

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOFÍSICA APLICADA À PROSPECÇÃO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFEROS SEDIMENTARES**

Willy Takasawa Fernandes

Orientador: Prof.Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: Dr. Fernando Augusto Saraiva

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-2016 / 49)

SÃO PAULO

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOFÍSICA APLICADA À PROSPECÇÃO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFEROS SEDIMENTARES**

Aluno:

Willy Takasawa Fernandes

Willy Takasawa Fernandes

Orientador:

Jr. J. Faraco

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-Orientador:

Dr. Fernando Augusto Saraiva

SÃO PAULO

2016

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a minha mãe, Márcia Takasawa, e a minha irmã, Wendy Takasawa Fernandes, as quais sempre estiveram ao meu lado e que se tornaram um alicerce imprescindível para todas as conquistas da minha vida. Além delas, devo agradecimentos ao meu pai, Edson de Oliveira Fernandes que, apesar da distância, se mostrou presente nos caminhos que eu trilharia.

Não menos importante, agradeço a Bárbara Pinto Vilar por ter me apoiado durante esse ano, tornando-se uma pessoa essencial a qual pretendo levar para sempre em minha vida.

Ao longo da graduação criei grandes amizades que foram importantes para minha formação, em especial gostaria de agradecer a todos os integrantes da República do Chosen e do grupo Diretoria, que fizeram parte do meu dia a dia e que espero mantê-los presentes na minha vida.

Devo ainda agradecer aos colaboradores do IGc/USP, Paulinho e Samuca, que não mediram esforços para me auxiliar na realização das etapas de campo. Além disso, agradeço a todos os docentes e funcionários que fazem parte do Instituto de Geociências – IGc/USP.

Por fim, agradeço ao meu orientador, José Domingos Faraco Gallas, e ao meu co-orientador, Fernando Augusto Saraiva, que se mostraram sempre dispostos a me auxiliar, transmitindo o conhecimento necessário para a realização de forma adequada do presente trabalho de formatura.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. RESUMO..... | 2 |
| 2. ABSTRACT..... | 2 |
| 3. INTRODUÇÃO..... | 3 |
| 4. LOCALIZAÇÃO..... | 3 |
| 5. OBJETIVOS..... | 5 |
| 6. JUSTIFICATIVA..... | 5 |
| 7. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 7.1– Geologia Regional..... | 5 |
| 7.1.1 - <i>Geologia Local</i> | 7 |
| 7.2 – Materiais e Métodos..... | 7 |
| 7.2.1 – <i>Eletreorresistividade</i> | 7 |
| 7.2.1.1 – Caminhamento Elétrico (CE)..... | 10 |
| 7.2.1.2 – Sondagem Elétrica Vertical (SEV)..... | 11 |
| 7.3 – Materiais..... | 12 |
| 8. RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES..... | 13 |
| 8.1 – Processamento dos Dados..... | 13 |
| 8.2 – Apresentação dos Resultados Atingidos..... | 14 |
| 8.3 – Interpretações..... | 25 |
| 9. CONCLUSÕES..... | 27 |
| 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 28 |

1. RESUMO

Levantamentos geofísicos de eletrorresistividade, empregando as técnicas de Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical, foram realizados como ferramenta de prospecção indireta para a detecção de aquíferos sedimentares e como meio de otimização na locação de poços tubulares para a exploração de águas subterrâneas.

No presente trabalho, 3 linhas de Caminhamento Elétrico e 4 Sondagens Elétricas Verticais foram executadas e permitiram a identificação da espessura da porção sedimentar e a profundidade do nível d'água na região. Além disso, os contrastes entre os valores de resistividade aparente caracterizaram os diferentes pacotes sedimentares presentes na área.

Desse modo, os resultados obtidos possibilitaram a indicação de 6 locais considerados propícios para a instalação de poços tubulares, garantindo assim, maior probabilidade de êxito na exploração de águas subterrâneas.

2. ABSTRACT

Geophysical resistivity surveys through Electrical Profiling and Vertical Electrical Sounding techniques were carried out as an indirect prospecting method to detect sedimentary aquifers. Furthermore these techniques were used as a way to optimize the location of wells aiming the groundwater exploitation.

3 Electrical Profiling and 4 Vertical Electrical Sounding were realized in the present work. These investigation techniques allowed the identification of total sediment thickness and water table depth. Moreover the resistivity contrasts characterize different sedimentary facies that occur in the studied area.

Thereby the results enabled the indication of 6 favorable wells sites which improves the probability of success in groundwater exploitation.

3. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a crise hídrica ocorrente no país, especificamente no estado de São Paulo, onde recentemente os reservatórios de água chegaram a níveis muito baixos, utilizando-se inclusive do volume morto de alguns deles para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSp). A companhia de saneamento básico e esgoto de São Paulo (Sabesp), juntamente com o Centro de Pesquisa em Águas Subterrâneas (Cepas), realizam diversos estudos em aquíferos da região metropolitana tendo como foco a prospecção de água subterrânea a fim de minimizar os efeitos causados pela crise hídrica.

Com o intuito de indicar os locais favoráveis à locação de poços tubulares, foram realizados levantamentos geofísicos para investigação em subsuperfície.

O presente trabalho baseou-se na aplicação do método geofísico de eletrorresistividade, visando identificar heterogeneidades resistivas nas quais, a partir de uma interpretação geológica/geofísica, pode-se identificar zonas favoráveis à presença de aquíferos em subsuperfície.

4. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo localiza-se no município de Mogi das Cruzes, região metropolitana da cidade de São Paulo. O município de Mogi das Cruzes situa-se na região Leste da Grande São Paulo, a aproximadamente 60 km da Capital do Estado, vide Figura 1.

Tendo como referência de partida o Instituto de Geociências USP (IGc – USP), o acesso se dá pelas rodovias Ayrton Senna (SP-070) e Mogi-Dutra (SP-088). A região de estudo localiza-se no bairro de Vila Cardoso e assim, a distância até a área é de aproximadamente 80 Km no sentido leste de São Paulo.

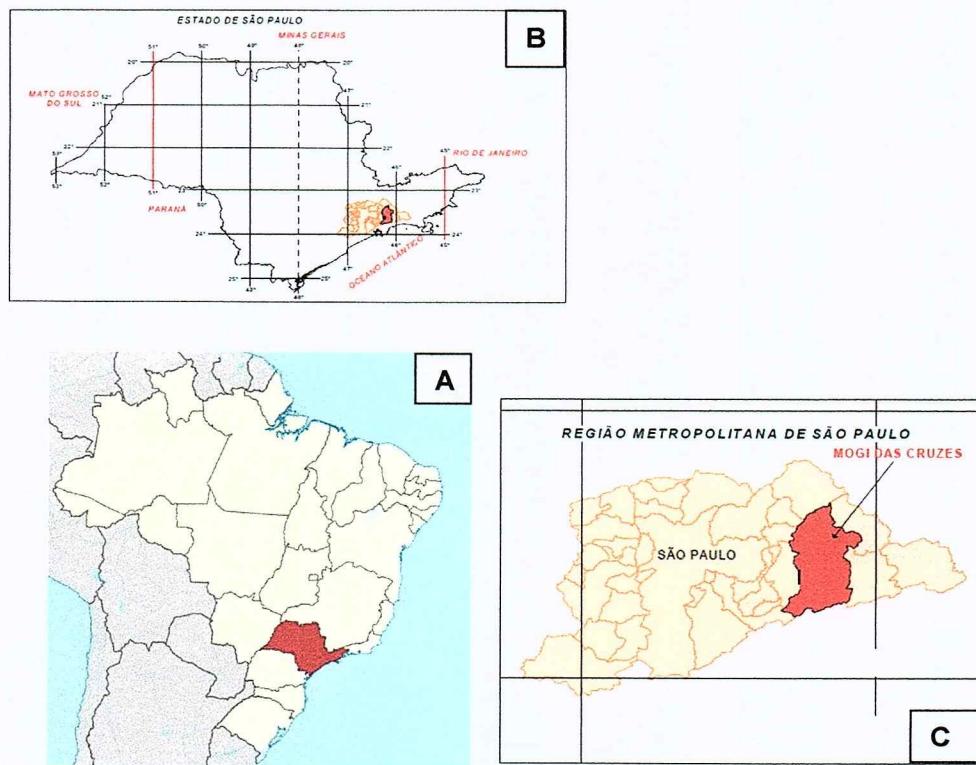


Figura 1 – Localização da Área. A: Localização do Estado de São Paulo, B: RMSP, C: Município de Mogi das Cruzes, D: Delimitação da área estudada pelo Google Earth.

5. OBJETIVOS

O presente trabalho de formatura tem como principais objetivos identificar os locais favoráveis para locação de poços tubulares para a prospecção de águas subterrâneas e proporcionar ao aluno experiências práticas profissionalizantes em geofísica aplicada e recursos hídricos em subsuperfície.

6. JUSTIFICATIVA

A crise hídrica que afetou a grande São Paulo, principalmente no ano de 2015, fez com que a companhia de gerenciamento de água (Sabesp) estudasse a locação de poços tubulares para exploração de água de aquíferos subterrâneos presentes na região metropolitana de São Paulo sendo, portanto, uma fonte alternativa para os grandes reservatórios no abastecimento de água das zonas mais afetadas pela crise.

A partir de dados do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS) e segundo Hirata (1997), embora a RMSP possua 12 mil poços tubulares particulares, o abastecimento público é composto 99% por águas superficiais (grandes reservatórios).

Desse modo, o presente trabalho agregará conhecimento e poderá resultar em uma alternativa viável para o abastecimento público de água da região.

7. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

7.1 Geologia Regional

O contexto geológico no qual se encontra o Município de Mogi das Cruzes é definido por rochas do embasamento de idade Pré Cambriana, sedimentos Terciários que compõe a Bacia de São Paulo, cobertura sedimentar Quaternária e rochas intrusivas.

De forma regional, a área de estudo faz parte da denominada Faixa Ribeira correspondente à porção central da Província da Mantiqueira.

Alves (2009) propõe que os domínios geológicos correspondentes a porção Ocidental da Faixa Ribeira são atribuídos ao Domínio Embu que tem seus limites, ao norte o Domínio São Roque e a sul a Falha de Cubatão.

