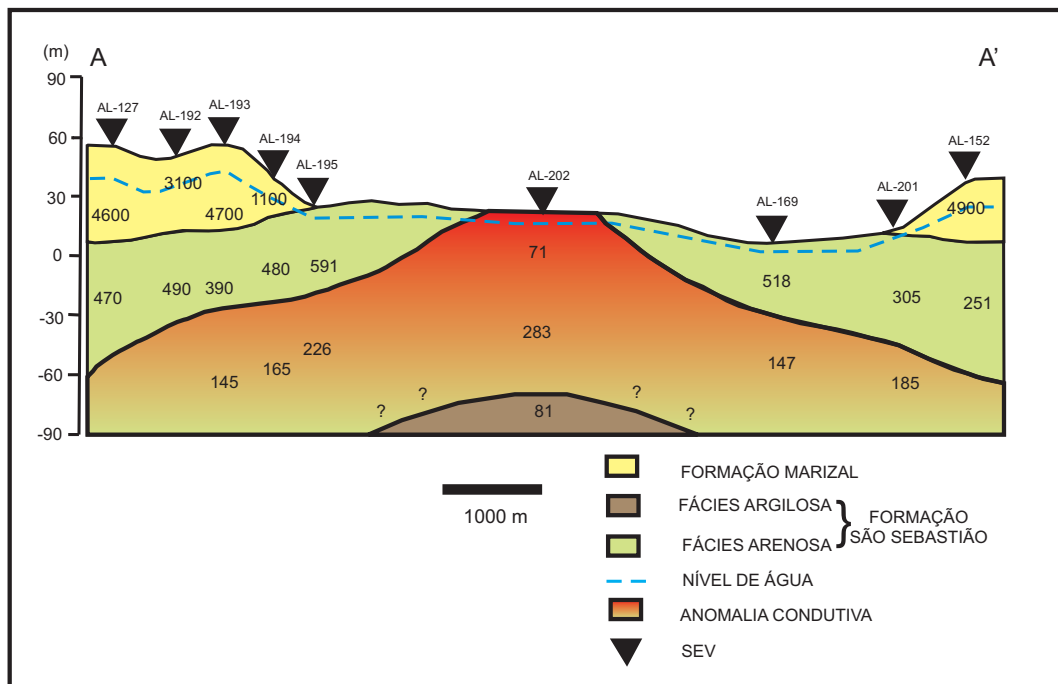


Figura 3.11: Perfil geolétrico A – A'.

Em ambos os perfis foram encontradas anomalias condutivas locais, de baixa profundidade, possíveis contaminações urbano-industriais no aquífero estudado.

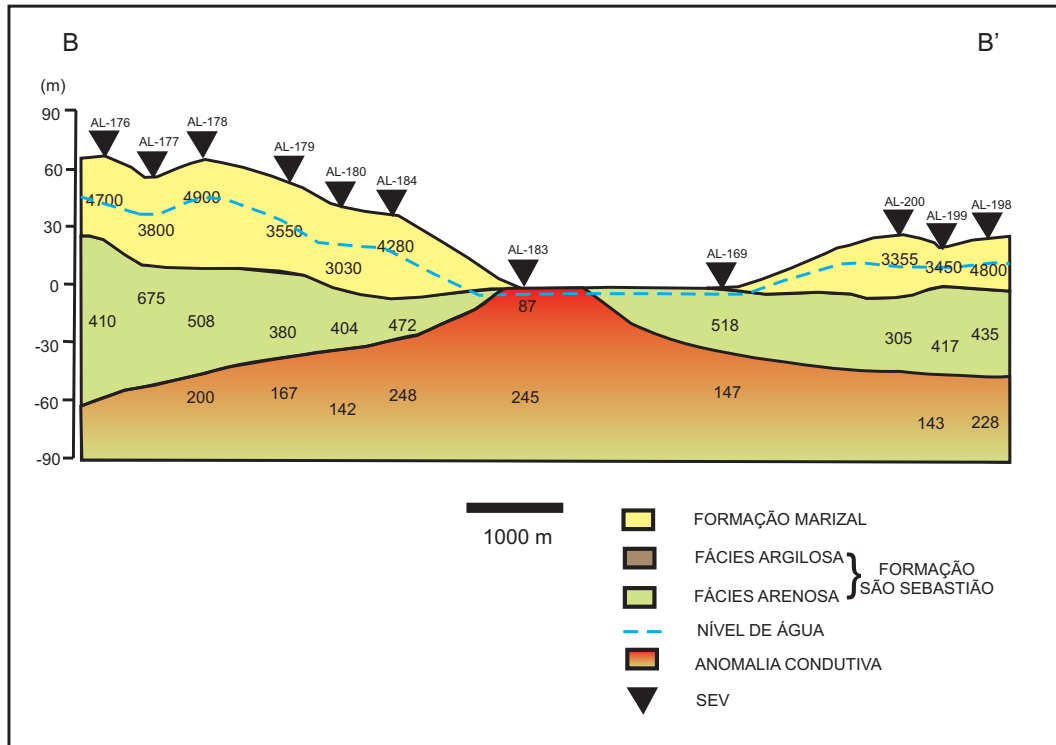


Figura 3.12: Perfil geolétrico $B - B'$.

Estes resultados podem ser confirmados através de perfurações de poços de monitoramento.

CAPÍTULO 4

Conclusões

A utilização da geofísica elétrica possibilitou o detalhamento do ambiente hidrogeológico no entorno da cidade de Alagoinhas, principalmente no que diz respeito a suas condições ambientais, mapeando possíveis fontes de contaminações no seu principal aquífero.

A anomalia geométrica condutiva delineada nos mapas das figuras 3.6 a 3.8 e nas seções geológicas das figuras 3.11 e 3.12 é atribuída a uma extensa mancha de contaminação do aquífero livre subjacente causada pela degradação superficial ao longo do rio Catu, com práticas inadequadas de uso do solo e da água superficial. Ao longo de todo vale são observadas as seguintes fontes de poluição: (i) despejo de esgotos domésticos e industriais; e (ii) lavagem de veículos e acesso de animais.

