



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO DE GEOCIÊNCIAS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MAPEAMENTO DE Aqüíferos na cidade de Manaus (AM) -  
UTILIZANDO PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO E SONDAGEM  
ELÉTRICA VERTICAL**

**LENA SIMONE BARATA SOUZA**

Belém

Setembro - 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**MAPEAMENTO DE AQÜIFÉROS NA CIDADE DE MANAUS (AM)  
UTILIZANDO PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO E SONDAGEM  
ELÉTRICA VERTICAL**

TESE APRESENTADA POR

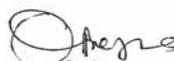
**LENA SIMONE BARATA SOUZA**

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

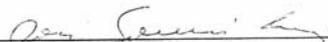
**Data da aprovação:** 02/09/2005

**Nota:** 72% (BOM)

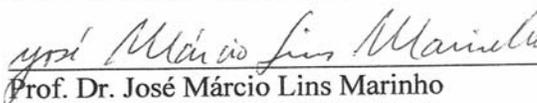
COMITÊ DE TESE:



Prof. Dr. Om Prakash Verma (Orientador)



Prof. Dr. José Gouvêa Luiz



Prof. Dr. José Márcio Lins Marinho

**BELÉM**

**2005**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)  
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

---

**Souza, Lena Simone Barata**

Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus(AM) – utilizando perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. / **Lena Simone Barata Souza; orientador, Om Prakash Verma. - 2005**

84f. : il

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2005.

1. Perfilagem geofísica de poços 2. Sondagem elétrica vertical 3. Aquíferos 4. Manaus(AM) I. Verma, Om Prakash, orient. II Título.

**CDD 20. ed.: 622.154098113**

---

*Dedico*

*Aos meus pais (Maria & Agenor)*

## AGRADECIMENTOS

A Jackson Paz, pelo apoio incondicional tanto sentimental quanto financeiro durante o período do mestrado e minha permanência em Belém.

Aos meus pais (Maria & Agenor) que fizeram do seu amor e dedicação o pilar da pessoa que sou hoje.

Aos meus irmãos (Leny, Leno, Leda, Leisa e Larissa) e ao membro mais novo da família (Pedro), sobrinho, que fizeram do seu amor meu “porto seguro”.

Ao Prof. Dr. Om Prakash Verma, pela orientação.

Ao Departamento e Curso de Pós-graduação em Geofísica (DGf/CPGf/UFGA), pela logística e infraestrutura cedidas para execução deste trabalho.

A CAPES, pela bolsa de estudo.

A CPRM-AM, em nome de Carlos Aguiar, por fornecer o relatório interno (Sistema de Informações de Água Subterrânea – SIAGAS) referente ao sistema hidrogeológico de Manaus, e ainda por liberar perfis litológicos de amostragem de calha.

Ao Prof. Dr. José Gouvêa Luiz/UFGA pela ajuda, interesse e paciência nas correções dos dados de campo da sondagem elétrica vertical, e ainda, pela participação na banca examinadora.

Ao Prof. Dr. José Márcio Lins Marinho/UFGA, pela participação na banca examinadora.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi, em nome do funcionário Marcelo Talles, pelo aprendizado na etapa de digitalização dos perfis de perfilagem geofísica de poço.

Aos atuais e ex-funcionários e colegas do Museu Paraense Emílio Goeldi: Dilce Rossetti, Ana Góes, Heloisa, Emídio e D. Maria pelo incentivo, paciência e carinho dado durante os quase três anos de estadia em Belém, e principalmente, no período que iniciei o curso de pós-graduação.

A Alessandra C. Moraes, pela ajuda na etapa de campo deste trabalho.

Aos colegas de curso da pós, Lana e Lair, pelo apoio e ajuda no processamento dos dados de sondagem elétrica vertical, e por dividirem momentos bons e ruins no decorrer do desenvolvimento dessa dissertação. Ainda incluem-se Francisco e Vinícius.

A funcionária do CPGf, Benildes Lopes, por sempre se preocupar com o meu bem-estar.

Aos amigos distantes: Grace, Alexandre, Eisner, Laudimira e Jaqueline, por emanarem vibrações positivas.

A minha avó (Brígida) e tios (Beto e Lúcia) pelo incentivo dado na etapa final deste trabalho.

A Deus ...

*Trecho da música: “**Esperando por mim**”.*

*Digam o que disserem*

*Meu pai sempre esteve esperando por mim.*

*Digam o que disserem*

*Minha mãe sempre esteve esperando por mim.*

*Digam o que disserem*

*Agora meu filho espera por mim.*

*Digam o que disserem*

*Meus verdadeiros amigos sempre esperaram por mim.*

*(**Legião Urbana**).*

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b>	i
<b>AGRADECIMENTOS</b>	ii
<b>EPÍGRAFE</b>	iii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	v
<b>RESUMO</b>	1
<b>ABSTRACT</b>	3
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	5
1.1. OBJETIVO	6
1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE	7
<b>2. GENERALIDADES E GEOLOGIA DA ÁREA</b>	8
2.1. ÁREA DE ESTUDO	8
2.2. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	10
2.3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO	10
2.4. CONTEXTO GEOLÓGICO	11
2.4.1. <b>Estratigrafia local</b>	11
<b>3. RECURSOS HÍDRICOS E HIROGEOLOGIA DA ÁREA</b>	15
3.1. BACIAS HIDROGRÁFICAS	15
3.2. HIROGEOLOGIA	17
<b>4. METODOLOGIA</b>	19
4.1. PRINCÍPIOS TEÓRICOS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS	20
4.1.1. <b>Perfilagem Geofísica de Poço (PGP)</b>	20
4.1.1.1. Perfil radioativo – Raio Gama (RG)	20
4.1.1.2. Perfil elétrico – Resistência Elétrica (RE)	21
4.1.1.3. Perfil elétrico – Potencial Espontâneo (SP)	24
4.1.2. <b>Sondagem Elétrica Vertical (SEV)</b>	25
4.2. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	28
4.2.1. <b>Etapa de escritório</b>	28
4.2.2. <b>Etapa de campo</b>	29
<b>5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS</b>	31
5.1. PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO (PGP)	31
5.2. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)	37
5.3. PERFIS LITOLÓGICOS DE AMOSTRAGEM DE CALHA	44
<b>6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	48
6.1. SEÇÕES HIROGEOLOGICAS	48
6.2. RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS GEOELÉTRICOS E HIROGEOLOGICAS	58
6.2.1. <b>Resistência transversal (R) e condutância longitudinal (S)</b>	60
6.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
<b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	66
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	68
<b>ANEXO</b>	72
Anexo 1 – Tabelas dos dados de campo das SEVs (arranjo Schlumberger)	73

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, dos poços com dados geofísicos e sondagens elétricas verticais _____	9
Figura 2 – Coluna litoestratigráfica da Bacia do Amazonas (Cunha <i>et al.</i> , 1994)_____	12
Figura 3 – Carta de litofácies do Aquífero Alter do Chão/Manaus (Aguiar <i>et al.</i> , 2002) ____	14
Figura 4 – Comportamento da curva dos perfis SP, RE e RG _____	23
Figura 5 – Sistema simultâneo de medida de SP e RE (Nery, 1997) _____	23
Figura 6 – Quadripolo AMNB (dispositivo Schlumberger) _____	27
Figura 7A – Perfis geofísicos de poços. 1 e 2 Est. Torquato Tapajós. 3 Col. Sto Antônio __	32
Figura 7B – Perfis geofísicos de poços. 4 Renato Souza Pinto. 5 e 6 Riacho Doce_____	33
Figura 7C – Perfis geofísicos de poços. 7, 8 e 9 N. S. de Fátima _____	34
Figura 7D – Perfis geofísicos de poços. 10 e 11 Amazonino Mendes. 12 Jorge Texeira ____	35
Figura 7E – Perfis geofísicos de poços. 13 S. José. 14 e 15 Zumbi _____	36
Figura 8 – Interpretação das SEVs _____	38-43
Figura 9A – Perfis litológicos de amostragem de calha de poços. 1 e 2 Est. Torquato Tapajós _____	45
Figura 9B – Perfis litológicos de amostragem de calha de poços. 3 e 4 Col. Sto Antônio. 5 Amazonino Mendes _____	46
Figura 9C – Perfis litológicos de amostragem de calha de poços. 6 S. José. 7 Jorge Texeira. 8 Zumbi_____	47
Figura 10 – Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção Transversal AA' _____	52
Figura 11 – Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção Transversal BB' _____	53
Figura 12 – Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção Transversal CC' _____	54
Figura 13 – Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção Transversal DD' _____	55

Figura 14 – Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção Transversal EE'	56
Figura 15 – Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção Transversal FF'	57
Figura 16 – Mapa de contorno de resistência transversal dos horizontes geoeletricos inferiores a 50 m de profundidade	62
Figura 17 – Mapa de contorno de condutância longitudinal dos horizontes geoeletricos inferiores a 50 m de profundidade	63

## RESUMO

O sistema de águas subterrâneas vigentes na cidade de Manaus (AM) é pertencente ao Aquífero Alter do Chão, o qual é caracterizado por fácies sedimentares arenosa, argilosa, areno-argilosa e “Arenito Manaus” depositadas em ambiente fluvial e flúvio-deltáico. Estima-se que 32.500 km<sup>3</sup> de água possam ser explorados, fornecendo poços confinados a semiconfinados com vazão de até 300 m<sup>3</sup>/h em poços de aproximadamente 220 m de profundidade. Grandes distorções, contudo, têm sido notadas, Manaus, em foco neste trabalho, tem poços com baixo rendimento (de 78 m<sup>3</sup>/h), devido à má colocação de filtros em consequência da falta de informações sobre os aquíferos. Através do uso integrado de perfilação geofísica de poço (perfis de raio gama, de potencial espontâneo e de resistência elétrica), sondagem elétrica vertical e informações litológicas de amostragem de calha, mapearam-se camadas litológicas permo-porosas com elevado potencial aquífero nas zonas norte e leste da cidade de Manaus. Foram identificadas duas zonas aquíferas. A primeira zona é marcada pelos 50 m iniciais de profundidade. Nesta zona distinguem-se três tipos de litologias: argilosa, arenosa e areno-argilosa com as mais variadas dimensões. Estas duas últimas litologias apresentam elevado potencial aquífero. Mesmo assim, nesta zona não há tendência a conter um volume de água considerável, devido à limitada continuidade lateral dos corpos arenosos e estar sujeita aos estorvos antrópicos superficiais. Portanto, não indicada para exploração de água em grandes quantidades. A segunda zona se estende a partir dos 50 m até aproximadamente 290 m de profundidade. É caracterizada por dois tipos de litologias: arenosa e areno-argilosa. Ao contrário da primeira, a esta profundidade há propensão do armazenamento e exploração de água. Apresenta litologias com elevado potencial aquífero,

cujos corpos arenosos são mais espessos e possuem uma maior continuidade lateral que os da zona 1; e valores de vazão de quase 300 m<sup>3</sup>/h. Serve, então, para abastecimento público por causa das boas vazões, garantia de água de boa qualidade protegida de ações antrópicas.