De acordo com Alves (2009), a caracterização litológica do Domínio Embu é dada por rochas supracrustais metamorfisadas em diferentes graus. Ainda segundo a autora, em trabalhos realizados por Hasui e Sadowski, 1976, foram distintas duas associações litológicas pertencentes ao Domínio Embu, o Complexo Pilar do Sul composto por rochas metassedimentares de baixo grau e o Complexo Embu, caracterizado por xistos e gnaisses migmatíticos.

No município de Mogi das Cruzes, existe a ocorrência de plútôns graníticos de diferentes composições, sendo classificados por Alves (2009) como Bloco Mogi das Cruzes (BMC). Os corpos graníticos pertencentes ao BMC encontram-se dispostos em forma de cunha, delimitados pelas falhas de Taxaquara-Guararema ao norte e falha de Cubatão a Sul. Como indicado no mapa geológico apresentado (Fig. 2)

Ainda segundo Alves (2009), o BMC tem orientação preferencial ENE. Apesar da heterogeneidade na composição dos corpos graníticos, os Muscovita-biotita leucogranitos são abundantes e constituem boa parte do BMC. A autora propõe que os fácies mais diferenciados, formam corpos aplíticos-pegmatíticos intrusivos nos xistos, ou nos Muscovita-biotita leucogranitos da região.

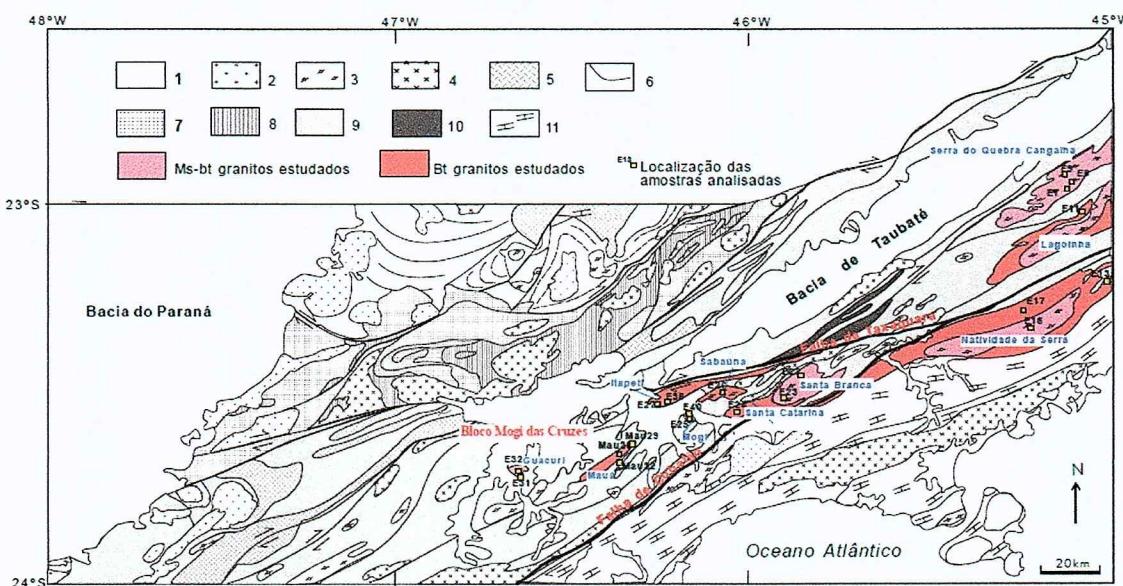


Figura 2 – Mapa geológico da porção central do Cinturão Ribeira no Estado de São Paulo (Extraído de Alves, 2009). 1: Cobertura Sedimentar e intrusivas Fanerozóicas, 2: Granitos tardíos e pós orogênicos, 3 a 5: Granitos sin-orogênicos, 4: biotita granitos porfiríticos, 5: Hornblenda-biotita granitos, 6: Nappe Socorro Guaxupé, 7: Grupo São Roque, 8: Grupo Serra de Itaberaba, 9 e 10: Domínio Embu, 11: Complexo Costeiro.

Os graus de deformação encontrados no BMC são variados, em alguns casos apresentam foliação de fluxo magmático, com texturas de enclaves que evidenciam o ambiente subvulcânico. Já em outras regiões, o BMC apresenta andamento gnáissico evidenciando a deformação no estado sólido (Alves, 2009).

A cobertura sedimentar da Bacia de São Paulo, é definida pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo (Grupo Taubaté), além disso, coberturas aluvionares e coluvionares Quaternárias ocupam as planícies dos principais rios da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

7.1.1 Geologia Local

A área estudada localiza-se na planície aluvial do rio Tietê. O contexto geológico no qual se insere a região de estudo pode ser caracterizado como unidade litoestratigráfica constituinte das várzeas e planícies fluviais que correspondem à cobertura Quaternária da região. Em parte retrabalhada e depositada sob a dinâmica atual do rio, tal unidade é caracterizada pela presença abundante de porções argilosas, alternadas por porções com presença expressiva de areia de granulação fina a média.

Alguns autores destacam a presença subordinada de níveis de conglomerados basais, sobrepostos por areias grossas a conglomeráticas com estratificações cruzadas. Entretanto, tais características não foram observadas na área de estudo.

7.2 Materiais e Métodos

Sendo o projeto voltado para a prospecção de água em subsuperfície, o método geofísico que foi utilizado em campo para obtenção de dados foi o da eletrorresistividade. Esse método geofísico e suas diferentes técnicas de investigação estão apresentados e descritos abaixo no item 7.2.1.

7.2.1 Eletrorresistividade

Segundo Kearey *et al.* (2009), o método da eletrorresistividade consiste, basicamente, na introdução de corrente elétrica artificial no solo e na medição das diferenças de potencial (ΔV) resultantes. As diferenças de potencial medidas em superfície fornecem características ligadas às propriedades elétricas das heterogeneidades da subsuperfície.

Gallas (2003) e Braga (2007) propõem que as medidas de eletrorresistividade devem ser realizadas utilizando quatro eletrodos inseridos na superfície. Dois para emissão de corrente elétrica (AB) que deverão estar em contato galvânico com o solo e o outro par (MN), também em contato galvânico, para a medição da diferença de potencial resultante da transmissão da corrente em subsuperfície. Tais eletrodos podem ser dispostos em diversos arranjos eletródicos, de acordo com a necessidade do projeto de investigação.

A resistividade elétrica pode indicar diferentes características de solos e rochas como alteração, descontinuidades horizontais e verticais como falhas e fraturamentos, saturação, dentre outros. Portanto, o parâmetro da resistividade elétrica pode caracterizar os diferentes materiais presentes nos ambientes geológicos e suas respectivas heterogeneidades.

O parâmetro físico em que se baseia o método da eletrorresistividade é o de resistividade, que pode ser definido como descrito a seguir.

A partir da lei de Ohm, tem-se que a resistividade de um material é definida pela equação:

$$\rho = R \frac{S}{L} \text{ (ohm.m)}$$

Equação 1.

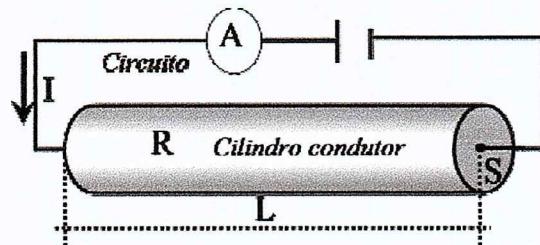


Figura 3 – Relação resistividade X resistência (Extraído de Braga, 2007).

Onde, R é a resistência, S a área da seção transversal e L o comprimento de um condutor cilíndrico.

Segundo Kearey (2009), considerando medições realizadas em superfície, a corrente elétrica se propagará radialmente a partir do eletrodo, de modo que a distribuição de corrente será uniforme sobre as superfícies das semiesferas (fig 4).

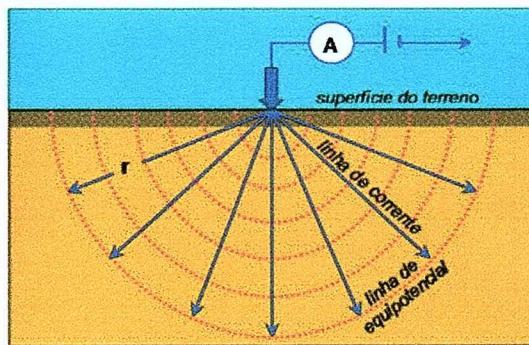


Figura 4 – Potencial no semiespaço (Extraído de Braga, 2007)

Assim, utilizando-se do conceito de semiespaço, temos:

$$\rho = R \frac{r}{2\pi r^2} \rightarrow R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Equação 2.

Substituindo na lei de Ohm, onde $V = R \cdot I$, tem-se que:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Equação 3.

Portanto, considerando superfícies equipotenciais, pode-se determinar sua resistividade a partir de:

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I}$$

Equação 4.

Onde r é a distância entre o eletrodo de corrente ao ponto no qual o potencial é medido.

Considerando um meio homogêneo e isotrópico e utilizando o arranjo tetraeletródico usual de campo (fig. 5), com eletrodos AB e MN, temos que o potencial nos eletrodos M e N será dado por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

Equação 5.

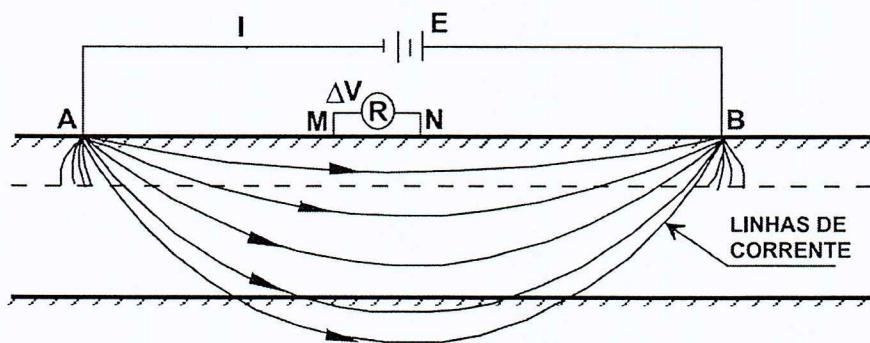


Figura 5 – Arranjo tetraeletródico usual (Extraído de Gallas, 2003).