O método eletrorresistivo mostrou-se eficiente também ao imagear as formações Marizal e São Sebastião, contribuindo assim, para melhor entendimento geológico da região, e do seu aquífero.

No âmbito científico-acadêmico, este trabalho foi de suma importância, promovendo estudos referentes aos recursos naturais, especialmente de solos e recursos hídricos, além de contribuir na formação e treinamento de pessoal na área geoambiental.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida.

À minha família, alicerce da minha educação, em especial a vovó Maria Alice, minha mãe Cecília e meu padrinho Otoniel, que tanto lutaram por este dia.

Minha amada companheira Fernanda, fundamental em minha vida.

Agradeço muito ao professor Olivar pela oportunidade e confiança em mim depositadas.

Aos professores, em especial, a queridinha professora Jacira, pelos ensinamentos e conselhos transmitidos.

A Medeiros, grande companheiro na fase do trabalho de campo, e ao grande piadista Roberto.

E por fim aos meus amigos: Victor, Saulo, Hércio, Tito, Deley, Camilo, Jonatas, Felipe, Luís, Jorge, Zé, Moisés, Martonni, Lucas.

E a todos os colegas da Universidade.

Referências Bibliográficas

- Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in Porus Media.
- Formiga, K. (2001) Modelos matemáticos de Águas subterrâneas (notas de aula).
- Ghignone, J. (1979) Geologia dos sedimentos fanerozoicos do estado da bahia, Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia. Salvador, Secr. de Estado de Minas e Energia da Bahia, **1**:24–117.
- Harvey, C. (2000) Hidrologia de lençóis freáticos (notas de aula).
- IBGE (2007) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Dados de Contagem da População.
- Keller, G. V. e Frischknecht, F. C. (1966) Electrical Methods in Geophysical Prospecting, Pergamon Press, England.
- Koefoed, O. (1979) Geosounding principles 1: Resistivity sounding measurements, elsevier science publishing company, amnsterdan.
- Lima, O.A.L.; Ribeiro, C. (1982) Caracterização hidrogeológica do aquífero são sebastião na Área de captação do cia-ba, Revista Brasileira de Geofísica., **1**:11–22.
- Lima, O. (1993) Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the reconcavo-tucano basin, bahia-brazil, Geophysics, **58**:1689–1702.
- Lima, O. (1999) Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero recôncavo na região de camaçari - dias d'avila.
- Lima, O. (2003) Geossistemas de recursos hídricos: Água subterrânea no estado da bahia, Bahia Análise & Dados, **13**:391–402.
- Lines, L.R.; Treitel, S. (1984) Tutoria: A review of least-squares inversion and its application of geophysical problems, Geophysical Prospecting, **32**:159–186.
- Moreira, C.A. e Dourado, J. (2005) Análise de contaminantes de fase líquida não-aquosa (napls) por aplicação do método eletromagnético indutivo (em), Revista Brasileira de Geofísica., **23**:213–220.
- Nascimento (2006) Avaliação quantitativa e qualitativa das Águas subterrâneas como componente do plano municipal de saneamento ambiental de alagoinhas, bahia., Congresso Internacional do Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano: Biodiversidade, Recursos Hídricos e Responsabilidade Social - modelhuman.
- Nery, G. (2004) Perfilagem geofísica de poços (notas de aula).

- Pangeo, B. (2007) Prospecto relativo a um tema-chave do ano internacional do planeta terra 2007-2009.
- Parasnis, D. (1965) Principles of Applied Geophysics, Chapman-Hall, Great Britain.
- Pereira, P.A.; Lima, O. R. M. (2007) Estrutura elétrica da contaminação hídrica sob os depósitos de resíduos sólidos urbanos do município de alagoinhas, bahia, Revista Brasileira de Geofísica., **25**:1–15.
- Porciúncula, R. (2007) Aplicação da método eletrorresistivo na avaliação geoambiental da região de alagoinhas, bahia.
- Sato, H. (2002) Métodos elétricos (notas de aula).
- Sato, H. K. (1993) Potencial elétrico devido a uma fonte de corrente no interior de um semi-espaço heterogêneo, In: *Resumos Expandidos, 3o. Congr. Intern. da SBGf*, vol. 1, pp. 1358–1362, Rio de Janeiro, SBGf.
- SEI (1994) , Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Perfil da Região Econômica Litoral Norte, Salvador.
- SEI (1999) , Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Análise de Atributos Climáticos do Estado da Bahia.
- Sharma, P. (1986) Geophysical Methods in Geology, vol. II, Elsevier Science, New York.
- Shiklomaov, L. (1998) World water resources: A new appraisal and assessment for the 21th century., IHP Report. UNESCO, Paris.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) Applied Geophysics, Cambridge Un. Press, Cambridge.