A análise feita quanto à variação lateral, em mapas, de resistência transversal e condutância longitudinal, revelou que nas porções inferiores a 50 m de profundidade os setores NE e SW correspondem às zonas permeáveis. Portanto, possuem menos faixas argilosas, sendo considerados os setores mais transmissivos do sistema aquífero. Os poços com profundidade maiores que 50 m recomenda-se sua locações nas faixas NNW, SW e extremo sul, em virtude dos resultados obtidos através da perfilagens geofísicas de poços, as quais delineiam camadas permo-porosas de elevado potencial aquífero para a área estudada.

## ABSTRACT

The principal source of groundwater in Manaus-AM is the Alter of Chão aquifer. This aquifer is characterized by sand, clay and sandy-clay sedimentary facies and the Manaus sandstones, deposited in the fluvial and fluvial-deltaic ambient. An estimated amount of 32.500 km<sup>3</sup> of groundwater can be exploited from this aquifer through wells of about 220 m deep, producing water at a maximum rate of 300 m<sup>3</sup>/h. However, there are big distortions in the production rates. In some boreholes they are as low as 78 m<sup>3</sup>/h because of wrong filter locations due to the lack of information about the aquifer position in depth. The permo-porous zones forming the aquifers were mapped in the northern and eastern part of the town of Manaus, employing in integration of the information available from the well-log geophysical data, Vertical Electrical Sounding (VES) data the litology obtained through the examination of the borehole cuttings. This work resulted in the identification of two distinct geohydrological zones in depth. The first, up to the depth of 50 m, is marked by clay, sand and sandy-clay zones of varied dimensions. However, they are not recommended for great demand of water because of the limited lateral extension of the sand zones and for being susceptible to superficial contaminations. The second zone extends below 50 m to about 290 m in depth, and is very appropriate for the storage of large amount of groundwater because it contains thick sand zones of great lateral extensions. The production rate of the wells in this aquifer is around 300 m<sup>3</sup>/h. Therefore, it is recommended for the supply of good quality groundwater to meet higher demands such as for a district in a town.

An analysis of the transverse resistance and longitudinal conductance maps of the upper zone up to 50 m, leads to that NE and SW sectors of the area contend more permeable

zones, contend less clayey layers, therefore, of higher transmissibility zones of the aquifer system. However, for wells deeper than 50 m, recommend NNW e SW region for their locations based on the results obtained through Geophysical Well Logging that delineates the permo-porous layers forming a good aquifer.

## 1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea representa a parcela do ciclo hidrológico que transita "escondida" na subsuperfície da Terra. Ela ocorre preenchendo os poros intergranulares dos sedimentos ou rochas sedimentares, fraturas, falhas, fissuras e outras formas de vazios das rochas compactas. Estes vazios tem dimensões milimétricas, porém, ocorrem em tão grande número, que os volumes de água doce estocados no subsolo dos continentes, até a profundidade de 4.000 m, são estimados entre 8 e 10 milhões de km<sup>3</sup>. Estes volumes representam cerca de 98% da quantidade de água doce que ocorre na forma líquida na Terra (Peixoto & Oort, 1990).

Normalmente, a água de subsuperfície não necessita ser tratada para ser consumida, como acontece com as águas dos rios, tendo em vista ser naturalmente filtrada e purificada, muito além do que se poderia obter por meio do processo usual de tratamento. Como resultado, a utilização do manancial subterrâneo é relativamente muito mais barata. Portanto, a qualidade das águas subterrâneas é tão significativa quanto a sua quantidade, podendo abastecer cerca de 70% das cidades do Brasil. Os problemas de abastecimento, portanto, nas áreas metropolitanas brasileiras decorrem fundamentalmente da poluição e do clima. No primeiro caso, cerca de 90% do volume de esgotos domésticos e 70% dos efluentes industriais são lançados sem tratamento nos rios das grandes cidades. Junte-se ainda cerca de 90 milhões de toneladas por ano de lixo depositado sobre o solo, que invariavelmente irá contaminar o manancial aquífero. Quanto ao clima, extensas regiões abrangidas pelo semi-árido brasileiro sofrem sucessivos períodos de seca.

Embora não haja dados oficiais, é provável que estes números não sejam diferentes para o Estado do Amazonas. Este estado apresenta um potencial hídrico de 1.848,3

km<sup>3</sup>/ano; população de 2.389.279; disponibilidade hídrica social de 773,6x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/hab/ano; densidade populacional de 1,50 hab/km<sup>2</sup> e utilização total de 80 m<sup>3</sup>/hab/ano, o que o coloca como o estado que mais utiliza água subterrânea no Brasil. Mesmo diante disso, o conhecimento efetivo do potencial hídrico está longe de ser o adequado. O sistema de águas subterrâneas vigentes em Manaus é pertencente ao Aquífero Alter do Chão, sendo atualmente o mais importante sistema hidrogeológico do Amazonas. Estima-se que 32.500 km<sup>3</sup> de água possam ser explorados, fornecendo poços confinados a semiconfinados com vazão de até 300 m<sup>3</sup>/h em poços de aproximadamente 220 m. Grandes distorções, contudo, têm sido notadas, Manaus, em foco neste trabalho, tem poços com baixo rendimento (de 78 m<sup>3</sup>/h) (Aguiar *et al.*, 2002), devido à má colocação de filtros em consequência da falta de informações sobre os aquíferos.

Em geral, a aplicação de diferentes técnicas na exploração de água subterrânea tem sido constante, desde o uso dos métodos elétrico e eletromagnético (Verma & Bischoff, 1989; Mbonu *et al.*, 1991; Carrasquila *et al.*, 1991; Mendes, 2000; Mendes & Verma, 2002; Marinho & Vasconcelos, 2004 e Souza & Verma, 2004), sísmico (Hasselström, 1969; Haeni, 1986 e Geissler, 1989) e gravimétrico (Ali & Whiteley, 1981) entre outros. Estes buscam minimizar custos, definindo a localização e/ou geometria do aquífero, e assim a melhor produção através da estimativa da sua vida útil.

## 1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem como finalidade mapear camadas litológicas permo-porosas com elevado potencial aquífero nas zonas norte e leste da cidade de Manaus (AM), através do uso integrado de Perfilagem Geofísica de Poço (PGP), Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e

informações litológicas de amostragem de calha. Contribuindo, assim, para um melhor conhecimento, e conseqüentemente aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos nesta cidade.

## 1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE

O primeiro capítulo é introdutório, destacando-se os aspectos referentes ao papel da água subterrânea nas cidades brasileiras e o uso de ferramentas geofísicas para mapear aquíferos. O segundo capítulo trata da situação da área de estudo e dos contextos geomorfológico e geológico. No terceiro capítulo, temos os aspectos dos recursos hídricos e hidrogeologia. A metodologia empregada neste trabalho é vista no quarto capítulo, sendo justificada a partir das condições geológicas da área, é visto ainda, os princípios teóricos dos métodos geofísicos empregados, as etapas de trabalho (escritório e campo) e a forma de apresentação dos dados. O quinto capítulo mostra a apresentação e interpretação dos dados. No sexto capítulo temos a avaliação dos resultados como a confecção das seções hidrogeológicas, relações entre os parâmetros geoeletricos e hidrogeológicos e as discussões dos resultados. As conclusões e sugestões são mostradas no sétimo capítulo. E por fim, temos as referências bibliográficas e o anexo que traz a tabela com os dados de campo das SEVs.

## 2. GENERALIDADES E GEOLOGIA DA ÁREA

### 2.1. ÁREA DE ESTUDO

O Município de Manaus está localizado no centro geográfico da Amazônia. A superfície total do município é de 11.458,5 km<sup>2</sup>, equivalendo a 0,73% do território do Estado do Amazonas, que abrange 1.577.820,2 km<sup>2</sup>. Os limites do município confrontam: ao norte, com o de Presidente Figueiredo; a leste, com o de Rio Preto da Eva; ao sul, com o de Iranduba; e a oeste, com o de Novo Airão.

Manaus situa-se entre os meridianos de 59°50' e 60°10' oeste e os paralelos de 2°58' e 3°10' sul. Está assentada sobre um baixo planalto que se desenvolve à margem esquerda do Rio Negro, na confluência deste com o Rio Solimões, a partir da qual se forma o Rio Amazonas. A área urbana estende-se por 377 km<sup>2</sup>, correspondendo apenas a 3,3% do território municipal, cuja divisão administrativa em zonas e bairros foi estabelecida de acordo com a divisão geográfica do Decreto Municipal nº. 2.924/95 em zonas: sul, centro-sul, centro-oeste, oeste, norte e leste.