Portanto, a diferença de potencial medida para determinada posição dos eletrodos MN, será: $\Delta V = V_M - V_N$, então:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Equação 6.

Deste modo, pode-se calcular o valor da resistividade ρ , por:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

Equação 7.

Onde, segundo Gallas (2003), K é denominado fator geométrico e expresso pela equação:

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

Equação 8.

É sabido que as medidas de diferença de potencial ΔV medidas em meios homogêneos, como tomado acima (eq. 6), serão diferentes das medidas em meios heterogêneos onde, de fato, as heterogeneidades modificarão o campo elétrico. Como a subsuperfície nos seus diferentes ambientes geológicos não pode ser considerada um meio homogêneo, as resistividades medidas representam uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras e, desse modo, são denominadas de resistividades aparentes (pa) segundo Gallas (2003) e Braga (2007).

De acordo com Braga (2007) e Gallas (2003), existem três principais técnicas de investigação utilizadas no método de eletrorresistividade são elas: Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Caminhamento Elétrico (CE) e Perfilagem Elétrica (PERF). Para o presente trabalho, serão realizadas as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico.

7.2.1.1 Caminhamento Elétrico (CE)

A técnica de investigação denominada de caminhamento elétrico objetiva estudar principalmente as variações laterais de resistividade em subsuperfície. Portanto, trata-se de uma técnica de investigação horizontal em uma ou mais camadas, adequada para identificar diferenças resistivas causadas por estruturas verticais / subverticais como contatos geológicos e estruturas deformacionais rúpteis, como falhas e fraturas. Nesse caso, o emprego dessa técnica tem como principal objetivo delimitar o aquífero na região estudada.

Gallas (2003) propõe que as investigações efetuadas no CE devem estar dispostas ao longo de perfis e a interpolação dos dados de resistividade aparente (pa) obtidos, resultam em pseudo-seções com uma ou mais profundidades de investigação.

Existem diversos arranjos possíveis para o desenvolvimento do Caminhamento Elétrico. No presente trabalho, o arranjo Wenner foi o escolhido para a realização do mesmo.

Arranjo Wenner

Segundo Gallas (2000), o arranjo Wenner trata-se de um caso específico de quadripolo simétrico. Define-se o quadripolo simétrico a partir das dimensões $MN = l$ e $AB = 2L$, sendo $a = MN = NB = L - l/2$. Ainda segundo Gallas (2000), o arranjo Wenner é o caso específico, onde o coeficiente $a = 1$ ou $L/l = 3/2$ (fig.6). Kearey *et al.* (2009) propõem que os quatro eletrodos

AB e MN deverão estar alinhados no mesmo perfil de medidas e serão mantidos com abertura a constante, tendo como referencial o ponto O central. Durante a execução do CE, o arranjo é movido ao longo do perfil de investigação com valor fixo de abertura. Para investigar níveis mais profundos, aumenta-se o valor de a , entretanto esse valor de abertura deve-se manter constante durante a realização do CE em cada nível investigado, mantendo sempre a relação $AM=MN=NB=a$ (Braga, 2007).

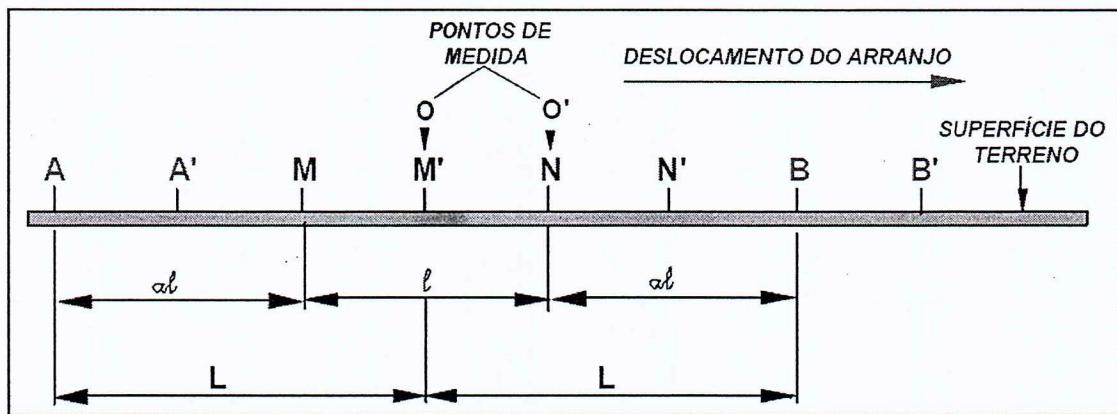


Figura 6 – Arranjo eletródico Wenner (Extraído de Gallas, 2000).

7.2.1.2 Sondagens Elétricas Verticais (SEVs)

A técnica de Sondagem Elétrica Vertical tem como seu principal objetivo a identificação de interfaces resistivas horizontais. Assim, como denominado, SEV define-se por técnica de investigação vertical, identificando heterogeneidades resistivas verticais, como espessura vertical de camadas litológicas, profundidade do topo rochoso e nível d'água.

Segundo Kearey *et al.* (2009) e Braga (2007), a SEV baseia-se em medidas de resistividade a partir da superfície do terreno, onde os eletrodos de corrente AB mantêm-se em um espaçamento crescente e os eletrodos de recepção MN tendem a ser mantidos sob mesma abertura. Durante as medidas o arranjo deve ser progressivamente expandido em um perfil no qual o centro do dipolo de recepção deve se manter fixo (Kearey *et al.*, 2009).

Orellana (1972) propõe que a profundidade de penetração atingida pelas SEVs, é diretamente proporcional ao espaçamento dos eletrodos de corrente AB. Assim, tem-se que à medida que se aumenta a distância entre AB, o campo elétrico atinge camadas mais profundas e, desse modo, eleva a profundidade de investigação.

Os dados obtidos em SEVs são apresentados por curvas bilogarítmicas de resistividade por espaçamento AB/2, que indicam a distribuição da resistividade na subsuperfície, permitindo, a partir disso, a interpretação geológica.

O principal arranjo para o desenvolvimento das SEVs é o Schlumberger, que foi o empregado no presente trabalho para a aquisição de dados.

Arranjo Schlumberger

O princípio utilizado no arranjo Schlumberger baseia-se na fixação dos eletrodos MN a uma distância a , de modo que esse espaçamento tenda a zero em relação à distância crescente $2L$ entre eletrodos de corrente AB (Fig. 7). As medidas realizadas são atribuídas a um ponto central **O**, que se mantém fixo durante as diferentes etapas de investigação (Braga, 2007).

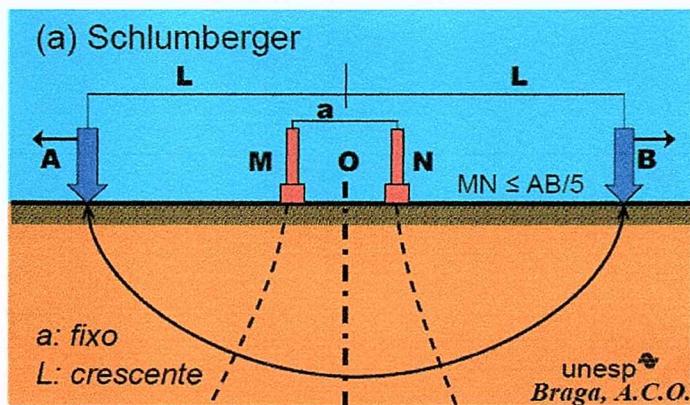


Figura 7 – Arranjo Schlumberger (Extraído de Braga, 2007).

Orellana (1972) propõe que os erros produzidos no arranjo Schlumberger são praticamente insignificantes para fins interpretativos, portanto não necessitam de ajustes. Além disso, a relação $AB/MN \geq 5$ deverá ser mantida a fim de proporcionar maior precisão aos dados de campo.

Por fim, vale salientar que é de extrema importância que se conheça previamente a geologia do local de estudo para que se escolha o melhor método e técnica de investigação para a área. Além disso, interpretações prévias a partir de levantamentos aerofotogramétricos possibilitam o posicionamento adequado das malhas e perfis de caminhamento elétrico. Outro aspecto importante proposto por Gallas (2003) é que as investigações devem ser realizadas de modo que a abertura entre os eletrodos permita que, no máximo no segundo nível de investigação, a camada de solo/saprolito seja ultrapassada.

7.3 Materiais

Caderneta de campo, entre outros, os principais materiais utilizados em campo para a obtenção de dados para as técnicas escolhidas são: resistivímetro, fios, eletrodos, milivoltímetro digital, fonte 12 V e GPS.

8. RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES

8.1 Processamento dos dados

Os resultados obtidos a partir da técnica de caminhamento elétrico (CE) são apresentados em forma de pseudo-seções de resistividade aparente e seções modeladas de resistividade. Para tanto foram utilizadas técnicas de processamento dos dados obtidos em campo.

Em geral, as medidas de resistividade são processadas com o intuito de representar o comportamento das diferentes resistividades medidas em subsuperfície resultando, portanto, pseudo-seções com dados interpolados através de contornos de isovalores. Entretanto, as formas de representação das curvas de isovalores não estão em função apenas dos valores de resistividade medidos, mas também da geometria da configuração dos eletrodos utilizada. Assim, os valores de resistividades calculados são denominados de resistividade aparente, pelo fato de representarem o valor resultante de um volume da subsuperfície investigada.

Com a finalidade de obter uma seção modelada de resistividade, a aplicação de métodos de inversão é uma etapa de extrema importância para o processamento dos dados de CE que, teoricamente resulta em uma aproximação razoável de modelos para diversas feições geológicas. Em síntese, o processo de inversão dos dados de resistividade tem como finalidade estabelecer um modelo da distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície (Gallas, 2003).

A etapa de inversão foi realizada através do Software RES2DINV pelo método de inversão por mínimos quadrados com vínculo de suavidade (*smoothness constrained least-square*) produzindo um modelo 2-D teoricamente isento das distorções originadas pela geometria do arranjo eletródico utilizado.