ANEXO I

Inversões

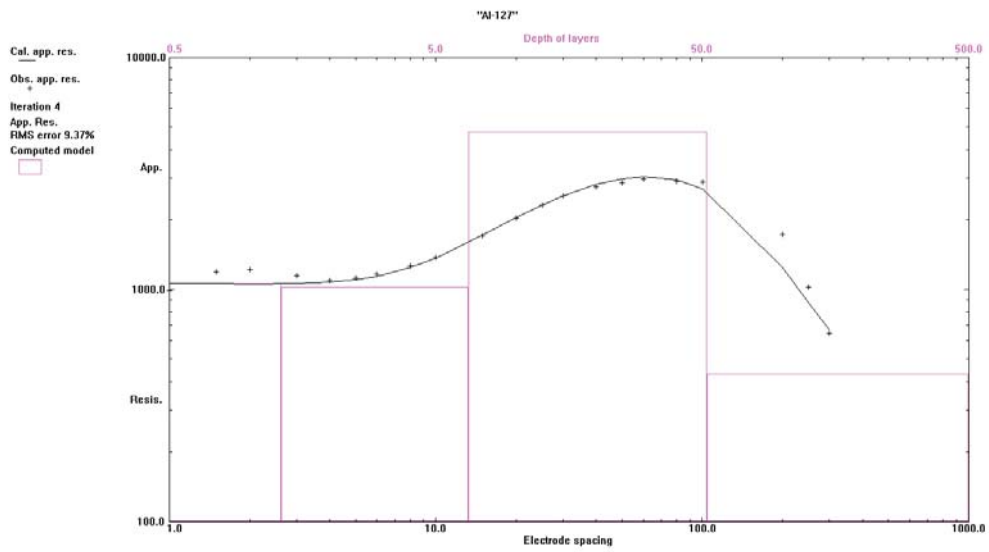


Figura I.1: Inversão da SEV A1127.

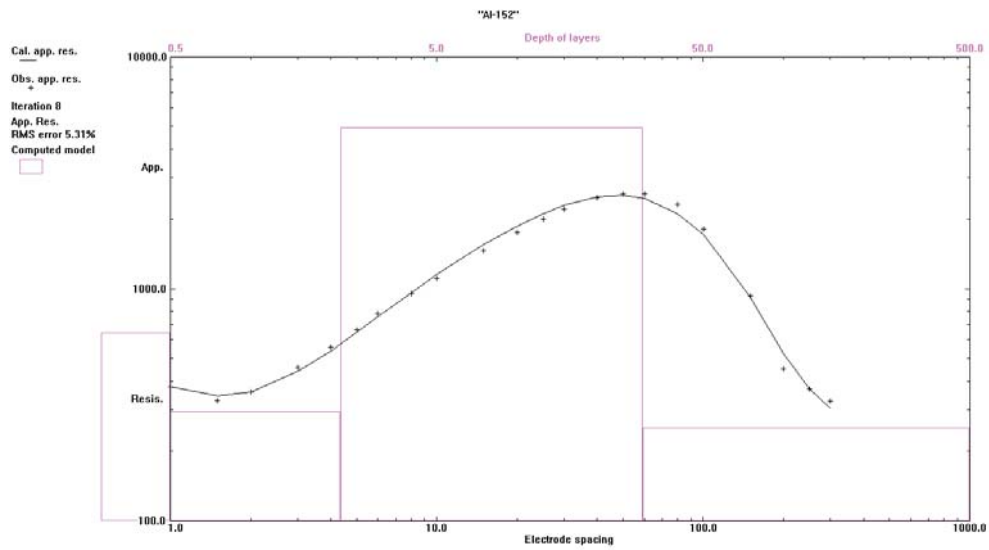


Figura I.2: Inversão da SEV A1152.

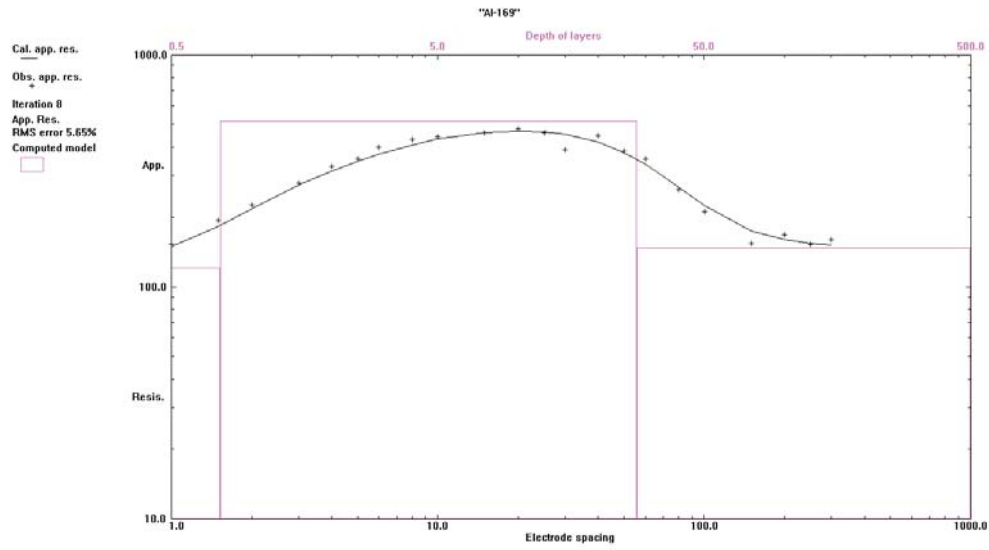


Figura I.3: Inversão da SEV A1169.

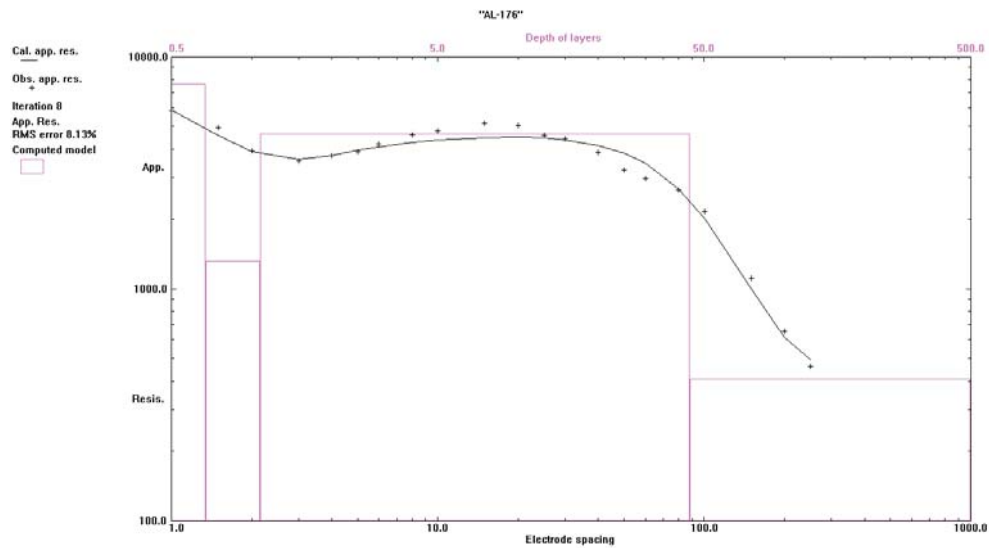


Figura I.4: Inversão da SEV A1176.