Dentre as zonas acima mencionadas foram selecionadas as zonas norte (mais especificamente os bairros N. S. de Fátima, Renato Souza Pinto, Riacho Doce, Col. S<sup>10</sup> Antônio e Est. Torquato Tapajós) e leste (i. e., os bairros Amazonino Mendes, Zumbi, S. José e Jorge Teixeira) (Figura 1) para a execução das SEVs. Estas sondagens, por sua vez, foram realizadas de acordo com a localização dos poços com dados de perfilagem geofísica, previamente estabelecidas a partir do acervo existente no Departamento de Geofísica (DGF-UFGA).

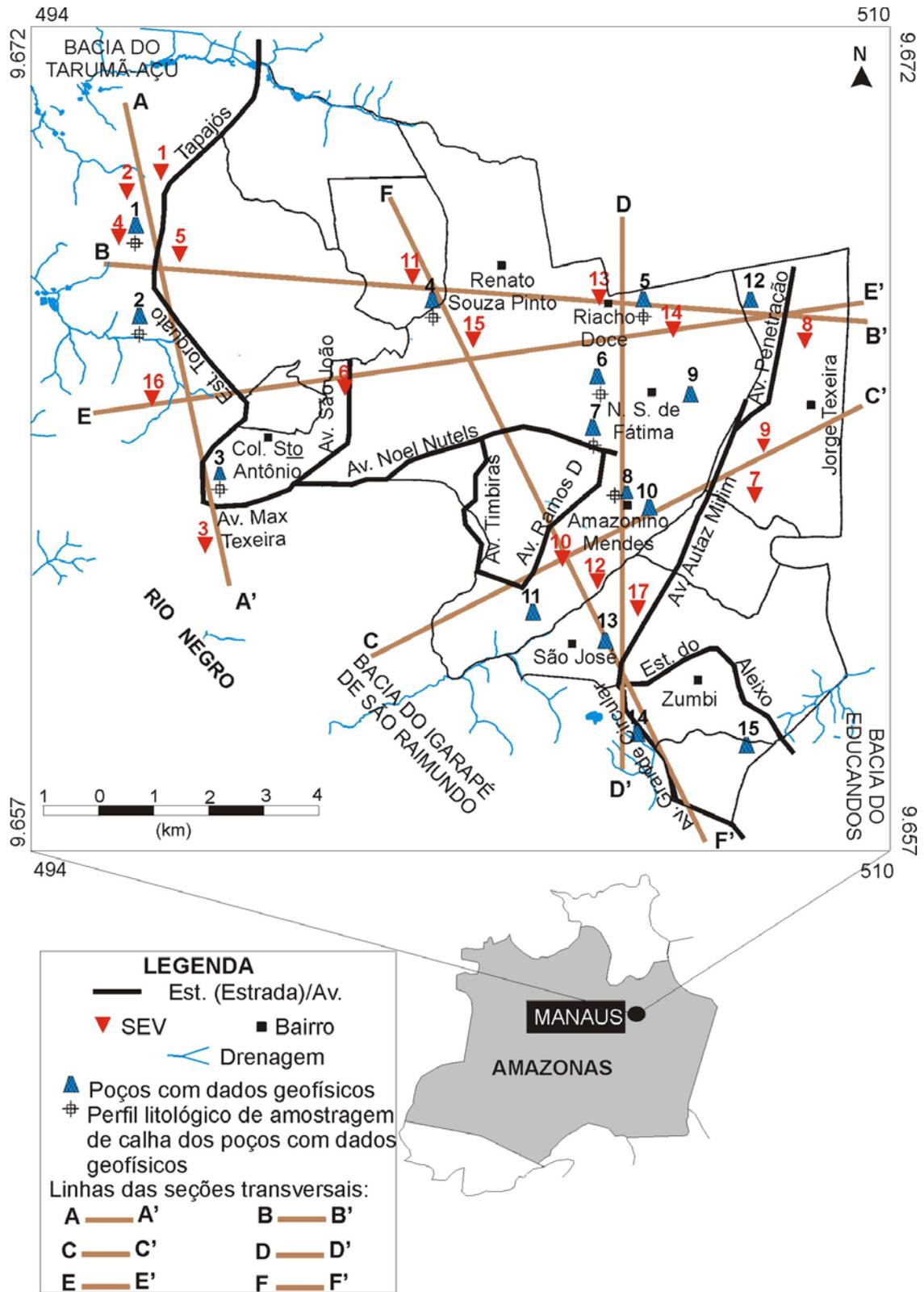


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, dos poços com dados geofísicos e sondagens elétricas verticais.

## 2.2. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Manaus vive sob o clima equatorial quente e úmido. Apresenta apenas duas estações ao longo do ano: (1) chuvosa (inverno) – entre os meses de novembro e junho, período em que a temperatura é mais amena; e (2) seca (verão) – de julho a outubro, período de sol intenso e temperaturas elevadas, em torno de 38°C.

A vegetação encontrada é caracterizada por possuir árvores de porte superior a 20 m. Em terra firme e nas nascentes dos igarapés, vales dos rios e planícies inundadas, as árvores apresentam um porte menor.

## 2.3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A área de Manaus está inserida no Planalto Dissecado Rio Trombetas–Rio Negro de relevo interflúvios tabulares, colinas e platôs escalonados, cujas cotas variam de 50 m a 250 m de altitude, e localmente, em torno de 100 m.

A forma do relevo está intimamente ligada a litologia. Assim, as formações Alter do Chão e Manacapuru são responsáveis por um relevo bem entalhado pela drenagem, formando vales em V. Outra forma característica de relevo é condicionada pelo Grupo Trombetas, que possui vales em U entalhando um grande platô, com cotas de 200 m de altitude (Gatto, 1991). A rede de drenagem apresenta um padrão geral do tipo dendrítico com forte controle estrutural, de densidade média e com fluxo no sentido N-S.

## 2.4. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Amazonas data do final do Pré-Cambriano. Limita-se ao sul com o Escudo do Brasil Central, ao norte com o Escudo das Guianas, a leste e a oeste pelos arcos regionais de Gurupá e Purus, respectivamente, e estes por sua vez a separam das bacias do Marajó e do Solimões. Corresponde a uma área cratonizada dentro da plataforma continental com 500.000 km<sup>2</sup>, abrangendo parte dos estados do Amazonas e Pará. Os afloramentos distribuem-se numa faixa orientada WSW-ENE (Figueiredo & Gabaglia, 1986).

O arcabouço estratigráfico engloba parte do Grupo Purus (Proterozóico) e os grupos Trombetas (Ordoviciano superior a Devoniano inferior), Urupadi (Devoniano inferior a médio), Curuá (Devoniano médio a Carbonífero inferior), Tapajós (Carbonífero médio e Permiano superior) e Javari (Cretáceo médio a Terciário). O embasamento consiste de rochas pertencentes ao Supergrupo Uatumã e à porção mais antiga do Grupo Purus. O Supergrupo Uatumã abrange rochas vulcânicas ácidas, granitos e diques básicos a intermediários (Santos, 1984) (Figura 2). Na área em estudo, encontram aflorantes apenas sedimentos pertencentes ao Grupo Javari.

### 2.4.1. Estratigrafia local

O Grupo Javari está representado pela Formação Alter do Chão, que engloba toda a área de Manaus e é encontrada ou em faixas contínuas ao sul do Município de Presidente Figueiredo ou confinada em estruturas tipo *graben*. Data do Cretáceo Superior/Terciário Inferior (quase 120 Ma) e caracteriza-se por arenitos argilosos, argilitos, arcósios, quartzo-arenitos e brechas intraformacionais, marcados por coloração avermelhada típica. Pelitos são bioturbados, sendo individualizados icnofósseis encontrados principalmente em depósitos de