A modelagem 2-D consiste na divisão da subsuperfície em blocos para os quais são calculadas as resistividades de acordo com as posições relacionadas aos pontos da pseudo-seção. O método utilizado pelo RES2DINV visa reduzir a diferença entre os valores de resistividade medidos em campo e calculados fazendo, portanto, o ajuste entre os blocos. Além disso, as profundidades de investigação, seguindo o *default* do programa, são baseadas nas propostas por Edwards (1977). Entretanto, visando melhores resultados, as mesmas foram alteradas, estimando profundidades situadas entre as de Edwards e Hall (1957) que são aproximadamente duas vezes maiores daquelas estimadas por Edwards (Gallas, 2003). O valor empregado foi de 1,4 vezes o *default* do RES2DINV.

Os resultados das inversões pelo RES2DINV foram exportados na forma de arquivos XYZ para que dessa forma pudessem ser interpolados pelo Software Surfer 8, visando gerar o contorno de isovalores e apresentar os dados de forma mais clara e precisa.

Para as Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) realizadas na área, o processamento dos dados foi realizado através do software IPI2WIN que faz a inversão 1D das SEVs. A utilização desse software visa a modelagem matemática das curvas bilogarítmicas obtidas a partir dos dados de resistividade coletados em campo, com o intuito de evidenciar pontos de inflexão nos quais a resistividade tenda a aumentar ou diminuir, definindo estratos geoelétricos e possibilitando uma interpretação geológica.

8.2 Apresentação dos Resultados Atingidos

A área estudada, como descrito anteriormente, localiza-se no município de Mogi das Cruzes. A figura 8 mostra a localização das linhas de caminhamento elétrico (CE) e das sondagens elétricas verticais (SEVs).



Figura 8 – localização dos ensaios geofísicos.

Foram realizadas quatro linhas de caminhamento elétrico na área estudada, entretanto, os dados da linha P-8 (a leste de P-7) foram insuficientes e não confiáveis devido a falhas na aquisição de campo. Portanto, decidiu-se por não apresentar a linha P-8 no presente trabalho. Deste modo, serão apresentados os dados de três linhas efetivamente levantadas, P-5, P-6 e P-7.

Além disso, para as sondagens elétricas verticais, serão apresentadas quatro curvas bilogarítmicas modeladas matematicamente, evidenciando os pontos de inflexão que possibilitam a interpretação das mesmas.

**LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE - LINHA P5
ARRANJO WENNER - ABERTURAS 75; 150; 225; 300; e 375m**

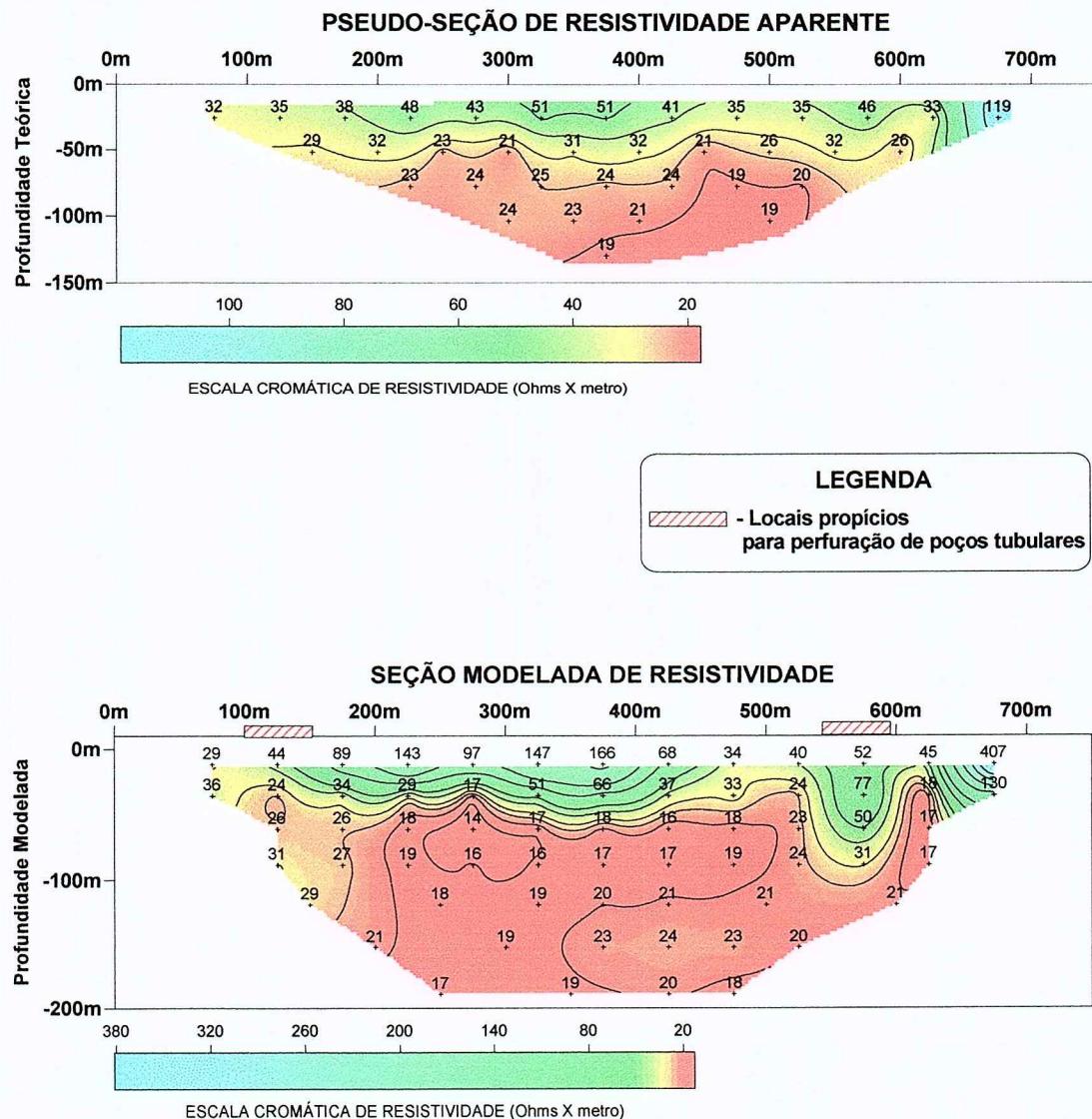


Figura 9 – Resultados do levantamento de eletrorresistividade linha P5.

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE - LINHA P6
ARRANJO WENNER - ABERTURAS 75; 150; 225; 300; e 375m

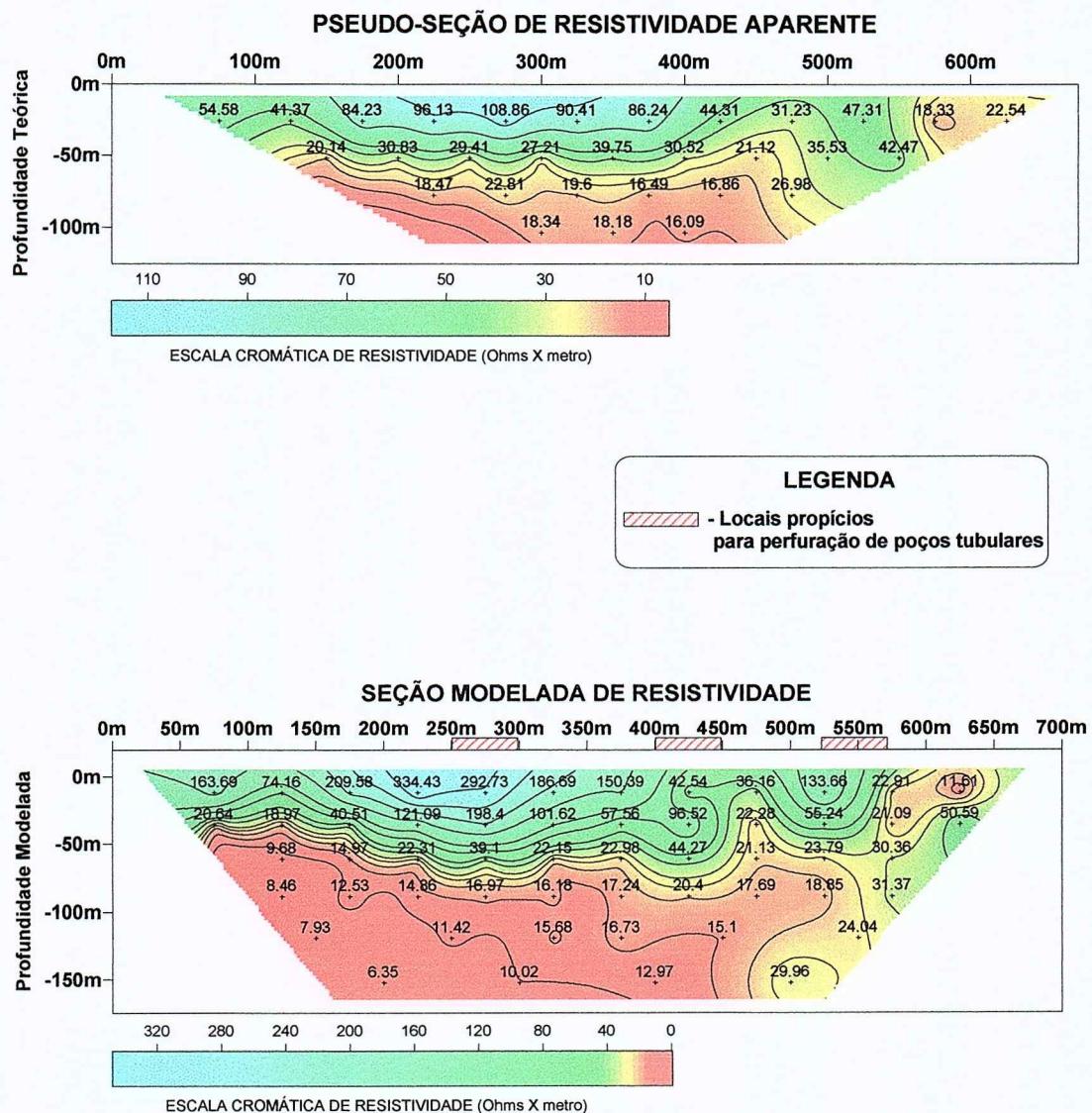


Figura 10 – Resultados do levantamento de eletrorresistividade linha P6.