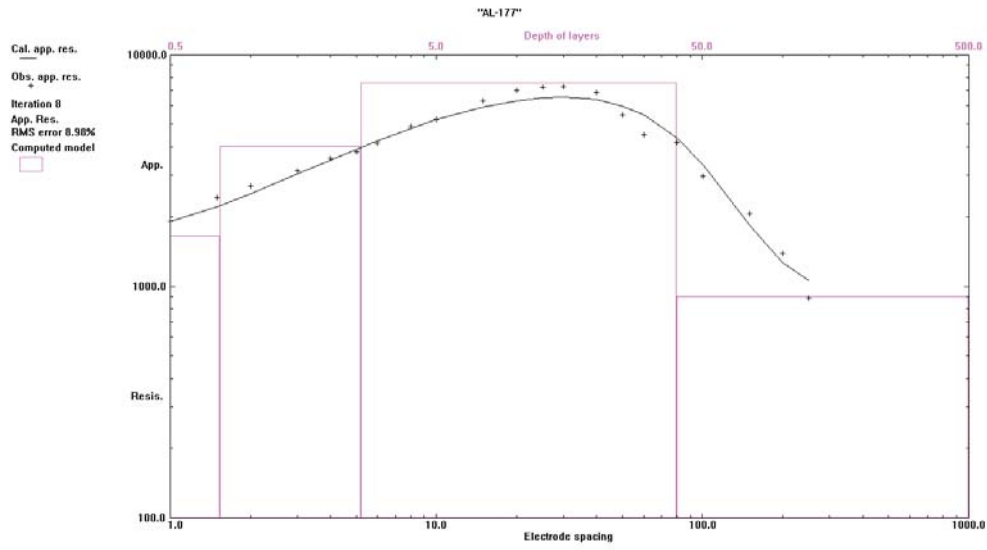


Figura I.5: Inversão da SEV A1177.

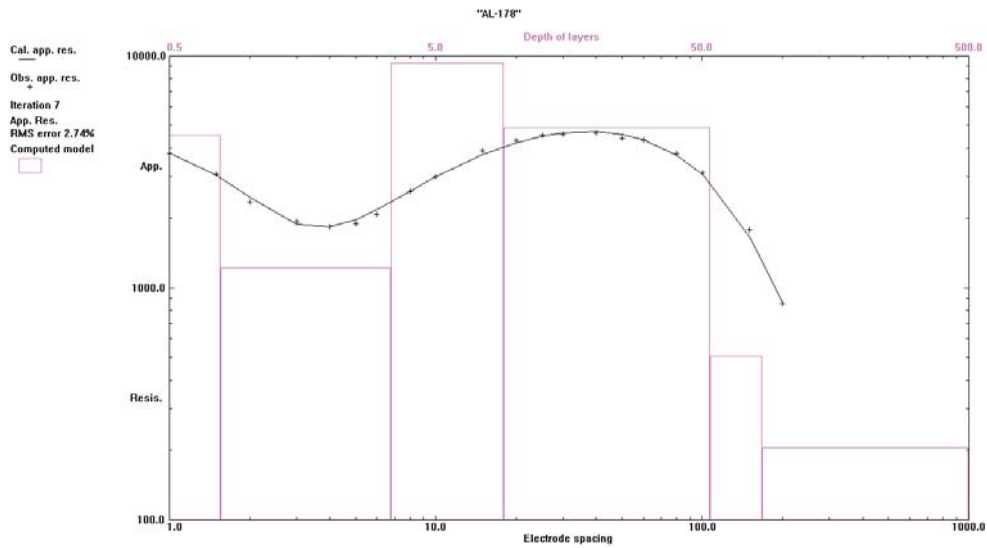


Figura I.6: Inversão da SEV A1178.

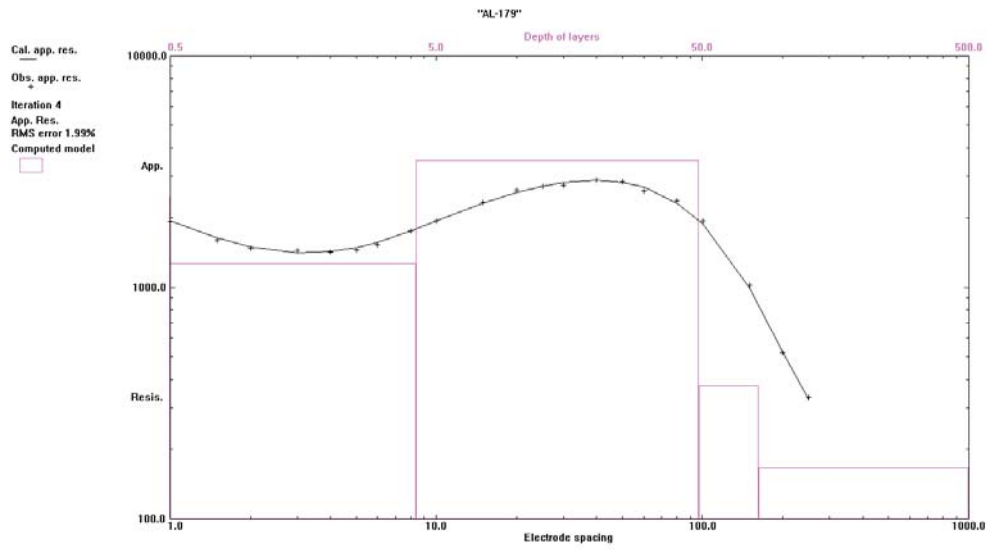


Figura I.7: Inversão da SEV A1179.