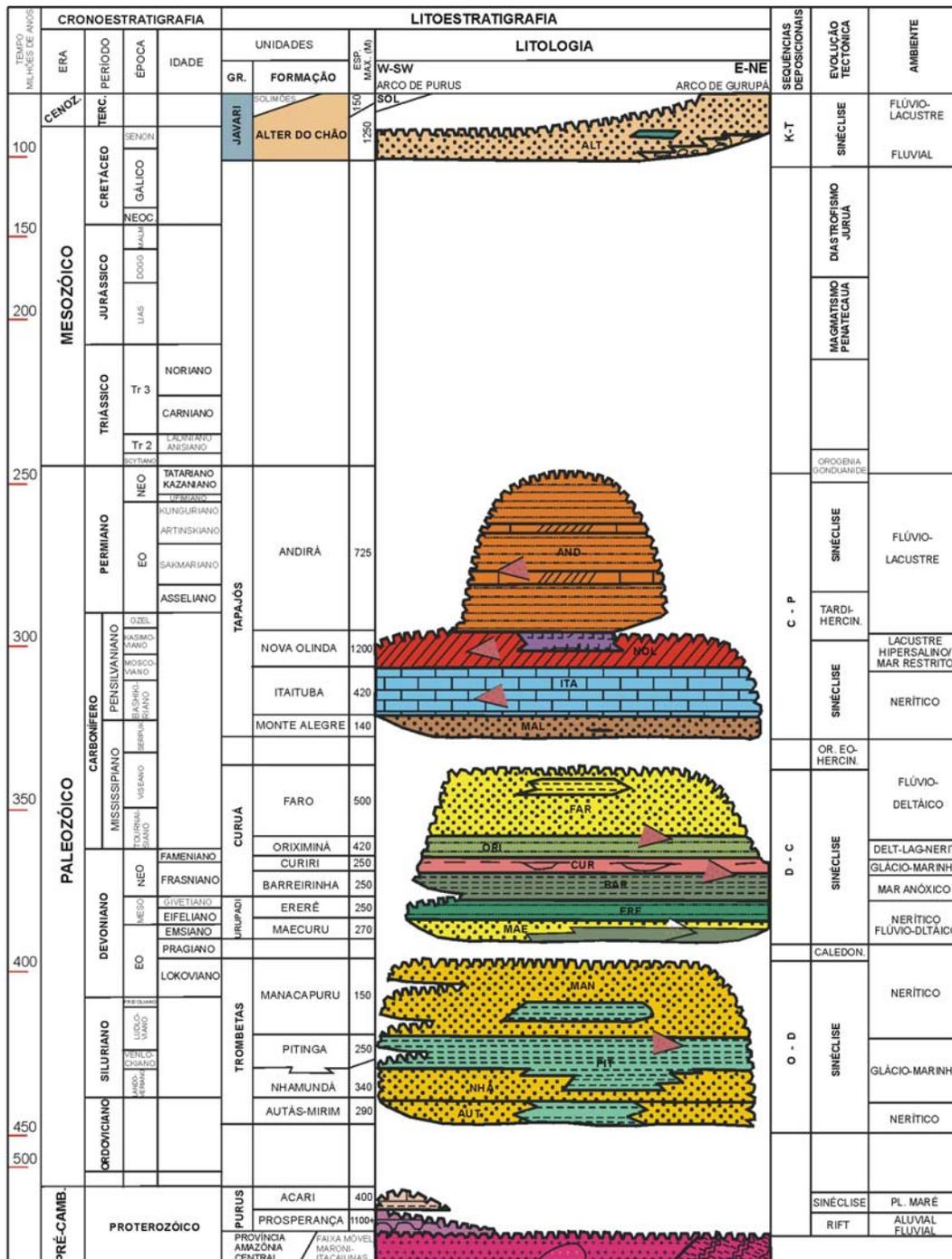


Figura 2 - Coluna litoestratigráfica da Bacia do Amazonas (Cunha *et al.*, 1994).

inundação (Nogueira *et al.*, 1997). A sucessão inferior é arenosa e apresenta ciclos de sedimentação relacionados a ambientes fluviais anastomosados com retrabalhamento eólico. A sucessão superior é pelítica e de um ambiente progradacional flúvio-deltáico (Dino *et al.*, 1999).

Aguiar *et al.*, (2002) individualizaram para a Formação Alter do Chão quatro fácies sedimentares: argilosa, areno-argilosa, arenosa e “Arenito Manaus”. Em seção, estas ocorrem como camadas subhorizontalizadas e com disposição lenticular, não sendo obliteradas por ação tectônica recorrente, e sim restritas a falhamentos lístricos pouco acentuados. Esta formação caracteriza-se, então, por rochas friáveis, pouco coesas, intercaladas por rochas mais endurecidas e restritas aos níveis de ocorrência do “Arenito Manaus” e de crostas lateríticas e/ou “linhas-de-pedra” que são responsáveis pela preservação tabular do relevo (Figura 3).

A unidade informal “Arenito Manaus” caracteriza-se por corpos lenticulares no interior da Formação Alter do Chão, constituídos de arenitos altamente silicificados de coloração avermelhada. Aflora descontinuamente em ambas as margens do Rio Negro, até a altura do arquipélago Anavilhanas. As litologias argilosas ocorrem na porção superior da formação, representando em planta quase 70 % da área de Manaus e perfazendo em torno de 30 % do total dos litotipos considerados. Já as litologias areno-argilosa e arenosa (i. e., estratos de arenitos e siltitos) são de maior importância ao sistema aquífero (Aguiar *et al.*, 2002).

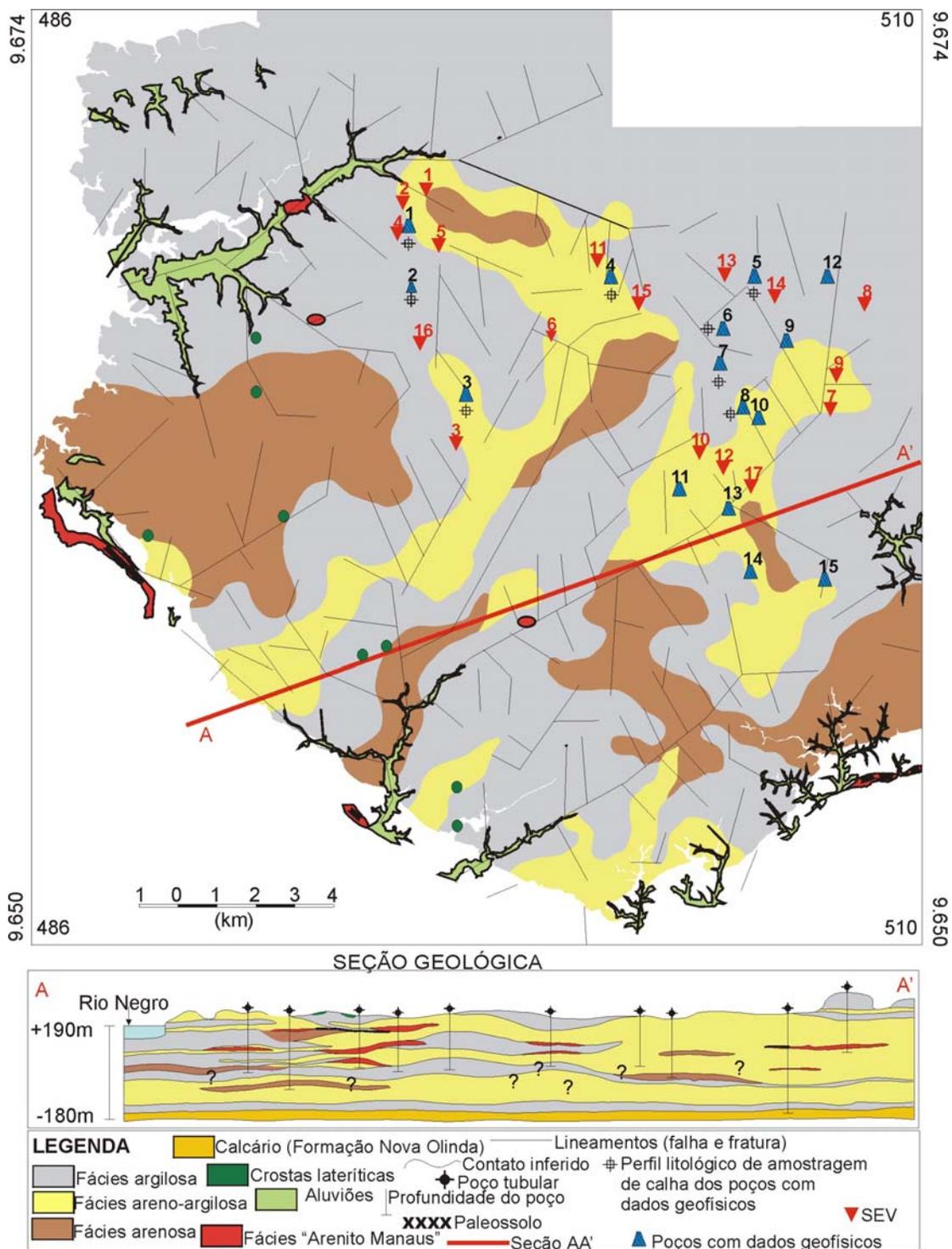


Figura 3 - Carta de litofácies do Aquífero Alter do Chão/Manaus (Aguiar *et al.*, 2002).

### **3. RECURSOS HÍDRICOS E HIDROGEOLOGIA DA ÁREA**

#### **3.1. BACIAS HIDROGRÁFICAS**

A área urbana de Manaus abrange quatro bacias hidrográficas, todas contribuintes da grande Bacia do Rio Negro. Este rio banha a orla sul da cidade, tem suas nascentes localizadas na Depressão do Orenoco, percorrendo cerca de 1.550 km até encontrar o Solimões, formando o Rio Amazonas, na baía do “encontro das águas”. Duas bacias encontram-se integralmente dentro da cidade, a dos igarapés de São Raimundo e do Educandos, e duas parcialmente inseridas na malha urbana, a do Igarapé do Tarumã-Açu e do Rio Puraquequara (Gatto, 1991).

O Igarapé do Tarumã-Açu (ver figura 1), que em seu trecho inferior corresponde ao limite ocidental da área urbana, apresenta diversos afluentes de sua margem esquerda nascendo na Reserva Ducke e percorrendo as zonas norte e oeste de Manaus. Os tributários deste igarapé pela margem esquerda, localizados dentro da área urbana são: (a) Igarapé Leão – nasce ao norte da Reserva Ducke e seu percurso corresponde a um trecho do limite setentrional da área de transição, definida pelo novo perímetro urbano de Manaus; (b) Igarapé do Mariano – tem algumas de suas nascentes localizadas dentro da Reserva Ducke e seu talvegue, entre a reserva e sua embocadura, constitui o limite norte da área urbana e do Bairro do Tarumã; (c) Igarapé da Bolívia – nasce dentro da Reserva Ducke, cruza a rodovia AM-10 e corta áreas em processo de ocupação na zona norte da cidade, assim como o Bairro do Tarumã; e (d) Igarapé do Tarumãzinho – integralmente localizado dentro do Bairro do Tarumã.

O Rio Puraquequara, afluente da margem esquerda do Rio Amazonas, também apresenta parte de sua bacia localizada dentro de área ocupada e de áreas consideradas como de uso agrícola. Este curso d'água, que em seu trecho inferior corresponde ao limite oriental da área urbana, ainda mantém muitas de suas características naturais, mas já começa a sentir os efeitos da expansão da cidade sobre suas fronteiras orientais.