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE - LINHA P7
ARRANJO WENNER - ABERTURAS 75; 150; 225; 300; e 375m

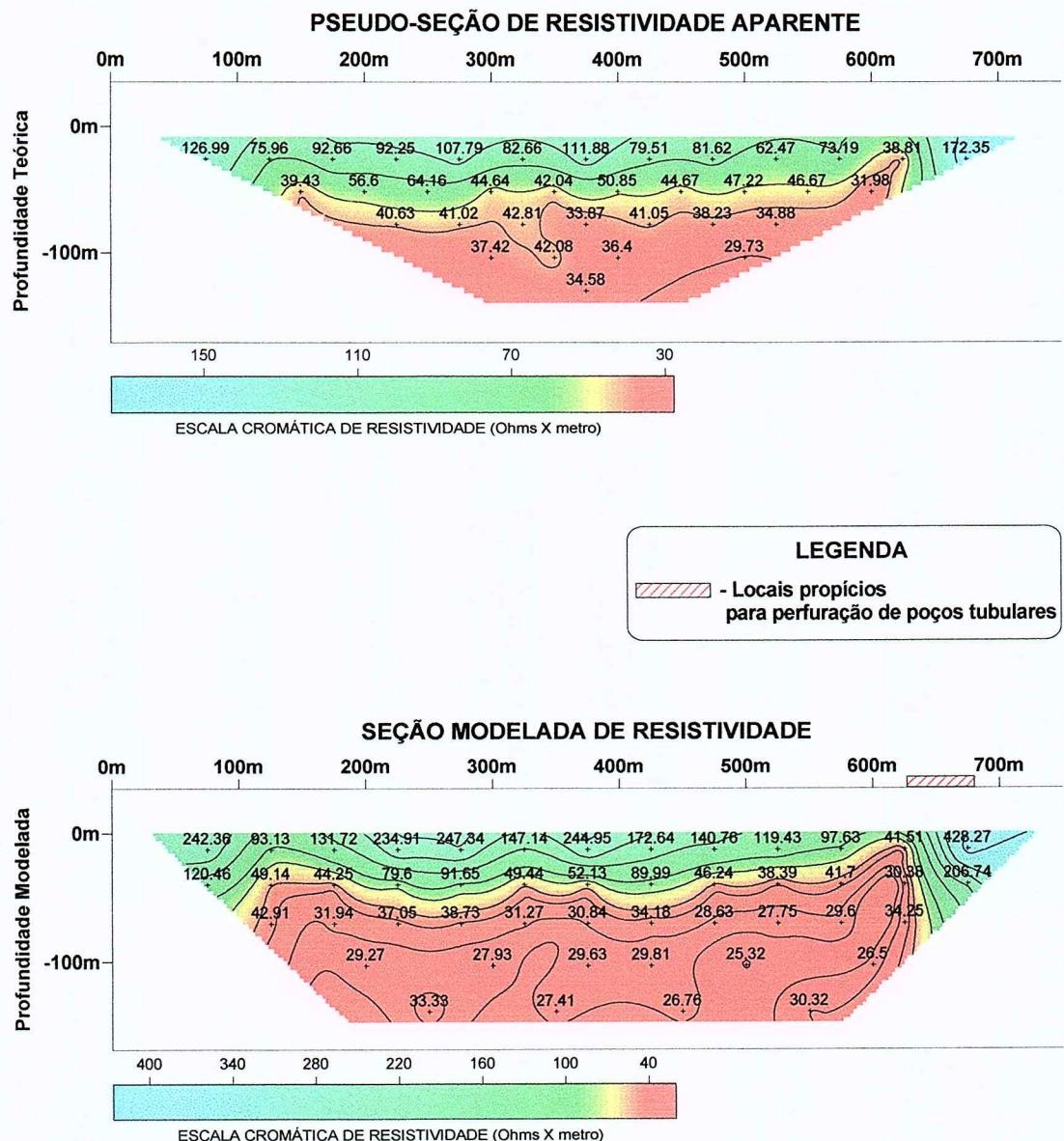


Figura 11 – Resultados do levantamento de eletrorresistividade linha P7.

SEV - 1

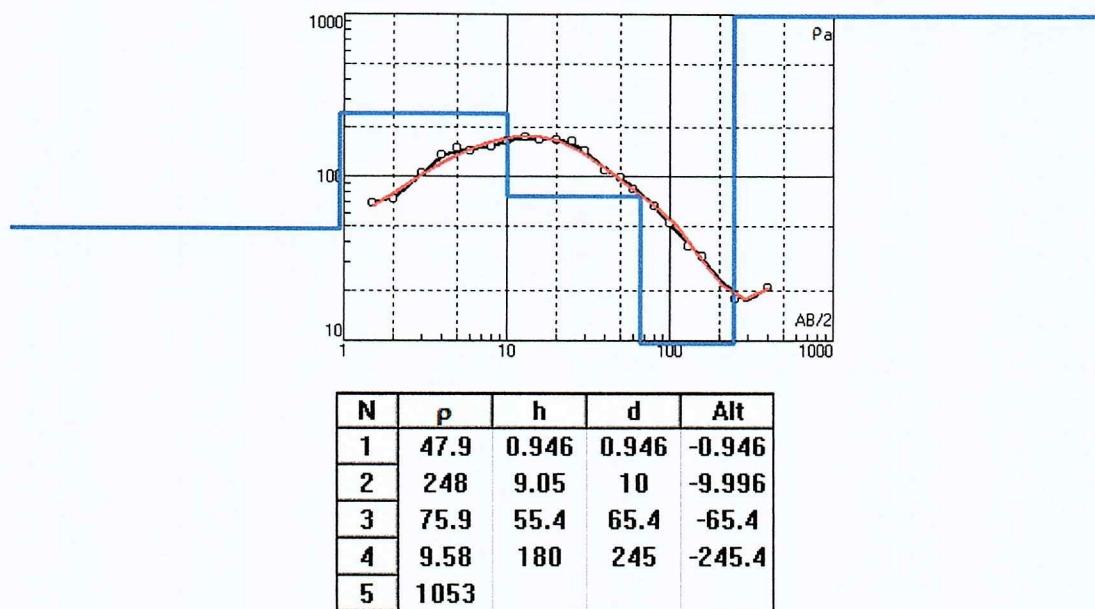


Figura 12 – Resultados SEV-1.

SEV - 2

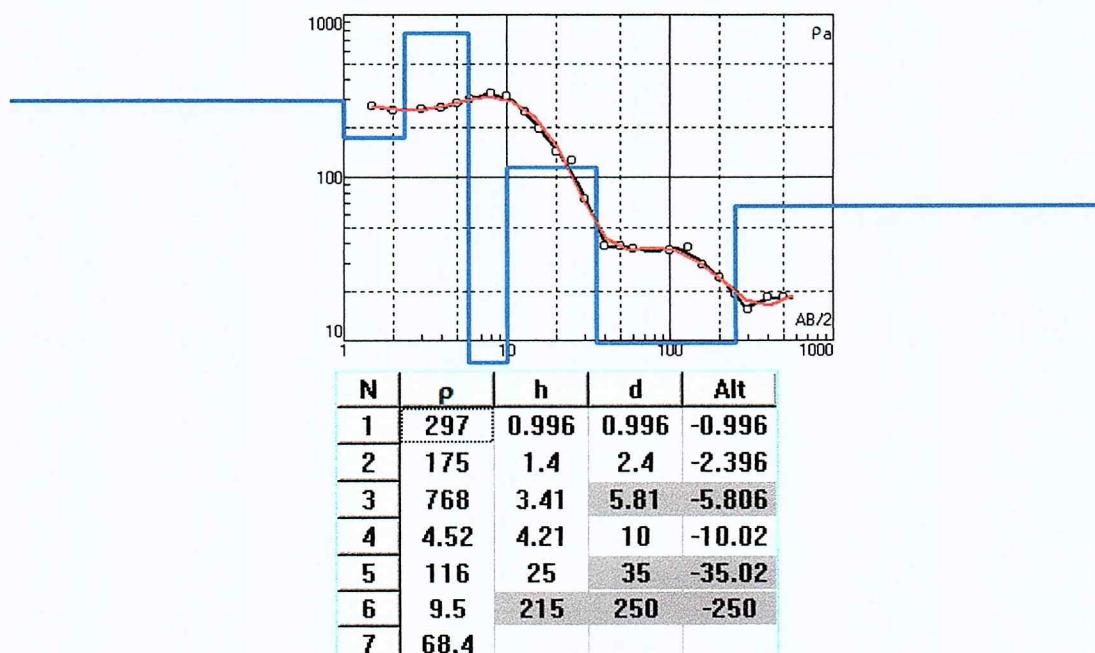


Figura 13 – Resultados SEV-2.