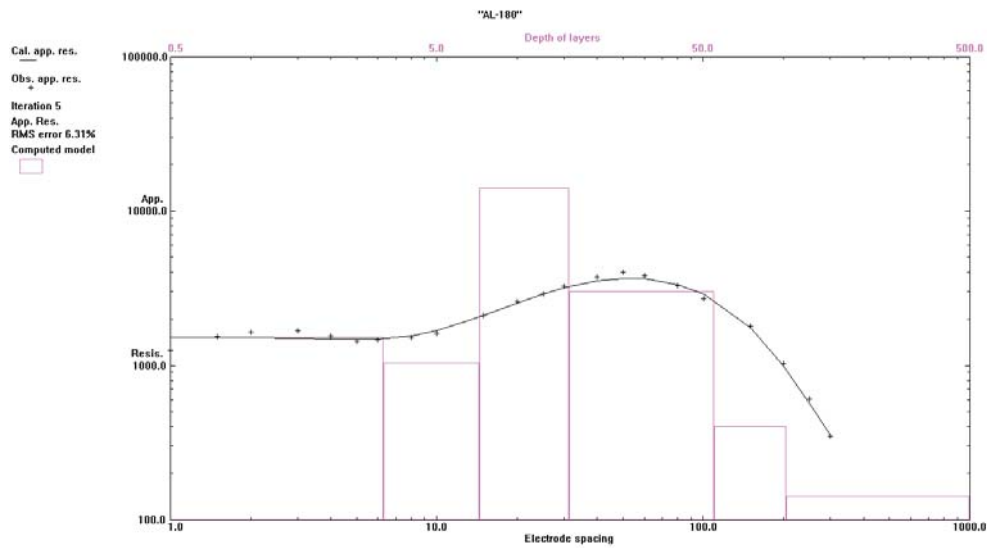


Figura I.8: Inversão da SEV A1180.

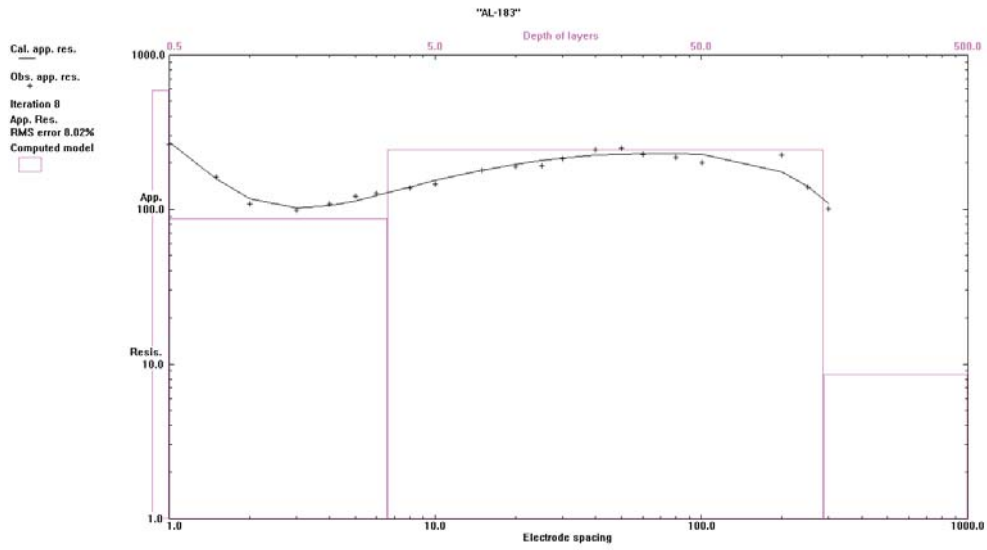


Figura I.9: Inversão da SEV A1183.

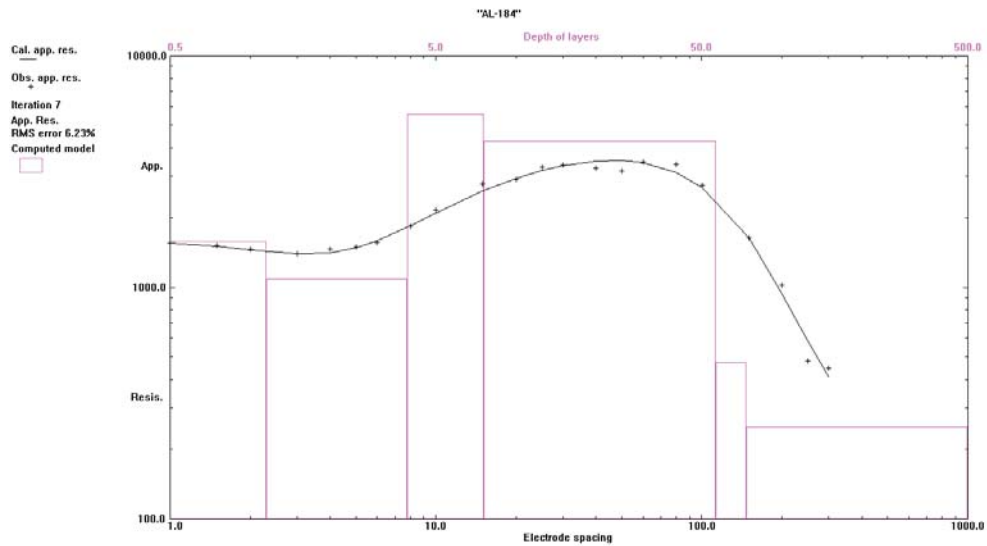


Figura I.10: Inversão da SEV A1184.