Integram a Bacia do Igarapé de São Raimundo (ver figura 1): (a) Igarapé do Mindú – principal tributário do S. Raimundo, tem uma de suas nascentes localizada no Bairro Jorge Teixeira, na zona leste, próximo a Reserva Ducke. Cruza a cidade no sentido NE-SW, percorrendo e delimitando inúmeros bairros, como Jorge Teixeira, Tancredo Neves, Cidade Nova, Aleixo, Parque 10 de Novembro, N. S. das Graças e S. Geraldo; (b) Igarapé dos Franceses – localizado na zona centro-oeste, é um dos principais contribuintes da bacia. Drena os bairros de Alvorada I e II e D. Pedro I e II; (c) igarapé do Binda – nasce na zona norte e percorre os bairros de Cidade Nova, Parque 10 e União; e (d) Igarapé Manaus – localizado próximo à área central de Manaus, corta importantes vias de acesso ao centro e, a exemplo do que ocorre com os igarapés da Cachoeirinha e do Mestre Chico, sofre as conseqüências das cheias dos rios Negro e Amazonas.

A Bacia do Igarapé do Educandos (ver figura 1) é integrada por: (a) Igarapé do Quarenta – é o principal tributário da Bacia do Educandos e sua nascente está localizada no Bairro Armando Mendes, na zona leste da cidade. Percorre áreas urbanas ocupadas, como o Distrito Industrial da SUFRAMA e os bairros do Coroadó e Japiim; (b) Igarapé da Cachoeirinha – abrange os bairros da Cachoeirinha, Petrópolis, Raiz e S. Francisco. O igarapé atravessa vales que estão sujeitos à inundação, principalmente nos meses de janeiro a junho; e (c) Igarapé do Mestre Chico – localizado próximo à área central de Manaus, abrange parte do

Bairro da Cachoeirinha e cruza vias importantes de acesso ao centro da cidade até desaguar no Educandos. Por suas características, também está sujeito a inundações.

### 3.2. HIDROGEOLOGIA

Os dados paramétricos que compõe a avaliação preliminar do manancial hídrico subterrâneo em Manaus (i. e., o Aquífero Alter do Chão) foram extraídos de um relatório interno da CPRM-AM, obtido a partir do tratamento de informações referentes a 400 poços tubulares perfurados em sua maioria pela CPRM (Aguiar *et al.*, 2002). Este aquífero apresenta espessura em torno de 220 m, dos quais 175 m encontram-se saturados. Considerando-se uma porosidade efetiva de 15% para uma área de 400 km<sup>2</sup>, tem-se uma reserva permanente na ordem de 10 km<sup>3</sup>. O nível anual de oscilação das águas é em torno de 3 metros, segundo dados semanais do poço da CPRM localizado no centro urbano de Manaus no período de 05/2000 a 12/2001 (Aguiar *et al.*, 2004). O limite inferior do aquífero (aproximadamente 200 m) corresponde ao contato entre as rochas clásticas da Formação Alter do Chão e evaporitos e calcários da Formação Nova Olinda (?) de idade Carbonífera (em torno de 300 milhões de anos). Este contato foi verificado em oito poços tubulares e se faz através de uma superfície discordante horizontal, provavelmente não afetada em profundidade por falhamentos identificados em superfície.

O nível freático médio das águas do aquífero é de 25 m. Valores maiores que 25 m estão nas porções SE e NE, correspondendo a quase toda a parte oriental de Manaus. E os menores que 25 m se restringem para oeste, em virtude da topografia, chegando a aflorar em alguns locais, como na parte NW, no bairro de S<sup>ta</sup> Etelvina.

As águas subterrâneas em Manaus indicam um fluxo principal na direção NE-SW. Já os fluxos secundários mostram direções diversas, sendo originados principalmente pelo rebaixamento provocado pelos igarapés Quarenta, Mindú e Bolívia, associados à baixa transmissividade e exploração elevada nas imediações dessas drenagens (Aguiar *et al.*, 2002).

O Aquífero Alter do Chão mostra águas pouco mineralizadas, com pH na ordem de 4,8 e uma condutividade elétrica de 32,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Silva, 2001). Esses dados refletem uma infiltração bastante rápida e um ambiente de circulação quimicamente pobre. As águas são principalmente dos tipos sulfatada cloretada potássica e cloretada sódica. Portanto, são consideradas potáveis, embora se tratando de um aquífero livre e estejam pouco protegidas. Esta proteção está praticamente restrita à presença da zona não-saturada onde se processam os fenômenos de depuração das águas superficiais contaminadas. Apesar da presença desse filtro natural, o aquífero vem apresentando sinais preocupantes de contaminação, como constatado recentemente nos bairros de Educandos e Colônia Oliveira Machado e na porção SW da cidade, onde foi verificada a presença de teores elevados de amônia e nitrato acima dos padrões estabelecidos para potabilidade pela legislação vigente, através da Portaria Federal MS nº. 1.469 de 29/12/2000.

O modelo hidrogeológico a ser investigado na área é caracterizado por rochas sedimentares do tipo arenito e argilito e intercalações destas, associadas ou não ao “Arenito Manaus” que funciona como uma rocha selante, sendo indicativa de zonas aquíferas.

#### 4. METODOLOGIA

O modelo hidrogeológico inferido para a área é caracterizado por arenito e argilito e intercalações destas, representando assim, um modelo geoeletrico de camadas de areias horizontalmente postas com alta resistividade intercaladas por lentes de argila de baixa resistividade. Nesta situação geoeletrica para investigações geofísicas as técnicas mais recomendadas são a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e a Perfilagem Geofísica de Poço (PGP).

Os métodos elétricos e eletromagnéticos para a prospecção de água subterrânea, entre eles as técnicas de SEV e PGP vem sendo utilizadas com sucesso ao longo de décadas, tanto a nível nacional como mundial em terrenos sedimentares. Decidimos assim, aplicá-las na região metropolitana de Manaus, através da integração da SEV e PGP, e ainda, a utilização de perfis litológicos de amostragem de calha. Essa integração permite compensar as limitações de cada um.

A PGP investiga a altas profundidades, mas abrange lateralmente uma área em torno de 1 m ao redor do poço perfilado. Entretanto, a SEV investiga lateralmente áreas muito maiores que na PGP, sendo determinada pela abertura dos eletrodos e seu arranjo, além do modelo geoeletrico. Já a amostragem de calha, embora seja uma investigação meramente pontual e sujeita as misturas de materiais devido às várias subidas e descidas da sonda, possibilita uma caracterização direta dos tipos de materiais litológicos, ao contrário das outras duas, que são interpretações indiretas.

## 4.1. PRINCÍPIOS TEÓRICOS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS

### 4.1.1. Perfilagem Geofísica de Poço (PGP)

É usada principalmente na prospecção de petróleo e de água subterrânea, e secundariamente para verificação de variações texturais de camadas sedimentares e zonas fraturadas (Nery, 1997). A identificação dos tipos litológicos que um poço atravessa é imprescindível para a localização dos intervalos de rocha que possam conter água com significado qualitativo e quantitativo. Para se ter um adequado suprimento de água é necessário identificar os intervalos potencialmente produtores (topo e base) para a colocação de filtros, de modo a garantir um aproveitamento maior da vazão do poço com um aumento de sua vida útil.

Em uma perfilagem de poço é usado um conjunto de perfis geofísicos, os quais são compostos de sensores acoplados a sofisticados aparelhos eletrônicos. Estes sensores são introduzidos poço adentro, registrando a cada profundidade as diversas informações relativas às características físicas das rochas e dos fluidos em seus interstícios (poros).

#### 4.1.1.1. Perfil radioativo – Raio Gama (RG)

É uma das mais usuais técnicas de perfilagem. Envolve a medida da radioatividade natural da rocha e fluido através da emissão de raios gama, proveniente da desintegração de isótopos radiativos dos elementos  $K^{40}$ ,  $U^{238}$  e  $Th^{232}$ . O potássio natural é um dos oito elementos mais abundantes na crosta terrestre. Apenas 0,012% é  $K^{40}$ , sendo o principal responsável pela radiatividade natural das rochas (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação das rochas sedimentares de acordo com a sua radioatividade natural (Nery, 1997).

<b>Alta Radioatividade</b>	<b>Média Radioatividade</b>	<b>Baixa Radioatividade</b>
Folhelhos de águas profundas (lamas de radiolários e globigerinas) e folhelhos pretos betuminosos	Folhelhos e arenitos argilosos e águas rasas	Grande maioria de carvões
Evaporitos potássicos (carnalita e silvita)	Carbonatos	Evaporitos não potássicos (halita, anidrita e gipsita)
Algumas rochas ígneas/metamórficas	Dolomitos	Arenitos limpos

Um perfil de RG mostra um aumento da radiação defronte as camadas que contenham folhelho rico em potássio/fosfato/argila (Figura 4). Sabe-se que este perfil reflete a proporção de folhelho ou argila de uma formação, portanto, pode-se utilizá-lo como um indicador do teor de folhelho ou argilosidade das rochas. Sendo assim, um arenito argiloso pode ser diferenciado de um arenito limpo. Em aquíferos há um fluxo muito baixo de raio gama, devido a pouca concentração de argila.

O grau de investigação do perfil de RG depende da energia do fóton, litologia, tipo de detector, lama, diâmetro do poço e massas específicas das camadas. O que não deve ultrapassar 40 cm. É um dos melhores indicadores litológicos, principalmente para rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados, possibilitando a identificação de unidades permeáveis. Ajuda na correlação entre poços vizinhos, avaliando a continuidade lateral dos aquíferos. Tem a vantagem de poder ser realizado em furos secos revestidos e não revestidos, onde nestes últimos os furos são preenchidos com lama de estabilização.

#### 4.1.1.2. Perfil elétrico – Resistência Elétrica (RE)

A RE pode ser medida em um poço por diferentes métodos. O caso mais simples é o de resistência mono-ponto com a utilização de dois eletrodos, onde um é baixado dentro de

um poço com a ajuda de um cabo e o outro permanece na superfície do terreno, medindo-se assim a resistência da coluna de rocha entre os dois eletrodos (Figura 5).

As medidas são interpretadas qualitativamente, ou seja, os valores medidos de resistência permitem estabelecer se uma camada é mais ou menos resistiva que outra (Figura 4).