SEV - 3

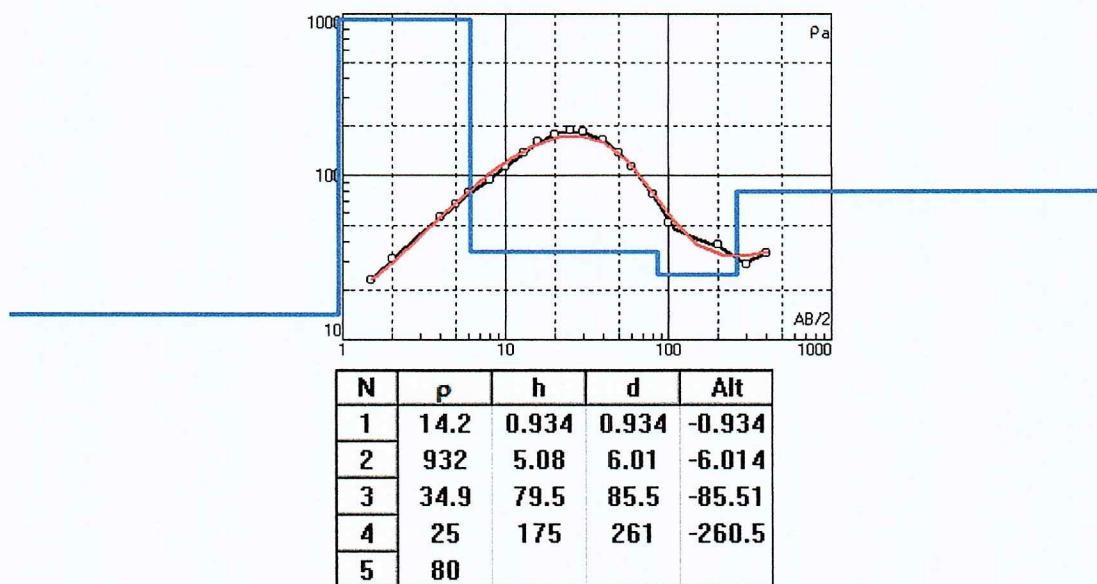


Figura 14 – Resultados SEV-3.

SEV - 4

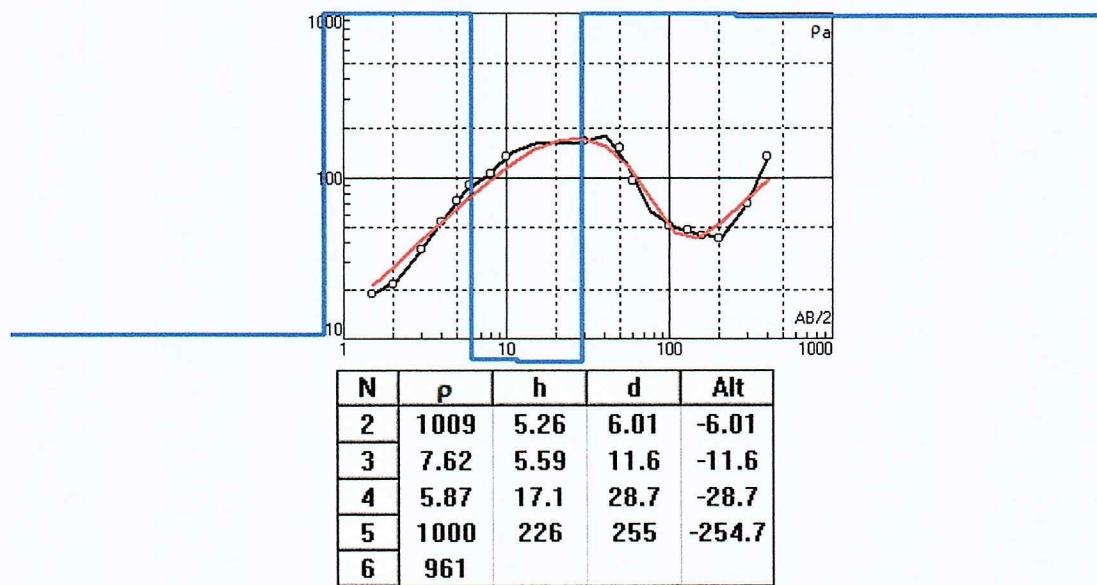
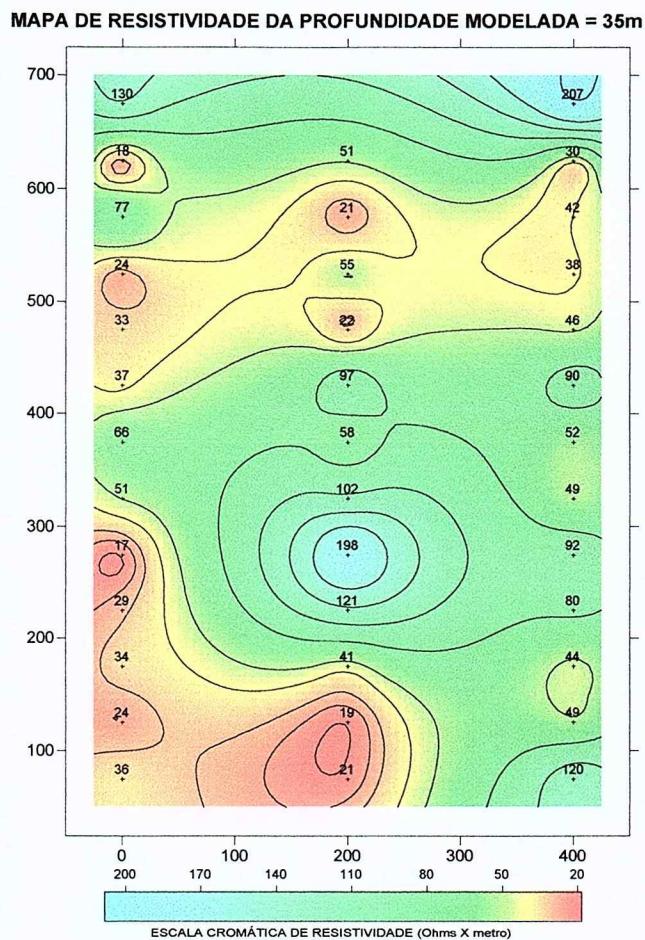


Figura 15 – Resultados SEV-4.

De modo a complementar a apresentação dos resultados obtidos pelo processamento dos dados coletados em campo, foram gerados mapas e simulações tridimensionais das distribuições de resistividades aparentes para quatro profundidades de interesse, 35, 60, 89 e 120 metros.

Nas figuras 16, 17, 18 e 19, mapas de resistividade das profundidades indicadas acima, mostram em planta a distribuição das resistividades na área estudada.

Além disso, as figuras trazem as simulações tridimensionais das resistividades e mostram uma visualização simulada em 3D dos mapas de resistividade para suas respectivas profundidades.



BLOCO DE RESISTIVDADE APARENTE DA PROFUNDIDADE MODELADA 35 m

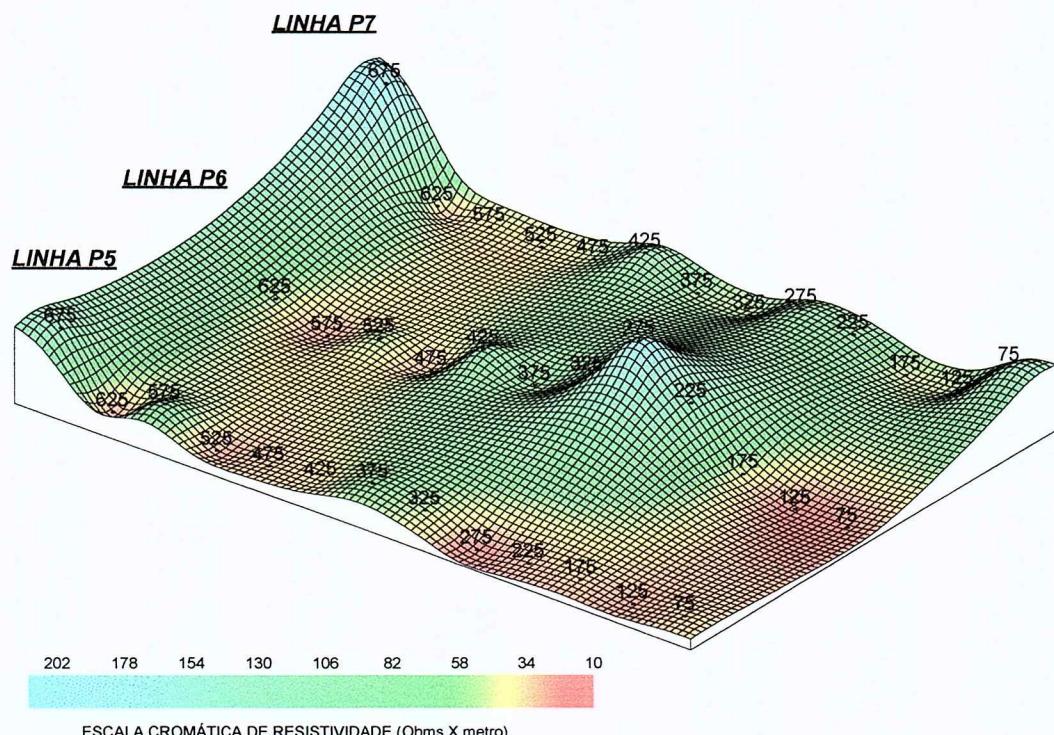
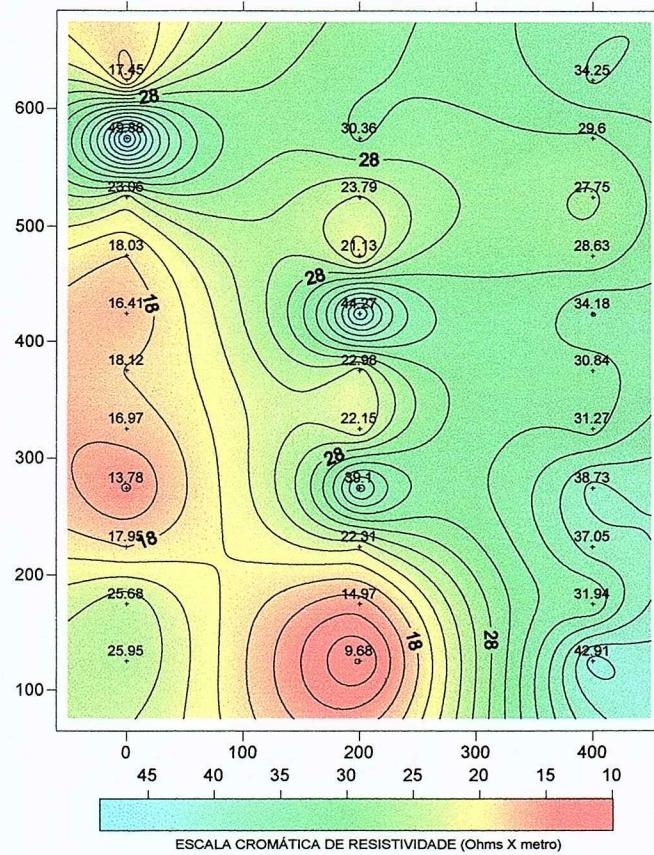


Figura 16 – Mapa e Simulação Tridimensional da profundidade 35 metros.