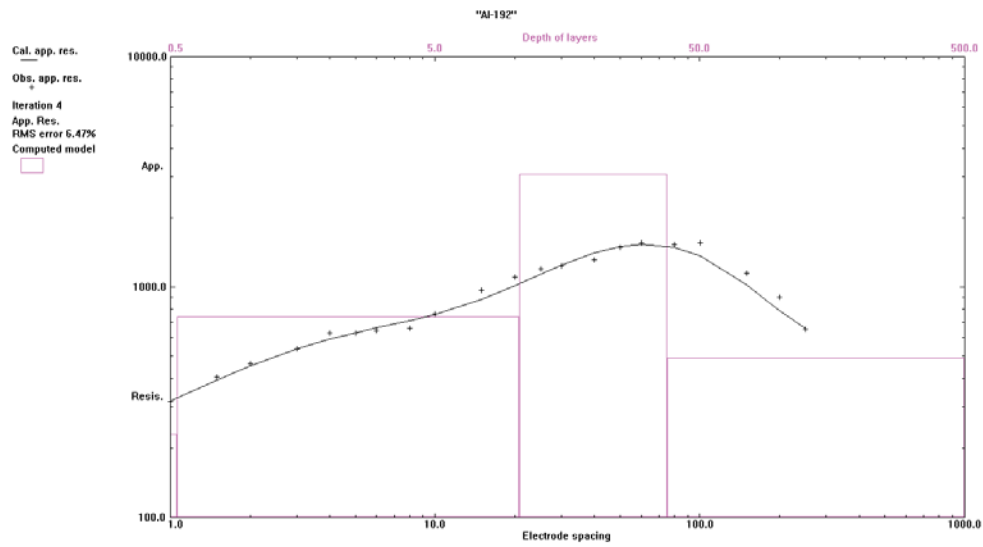


Figura I.11: Inversão da SEV AI192.

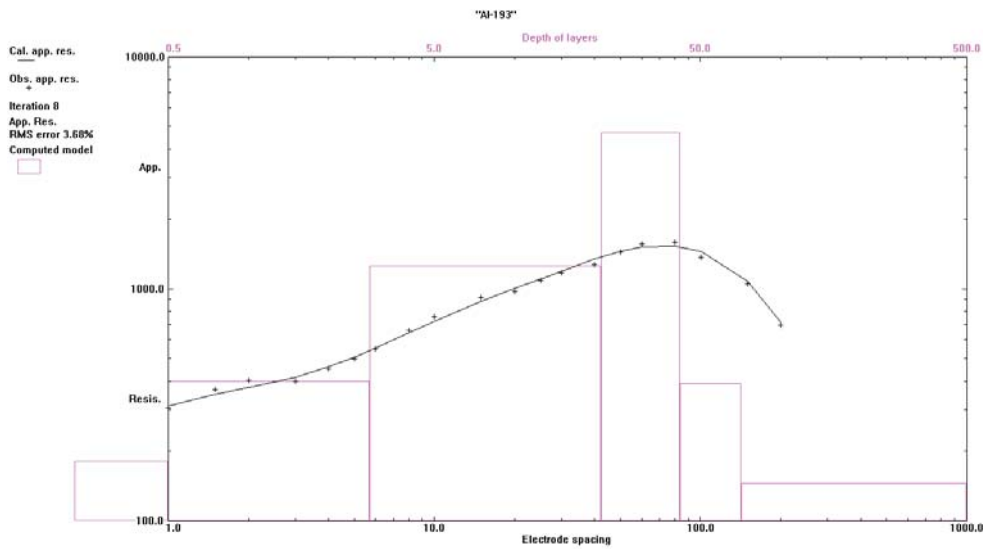


Figura I.12: Inversão da SEV AI193.

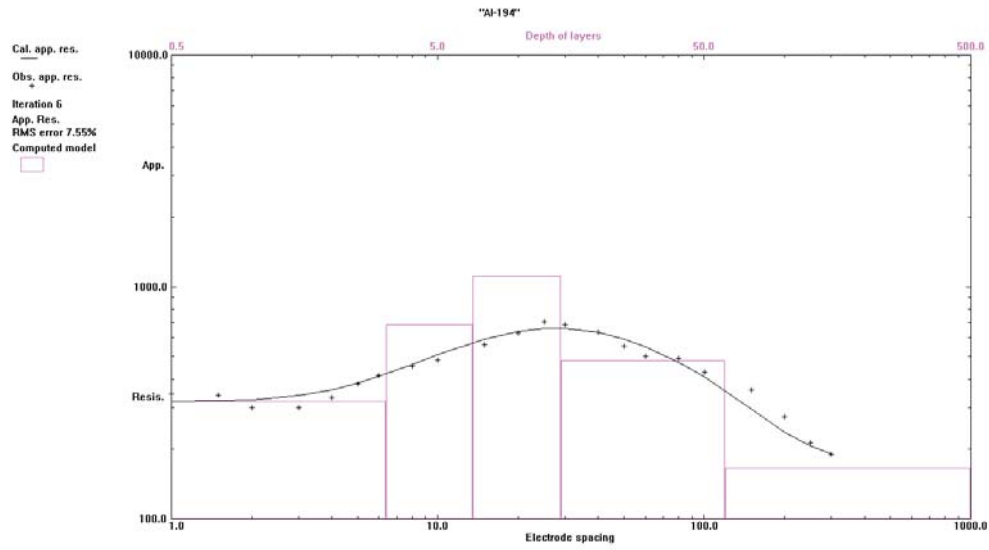


Figura I.13: Inversão da SEV A1194.