- Resistência baixa – qualquer aumento na salinidade (devido à composição na lama ou presença de água salgada na formação ou ainda arenitos contendo salmouras) provocará decréscimo na resistência. Litologias como argila e folhelho resultam em uma baixa resistência, devido à presença de minerais argilosos que são bons condutores. Caso o poço sofra um alargamento em algum ponto (presença de regiões fraturadas ou desmoronamento de camadas arenosas inconsistente) a resistência sofrerá também um decréscimo. Camadas delgadas prejudicam o fluxo de corrente, dificultando seus reconhecimentos e quantificações.
- Resistência alta – engloba rocha portadora de água doce, bem como areia/arenito e seixo/conglomerado, onde nestas duas últimas litologias a presença freqüente do mineral de quartzo é a causa para a elevada resistência, pois este mineral é um mal condutor de corrente elétrica.

O raio de investigação do perfil de RE está intrinsecamente ligado ao grau de salinidade e alargamento das paredes do poço, onde ambos afetam o valor da resistência. O primeiro em virtude da facilidade ao fluxo da corrente frente à presença dos íons. E o segundo prevalecerá à medida de resistência da lama. Portanto, a ausência de linearidade na resposta do perfil de RE o torna meramente qualitativo. É utilizado na localização e determinação de espessuras de aquíferos, variações litológicas e correlação entre poços.

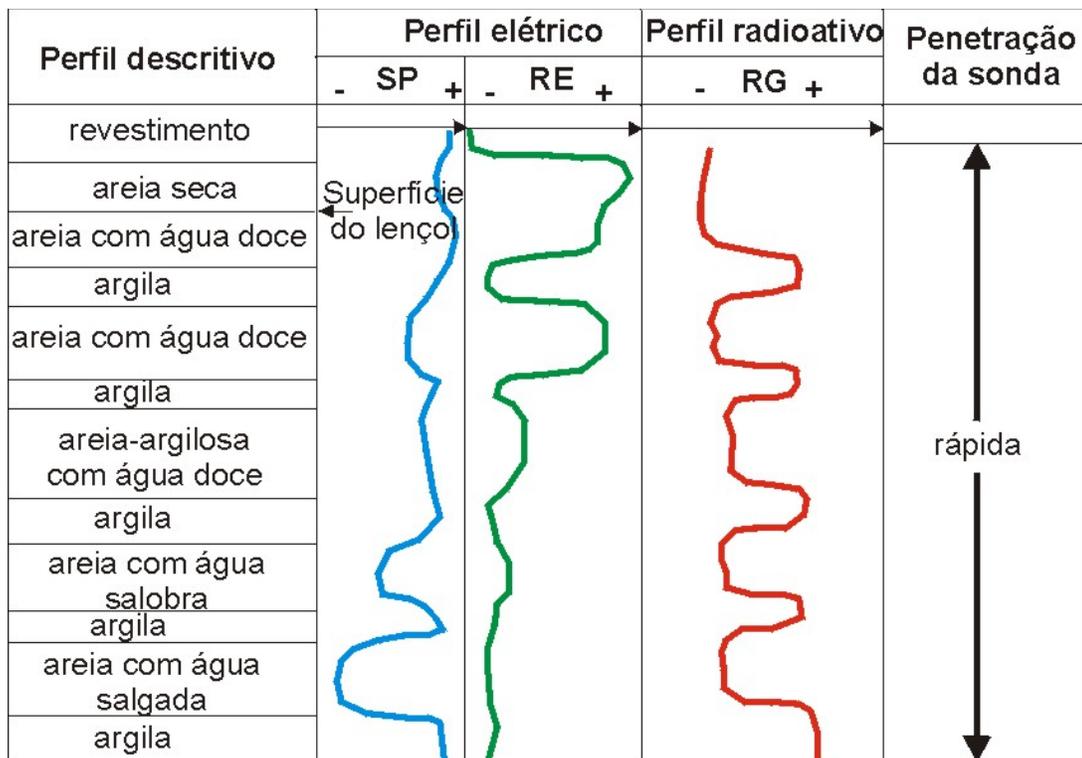


Figura 4 - Comportamento da curva dos perfis SP, RE e RG.

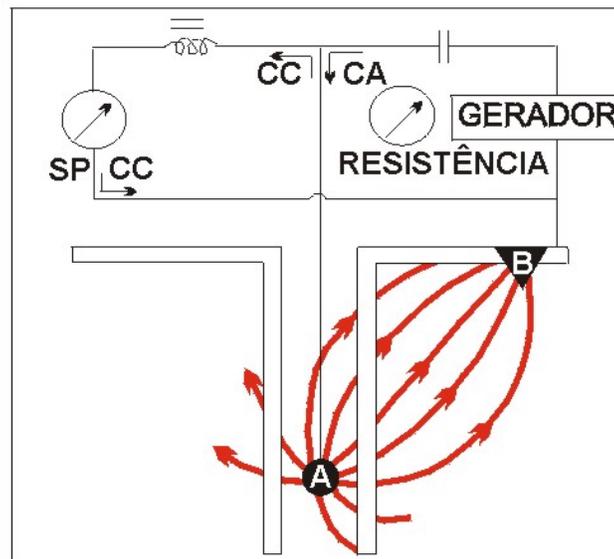


Figura 5 - Sistema simultâneo de medida de SP e RE (Nery, 1997).

#### 4.1.1.3. Perfil elétrico – Potencial Espontâneo (SP)

A curva de SP é medida a partir da diferença entre o potencial elétrico de um eletrodo móvel (A) dentro do poço e o potencial elétrico de um eletrodo fixo (B) na superfície (Figura 5). O seu registro é contínuo, sendo as medidas de potencial dadas em milivolt e as profundidades em metros. A medição do SP em poços é feita na presença do fluido de perfuração (lama) composto por água, argilominerais e aditivos. O SP gerado provém de três tipos de fenômenos que são desenvolvidos frente às camadas permo-porosas: potenciais electrocinético, electroquímico de junção líquida e electroquímico de membrana.

O sinal de deflexão do SP é em função do contraste entre as resistividades da água intersticial e o filtrado da lama. Caso haja igualdade de salinidade entre o filtrado e a água da formação, não haverá deflexão da curva do SP. A invasão do filtrado da lama na formação tende a reduzir o SP. Se houver uma deflexão da curva, a partir da chamada Linha de Base dos Folhelhos (LBF) é porque ocorreu uma movimentação iônica e/ou fluida, sendo assim, a camada deve ser permeável (Figura 4). Logo, a qualidade da curva do SP é assim observada:

- Frente a camadas impermeáveis (não ocorre invasão do filtrado e nem difusão de sais) – a curva mostra uma tendência quase retilínea sendo denominada de LBF.
- Frente a camadas permeáveis (ocorre invasão do filtrado) – a curva apresenta deflexões para a direita (positiva) quando o filtrado for mais salgado do que a água intersticial, e para a esquerda (negativa) caso a água intersticial seja mais salgada que o filtrado da lama. Caso não haja diferença de concentração entre tais fluidos, a curva permanecerá retilínea (sem deslocamento) como a LBF.

O perfil resultante do SP depende da concentração da água de formação e do filtrado da lama. Caso haja a mesma concentração entre estes, a curva não apresentará

deslocamento, indicando ausência de poros. Portanto, deve-se sempre interpretar o SP munido de outros perfis, amenizando-se ao máximo falhas no decorrer das investigações. Este perfil pode ser utilizado na determinação de camadas finas, delimitação de rochas permeáveis e distinção do folhelho (curva positiva) para o arenito (curva negativa), se a salinidade do fluido da formação é maior que a do fluido do poço.

#### 4.1.2. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

É um método clássico utilizado na prospecção de água subterrânea. Apresenta baixo custo operacional e busca identificar os aquíferos a partir de suas características resistivas. O perfil resultante da SEV é obtido de maneira análoga à técnica empregada no ensaio de eletrorresistividade de prospecção superficial, ou seja, baseia-se no cálculo de resistividade, obtida a partir da medida de corrente elétrica e diferença de potencial entre diferentes pontos do terreno.

A equação para o cálculo da resistividade é obtida seguindo a Lei de *Ohm*. Considerando o fluxo de uma corrente contínua ou alternada de muito baixa frequência, que se possa desprezar a corrente de deslocamento em um meio homogêneo, ilimitado e isotrópico. Sendo assim, temos:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (1)$$

Sendo:  $\vec{J}$  – densidade de corrente (em A/m<sup>2</sup>);  $\sigma$  – condutividade (em S/m) que é definida pelo inverso da resistividade (i. e.,  $\sigma = 1/\rho$ ); e  $\vec{E}$  – campo elétrico (em V/m).

Considerando-se a geometria mostrada na figura 6 e partindo desta lei com a substituição das relações:

$$J = \frac{I}{A}; \sigma = \frac{1}{\rho}; E \approx \frac{\Delta V}{l} \Rightarrow \frac{I}{A} \approx \frac{1}{\rho} \frac{\Delta V}{l} \Rightarrow \rho = \frac{A}{l} \left( \frac{\Delta V}{I} \right) = k \left( \frac{\Delta V}{I} \right),$$

obtém-se a resistividade elétrica do semi-espaço homogêneo.

$$\rho = k \cdot \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2)$$

Sendo: k – fator geométrico que depende do arranjo dos eletrodos na superfície;  $\Delta V$  – diferença de potencial elétrico entre os eletrodos de potencial “M e N”; e I – corrente contínua aplicada entre os eletrodos de corrente “A e B”.

Em que o fator geométrico “k” é dado por:

$$k = 2\pi \cdot \left( \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (3)$$

No entanto, a equação (2) é válida somente para meios homogêneos, o que não acontece com o subsolo, pois este é constituído por  $n$ -camadas de  $n$ -resistividades e  $n$ -espessuras. Sendo assim, a resistividade medida é chamada de resistividade aparente ( $\rho_a$ ), que não é propriamente a resistividade média e sim um parâmetro experimental que expressa os resultados das medições (Orellana, 1972), e depende do espaçamento entre os eletrodos (p. e.,  $AB/2$  ou  $L$ ), espessuras e resistividades verdadeiras do pacote rochoso da área em estudo. Portanto, a “ $\rho_a$ ”, é numericamente obtida utilizando-se a equação (2).