MAPA DE RESISTIVIDADE DA PROFUNDIDADE MODELADA = 60m



BLOCO DE RESISTIVDADE APARENTE DA PROFUNDIDADE MODELADA 60 m

LINHA P7

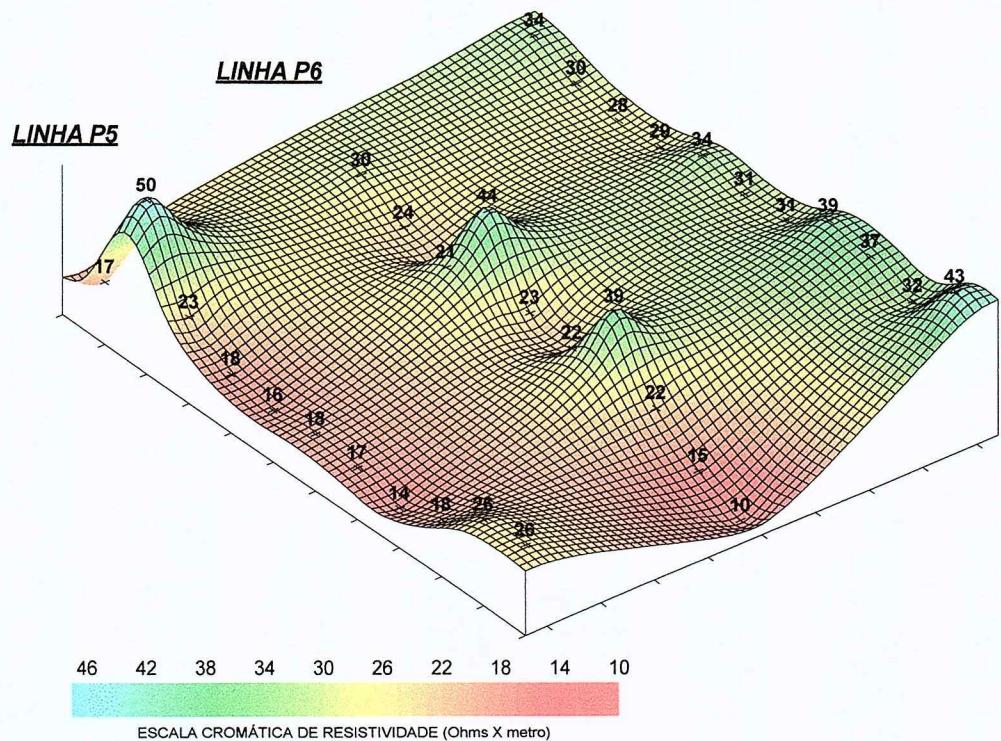
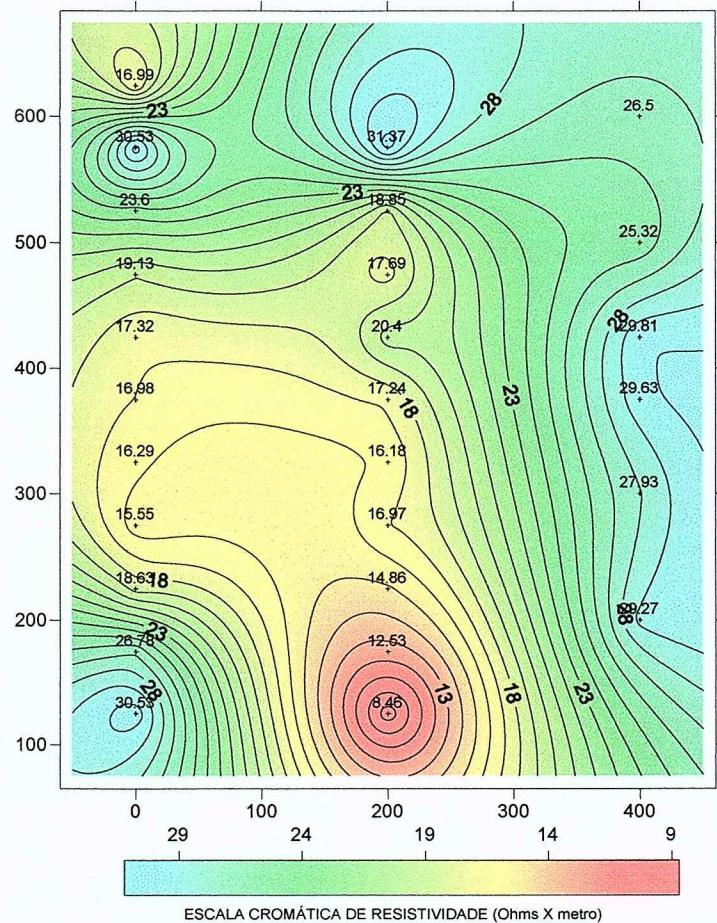


Figura 17 – Mapa e Simulação Tridimensional da profundidade 60 metros.

MAPA DE RESISTIVIDADE DA PROFUNDIDADE MODELADA = 89m



BLOCO DE RESISTIVDADE APARENTE DA PROFUNDIDADE MODELADA 89 m

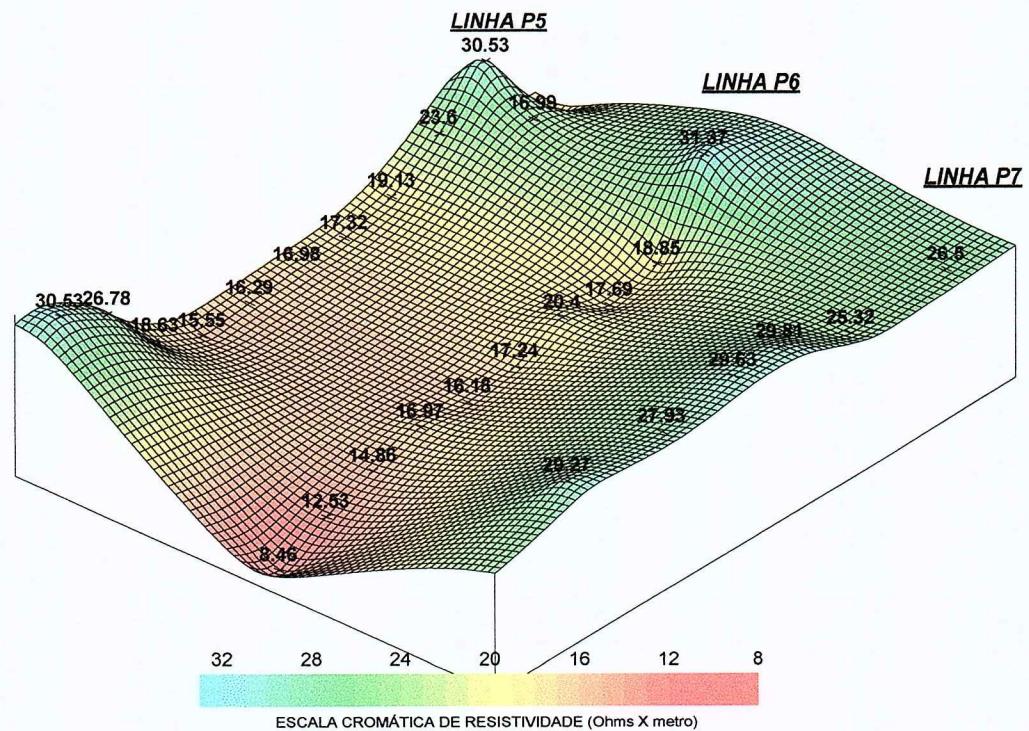
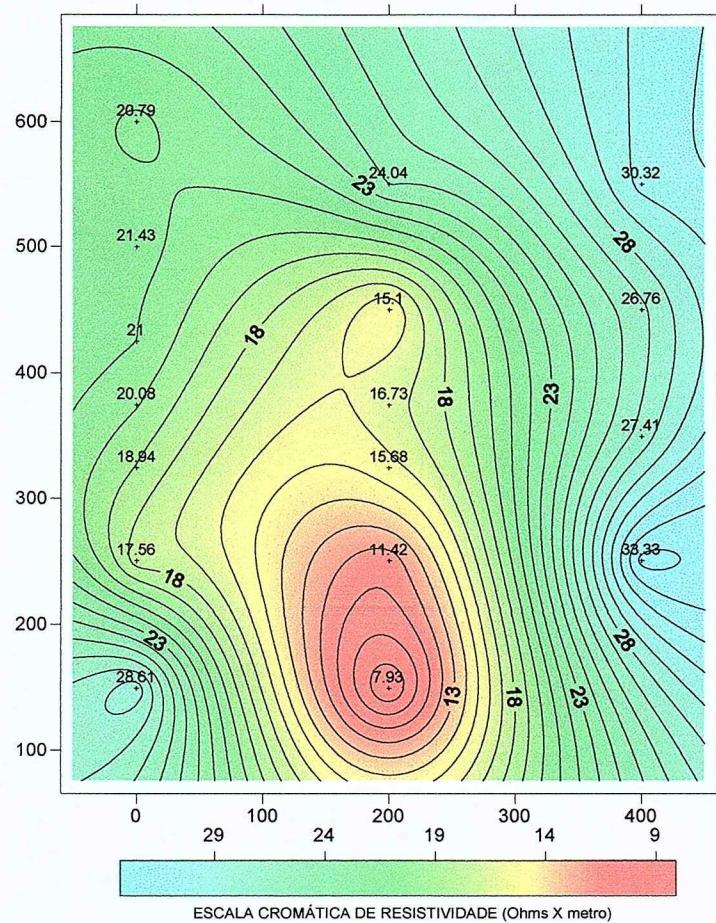


Figura 18 – Mapa e Simulação Tridimensional da profundidade 89 metros.