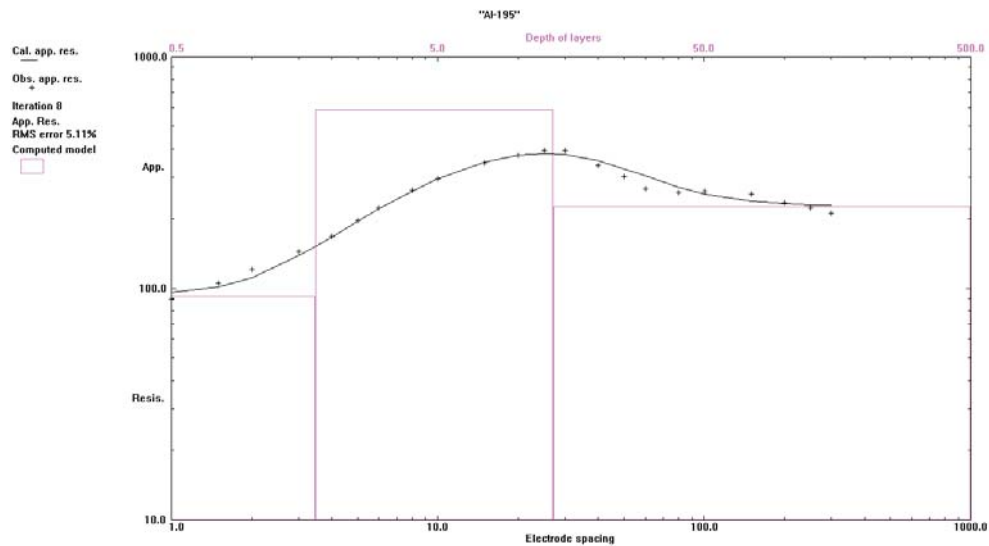


Figura I.14: Inversão da SEV A1195.

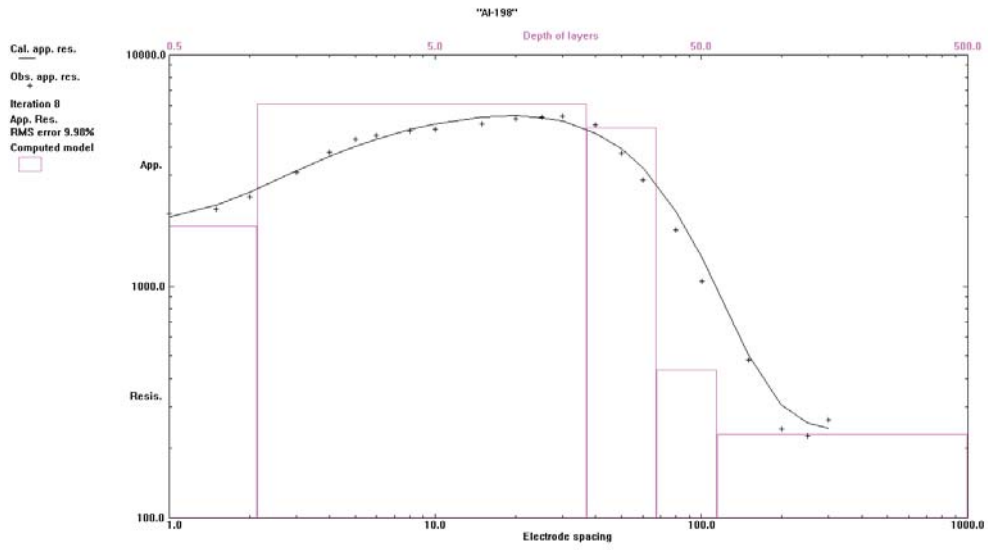


Figura I.15: Inversão da SEV A1198.

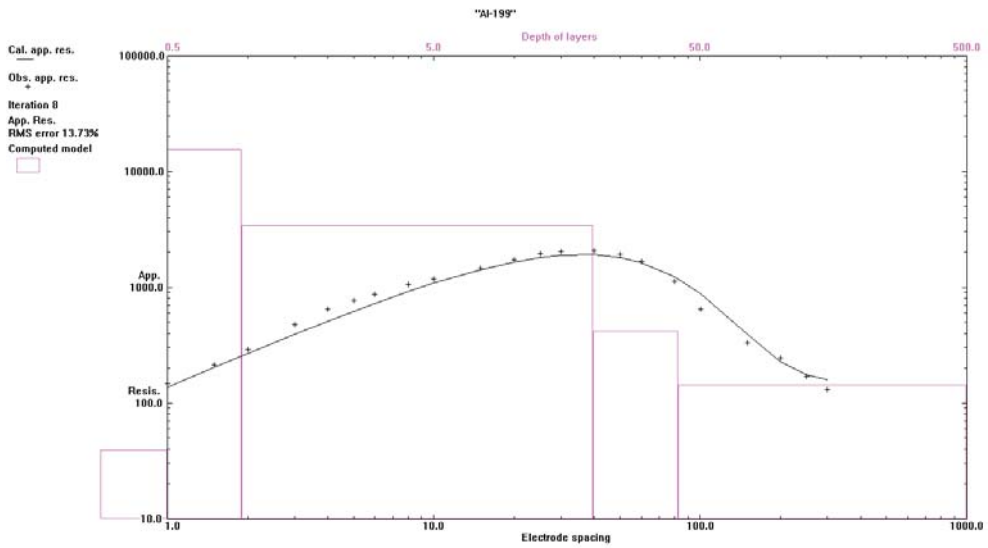


Figura I.16: Inversão da SEV A1199.