Para a aplicação da SEV há diversos tipos de dispositivos ou arranjos de eletrodos (p. e., Schlumberger, Lee e Wenner). Neste trabalho foi utilizado apenas o arranjo Schlumberger, devido à facilidade de operação e resposta na prospecção de água subterrânea em terrenos sedimentares.

A figura 6 mostra a geometria do arranjo Schlumberger, onde os quatro eletrodos utilizados configuram um quadripolo (AMNB). Este quadripolo está alinhado com o centro “0” de AB coincidindo com o ponto intermediário entre os eletrodos M e N, tendo como característica principal o fato de a distância MN ser pequena em relação à distância AB. Durante a realização da SEV com este arranjo, a distância entre A e B deve ser mantida bem maior do que a de M e N. Neste caso o fator geométrico calculado a partir da equação (3) é:

$$k = \pi \left( \frac{L^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad \text{ou} \quad k = \pi \left( L^2 - \frac{b^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{b} \quad (4)$$

Em que  $b = MN$  e  $L = \frac{AB}{2}$ .

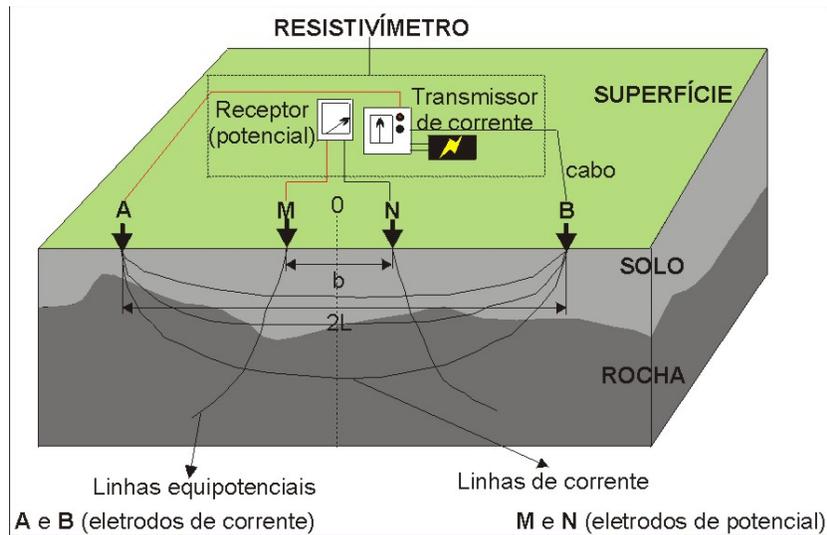


Figura 6 – Quadripolo AMNB (dispositivo Schlumberger).

No arranjo Schlumberger a distância ( $b \rightarrow 0$ ) se comparada a  $2L$ , temos:

$$\rho_a = \pi \left( L^2 - \frac{b^2}{4} \right) \frac{1}{I} \cdot \frac{\Delta V}{b}$$

$$\rho_a = \lim_{b \rightarrow 0} \pi \left( L^2 - \frac{b^2}{4} \right) \frac{1}{I} \cdot \frac{\Delta V}{b} = \pi L^2 \frac{E}{I} \quad (5)$$

O limite de  $\frac{\Delta V}{b}$  quando  $b \rightarrow 0$ , é o gradiente do potencial, ou seja, o campo elétrico. Desta forma considera-se correta a equação:

$$\rho_a = \pi L^2 \frac{\Delta V}{bI} \quad (6)$$

Desprezando-se  $\frac{b^2}{4}$ , introduz-se um erro, mas muito pequeno para  $MN \leq \frac{AB}{5}$ :

$$\varepsilon \leq \frac{L^2 - \left( L^2 - \frac{b^2}{4} \right)}{L^2} = \left( \frac{b}{2L} \right)^2 = 0,04 \text{ ou } 4\%, \text{ para } b = \frac{2L}{5} \quad (7)$$

Pela imprecisão das medidas de campo, este erro é tolerável e atribuído ao ruído geológico e erros experimentais.

## 4.2. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 4.2.1. Etapa de escritório

(1) Seleção, processamento e interpretação de 15 perfis de PGP. Esta fase englobou:

- a. Digitalização dos perfis de RG, RE e SP.
- b. Individualização das unidades por perfil.

- c. Correlação das unidades litológicas identificadas a partir dos perfis com o intuito de avaliar a continuidade lateral e vertical dos estratos, e delimitar os grandes pacotes litológicos para auxiliar na interpretação das SEVs.

Os perfis de RG, SP e RE foram obtidos utilizando o equipamento 1000C da *Mount Sopris* analógico com capacidade para perfilar até 400 m. As medidas são feitas em duas descidas no poço. Na primeira mede-se RG (5 cps/divisão a 5 Kcps/divisão) e na segunda RE (2  $\Omega$ /divisão a 100  $\Omega$ /divisão) e SP (2 mV/divisão a 100 mV/divisão).

- (2) Processamento e interpretação dos dados das SEVs, buscando identificar diferentes unidades geoeletricas, ou seja, extensão vertical e lateral do pacote rochoso. Para isso foi aplicando a técnica de inversão utilizando o programa ATO desenvolvido por Zohdy & Bisdorf (1989).
- (3) Processamento e interpretação de oito perfis de amostragem de calha.
- (4) Confecção das seções hidrogeológicas e mapas de contorno de resistência transversal e condutância longitudinal a partir dos dados de PGP's e SEVs.

#### **4.2.2. Etapa de campo**

As 17 SEVs executadas na região de Manaus foram feitas utilizando o equipamento Resistivímetro GEOTEST RD-300A, com potência nominal de saída de 1000 W, o intervalo de leitura de potencial de 0,1 mV a 750 mV e o valor máximo de corrente é de 800 mA, tendo como fontes duas baterias de automóvel de 12 V cada.

Na coleta dos dados das SEVs foram observadas a integridade dos cabos utilizados e as distâncias entre os eletrodos, cujos espaçamentos foram regularmente distribuídos em escala métrica. Ruídos culturais locais (p. e., tubulações de ferros, fiações elétricas/telefônicas,

entre outros) foram cuidadosamente registrados com o intuito de avaliar a sua interferência nas informações obtidas.

## 5. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os dados são mostrados sob a forma de perfis (Figuras 7A-E, 9A-C), seções (10-15), gráficos (Figura 8), mapas (Figuras 1, 16 e 17) e tabela (Anexo 1).

### 5.1. PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇO (PGP)

Os 15 perfis de poço mostraram profundidades variando em torno de 152 m a 249 m, sendo estas perfilagens realizadas pelo Departamento de Geofísica (DGf-UFGA) como prestação de serviços. Estes, por sua vez, não apresentaram uma disposição regular, pois foram perfurados por empresas de captação de água subterrânea, em geral para abastecimento público ou para indústrias, sem fins científicos e, logo, dispostas aleatoriamente.

As interpretações das curvas dos perfis geofísicos seguiram os princípios já discutidos anteriormente (ver item 4.1.1) (Figuras 7A-E). Areias/arenitos com água doce são indicadas nas interpretações de PGP por baixos valores de RG, SP negativo com curva deslocada para esquerda e elevado RE. Na argila/folhelho, o RG é elevado, o SP não desloca e a RE é baixa. Se o aquífero contiver água salobra/salgada, o SP é negativo com a curva bastante deslocada para a esquerda, a RE é baixa e o RG se mantém baixo (ver Figura 4). Posteriormente, os perfis foram correlacionados lateralmente. A interpretação não teve a pretensão de definir as rochas ou sedimentos atravessados pela sonda, mas indicar se estes eram ou não permo-porosos.