MAPA DE RESISTIVIDADE DA PROFUNDIDADE MODELADA = 120m



BLOCO DE RESISTIVIDADE APARENTE DA PROFUNDIDADE MODELADA 120 m

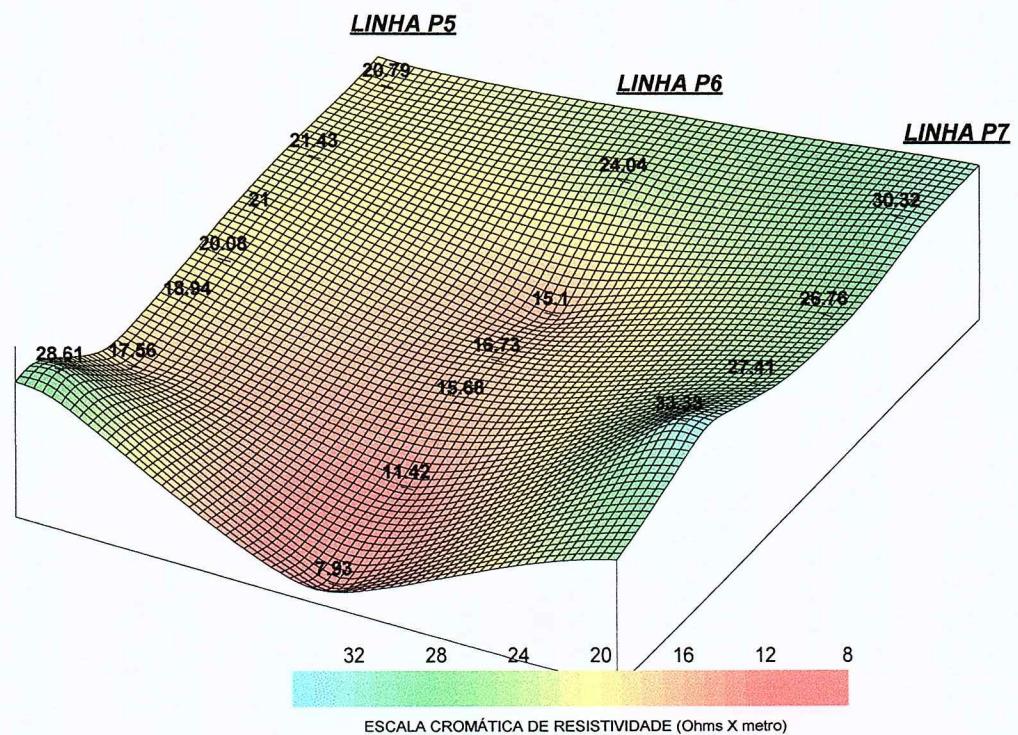


Figura 19 – Mapa e Simulação Tridimensional da profundidade 120 metros.

8.3 Interpretações

A região de estudo pode ser caracterizada geologicamente como um espesso pacote sedimentar nas proximidades das margens do Rio Tietê, sendo tal pacote composto por sedimentos ora arenosos, ora argilosos.

Nesse contexto geológico, todo o pacote sedimentar encontra-se saturado. Entretanto, visando a locação de poços para exploração de águas subterrâneas, é de interesse que se identifiquem pacotes sedimentares arenosos, uma vez que sedimentos de granulação areia têm maior permeabilidade e possibilitam, portanto, a transferência da água acumulada em seus poros.

A identificação dos pacotes sedimentares presentes na área baseia-se no contraste entre as diferentes resistividades dos materiais presentes (Tabela 1).

| MATERIAIS GEOLÓGICOS | RESISTIVIDADE (Ohm x metro) |
|----------------------|-----------------------------|
| Argila Seca | 1 – 50 |
| Argila Saturada | 1 – 100 |
| Areia Seca | 1000 – 10.000 |
| Areia Saturada | 50 – 500 |
| Granito | 1000 – 10.000 |
| Rochas Metamórficas | 300 – 3.000 |

Tabela 1 – Resistividade dos diferentes materiais geológicos (Modificado de Clark,J. et al, 2011).

Como é de se observar, a presença de argilominerais tende a diminuir a resistividade do meio. Tal fato pode ser explicado por propriedades físico-químicas, como a adsorção de cátions e a ionização dos minerais argilosos para o fornecimento de íons livres e facilitando a propagação da corrente elétrica resultando, nestes locais, menores resistividades.

Considerando que o nível d'água na região é raso, pode-se inferir que o pacote sedimentar analisado está totalmente saturado. Portanto, a interpretação dos resultados obtidos tem como objetivo identificar zonas onde ocorrem resistividades mais altas, identificando assim porções arenosas podendo caracterizar possíveis aquíferos sedimentares.

Os resultados dos ensaios de eletrorresistividade possibilitaram a identificação dos contrastes entre os padrões de resistividade de forma clara. Deste modo, é possível estabelecer que zonas de coloração avermelhada representem áreas menos resistivas que correlacionam-se com fácies argilosas do pacote sedimentar. Por outro lado, áreas mais resistivas apresentam coloração verde-azuladas e representam possíveis pacotes arenosos da região estudada.

Diante dos resultados apresentados, é possível indicar locais propícios para a instalação de poços tubulares para a exploração de águas subterrâneas (conforme assinalado nas seções modeladas).

A interpretação das curvas bilogarítmicas geradas por sondagens elétricas verticais baseia-se na identificação de pontos de inflexão, nos quais há mudança nos padrões de resistividade e que indicam a mudança de um estrato geoelétrico para outro. Desse modo, é possível identificar diferentes estratos geoelétricos e inferir a profundidade dos diferentes estratos geoelétricos na região, inclusive topo rochoso. Vale lembrar que a resistividade de meios saturados tende a se mostrar baixa, uma vez que a água é um meio condutivo e materiais cristalinos (topo rochoso) apresentam um padrão de resistividade elevado.

Os resultados provenientes do ensaio de sondagem elétrica vertical (SEV), possibilitam a identificação de porções que apresentam contrastes entre os padrões de resistividade. Deste modo, é possível identificar a espessura do pacote sedimentar presente na área – profundidade do topo rochoso.

Diante disso, é possível observar que o pacote sedimentar tem espessura em torno de 250 metros, indicado pelo estrato geoelétrico delimitado a partir do ponto de inflexão da curva no qual os padrões de resistividade tendem a aumentar, representando, portanto, a profundidade aproximada do embasamento cristalino – fim do pacote sedimentar.

Complementarmente, também foi possível estimar a profundidade do nível d'água nas SEVs, que situou-se entre 5 e 6,0m na área estudada. Nas SEVs 2, 3 e 4 é possível observar de forma clara a mudança nos padrões de resistividade, que indicam a profundidade do N.A. Nota-se que entre o segundo e o terceiro estratos geoelétricos das SEVs 3 e 4 ocorre a queda brusca nos valores de resistividade aparente, da ordem de centenas/milhares para dezenas. O mesmo ocorre entre o terceiro e quarto estratos geoelétricos da SEV 2 indicando, de fato, a profundidade do nível d'água entre 5 e 6 metros de profundidade.

9. Conclusões

De acordo com o contexto geológico no qual se insere a área deste trabalho, o principal objetivo da presente prospecção geoelétrica foi a detecção e identificação de fácies sedimentares arenosas que são correlacionáveis a possíveis aquíferos.

A interpretação quantitativa das SEVs permitiu estimar que a espessura do pacote sedimentar e potencial aquífero é da ordem de 250m

Já os caminhamentos elétricos identificaram locais de resistividades um pouco mais elevadas, indicativos de maior presença de areias, mais favoráveis à ocorrência de aquíferos porosos.

Assim, a partir dos resultados obtidos nos levantamentos de eletrorresistividade, foi possível a detecção de locais propícios para a locação de poços tubulares visando a exploração de águas subterrâneas.

Deste modo, as técnicas de eletrorresistividade aplicadas mostraram-se eficientes ferramentas de prospecção indireta para detecção de possíveis aquíferos sedimentares e excelentes meios de otimização na locação de poços tubulares, uma vez que estes podem ser direcionados a locais com maior probabilidade de êxito, quais sejam: maiores espessuras de sedimentos associadas a resistividades mais elevadas.

Por fim, como resultado final dos ensaios geoelétricos realizados no presente trabalho, os locais caracterizados como propícios para a locação de poços tubulares, a partir dos contrastes de eletrorresistividade, são indicados nas seções modeladas de resistividade.

10. Referências Bibliográficas

- ALVES, A. 2009. Petrogênese de Plútôns Graníticos do Leste Paulista: Geocronologia, Geoquímica Elemental e Isotópica. Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BRAGA, A. C. O. 2007. Modulo: Métodos Geoelétricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Aplicada. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 80p.
- CLARK, J., PAGE, R. 2011. Inexpensive Geophysical Instruments Supporting Groundwater Exploration in Developing Nations. *Journal of Water Resources and Protection*. Vol.3 No.10(2011), Article ID:8137,13 p.
- GALLAS, J. D. F., GIARDIN, A. 2016. Eletrorresistividade na Prospecção de Aquíferos Fraturados. *Revista Águas Subterrâneas*, Vol. 30 (1), 119-138. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- GALLAS, J. D. F. 2003. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com emprego de métodos indiretos. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo.*,24(1/2), 43-51.
- HIRATA, R., BASTOS, C., ROCHA, G. 1997. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 2vols.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. Levantamentoelétrico. In:KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. 2009. Geofísica de exploração. Oficina de Textos, São Paulo, p.: 315-340.
- LOKE, M. 2001. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies – A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Geotomo Software Solutions.
- ORELLANA, E. 1972. *PROSPECCION GEOELECTRICA en corriente continua*. Parainfo, Madri, p.: 137-314
- SAITO, M. 2002. O Potencial de Aplicação de Estéril da Mineração de Areia, em Mogi das Cruzes (SP), como matéria prima cerâmica e pozolânica. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- TELFORD, M. ,GELDART, P., SHERIFF, E., KEYS, A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Londres, p.: 632-700.
- TERREL, D. 2007. Avaliação da qualidade da água subterrânea em área de mineração de caulim: impactos e perspectivas de remediação, município de Mogi das Cruzes, SP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

XAVIER, F. 2011. Aplicação da Sondagem Geofísica – Método Eletrorresistividade – Na locação de poços Tubulares. TECGEO, Departamento de Geofísica Aplicada, Santa Catarina.