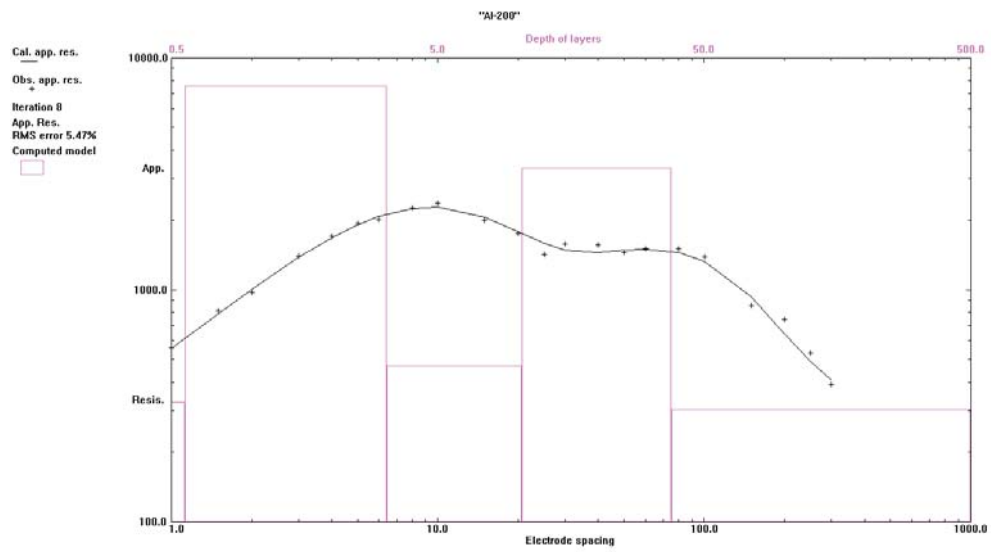


Figura I.17: Inversão da SEV AI200.

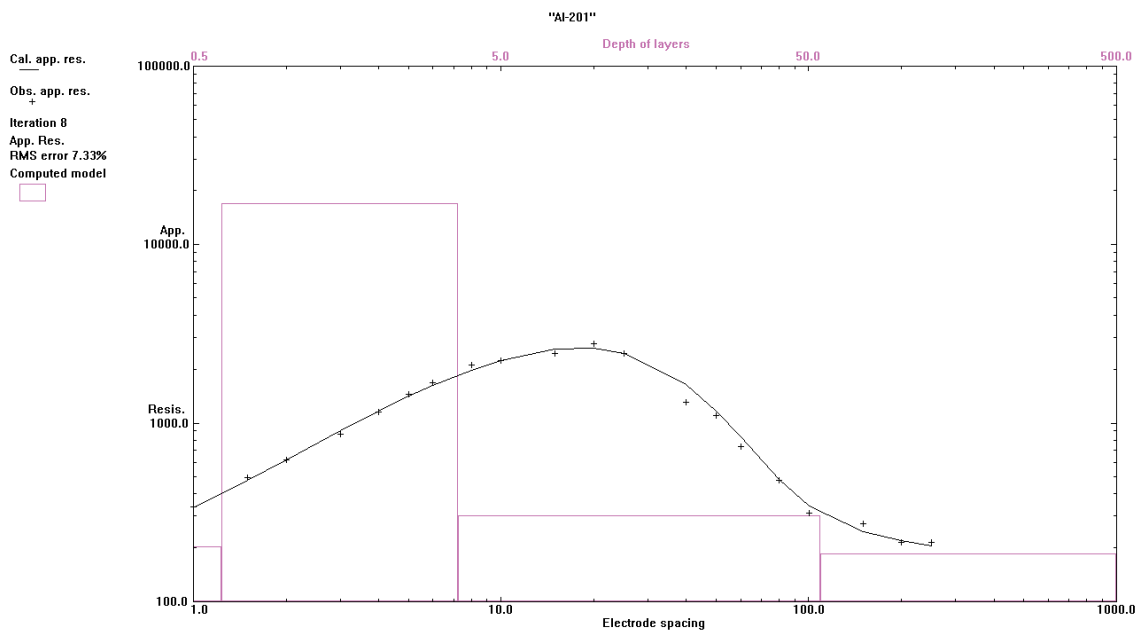


Figura I.18: Inversão da SEV AI201.

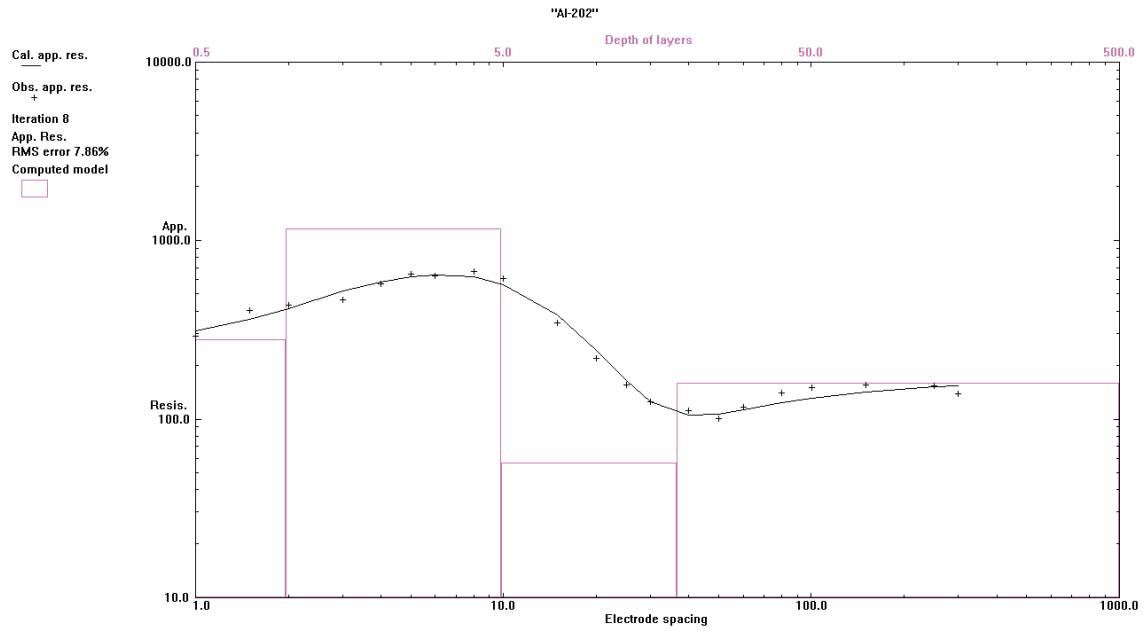


Figura I.19: Inversão da SEV AI202.