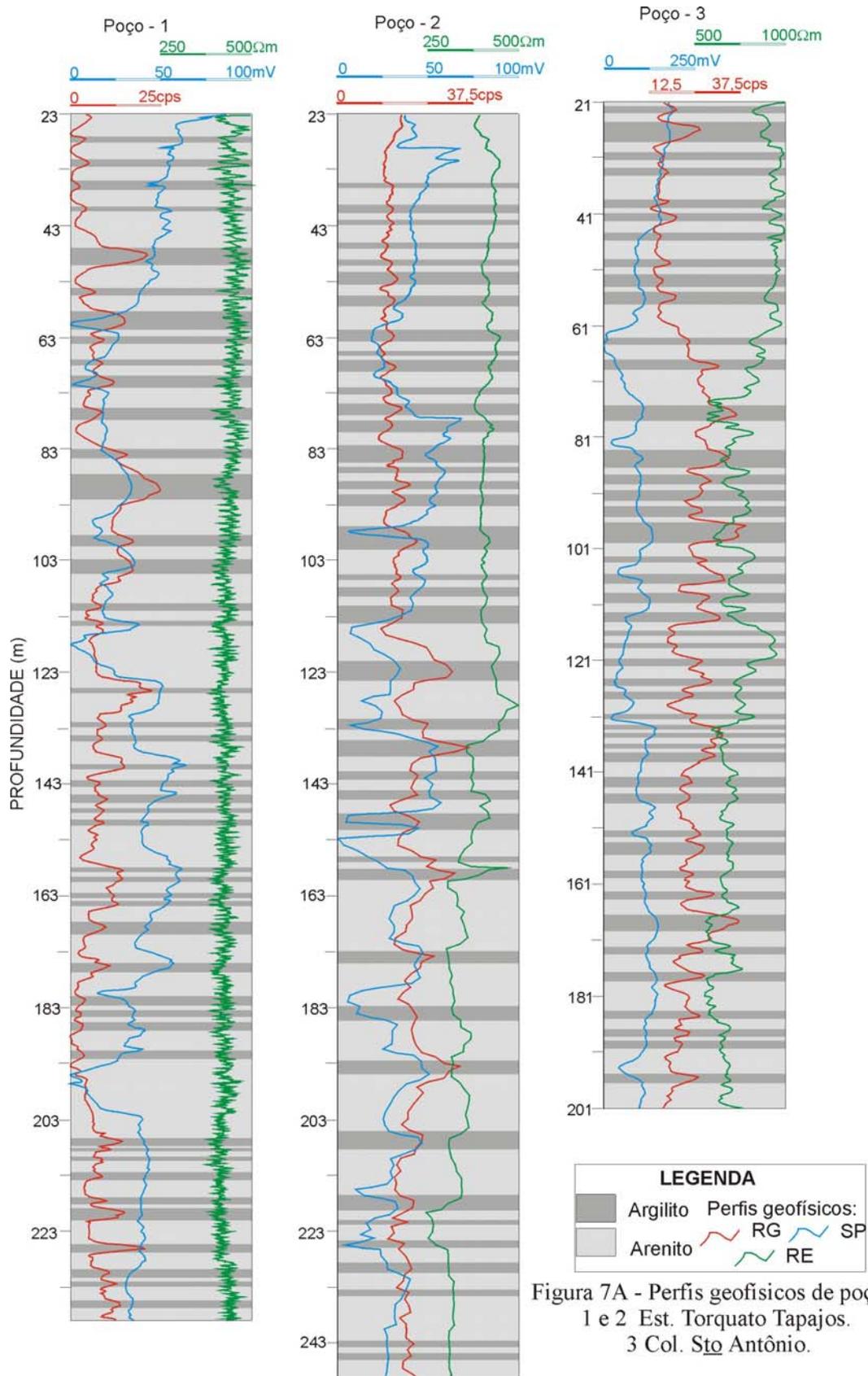


Figura 7A - Perfis geofísicos de poços.  
 1 e 2 Est. Torquato Tapajos.  
 3 Col. Sto Antônio.

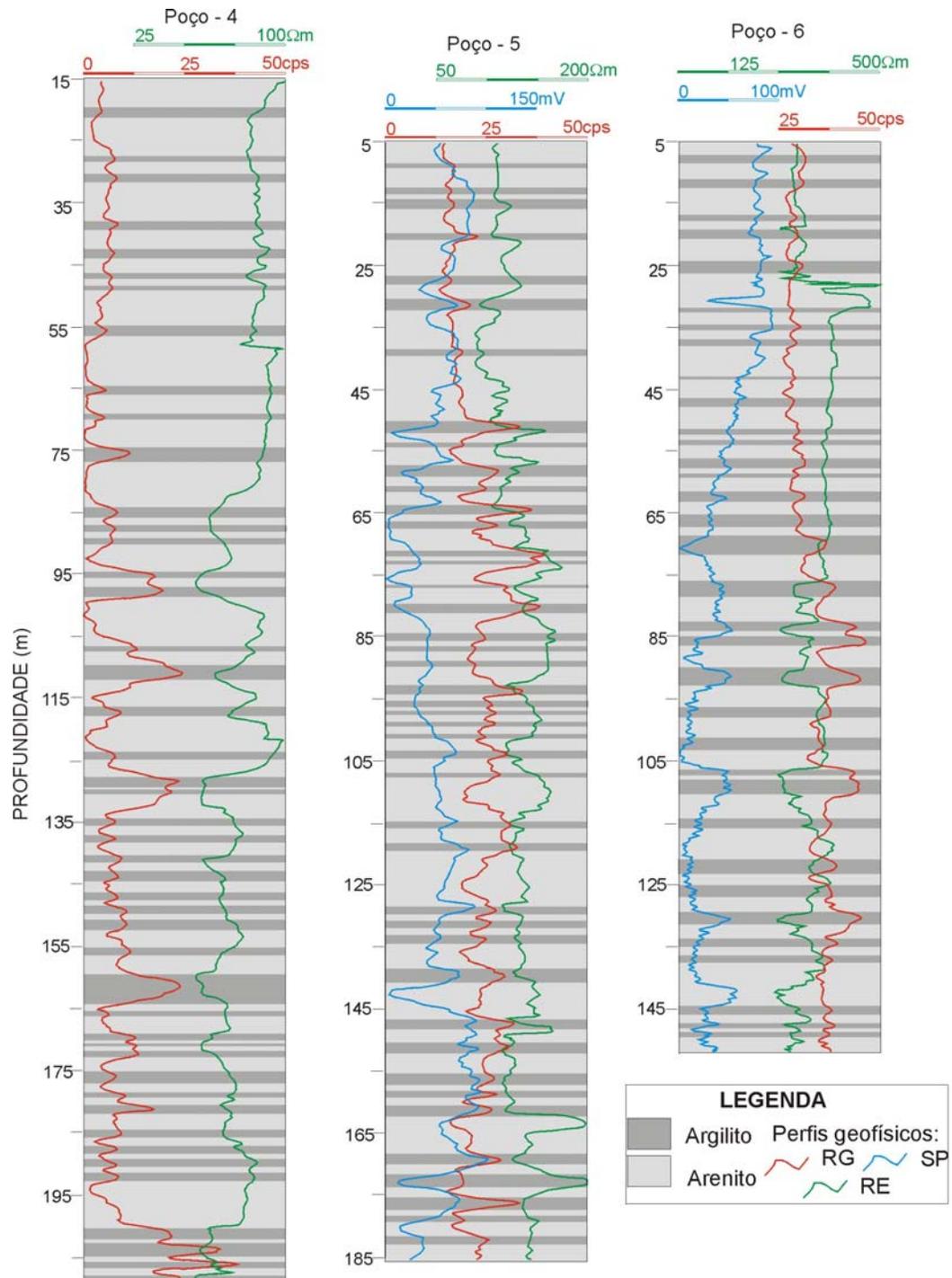


Figura 7B - Perfis geofísicos de poços. 4 Renato Souza Pinto. 5 e 6 Riacho Doce.

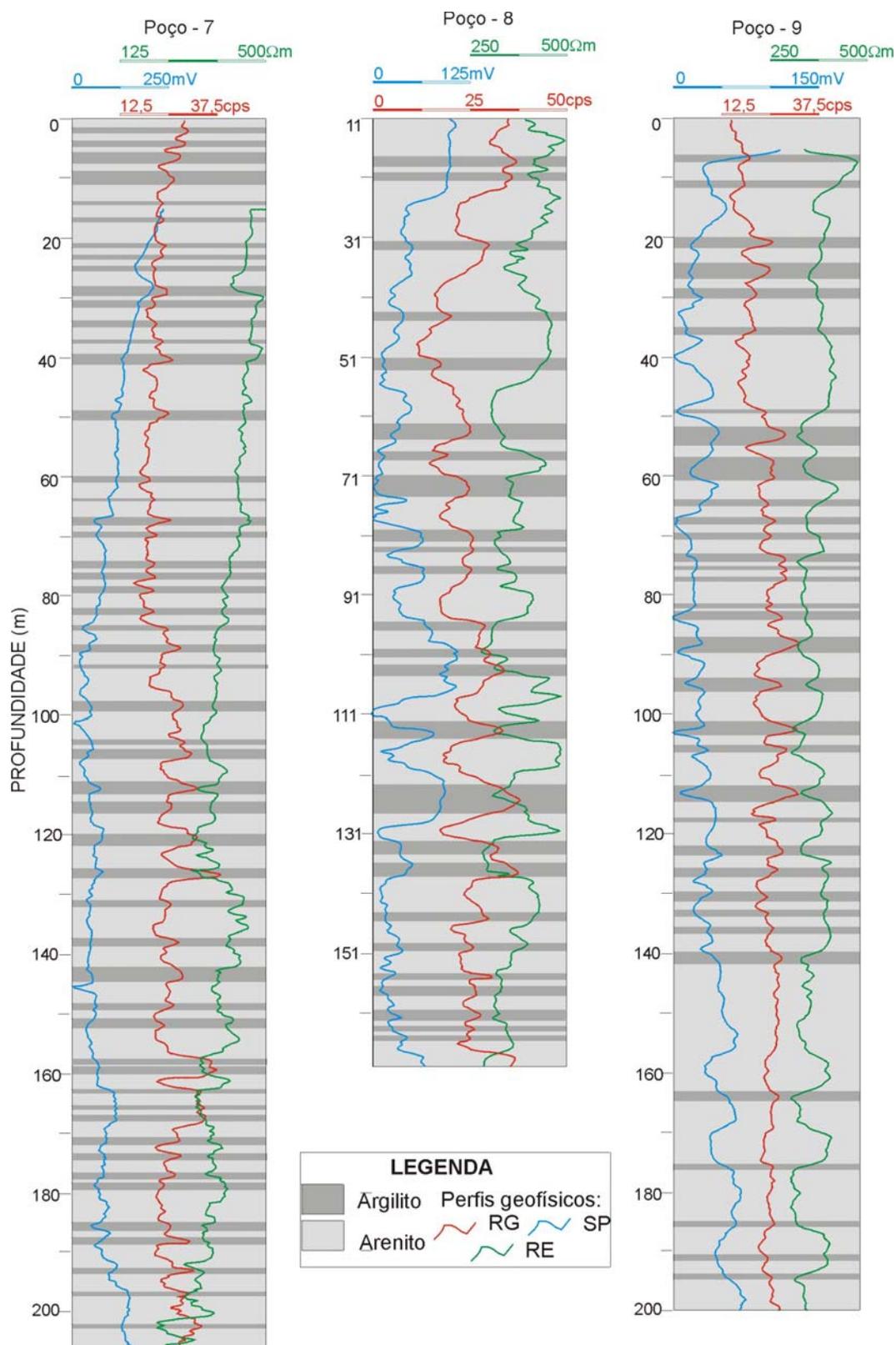


Figura 7C - Perfis geofísicos de poços. 7, 8 e 9 N. S. de Fátima.

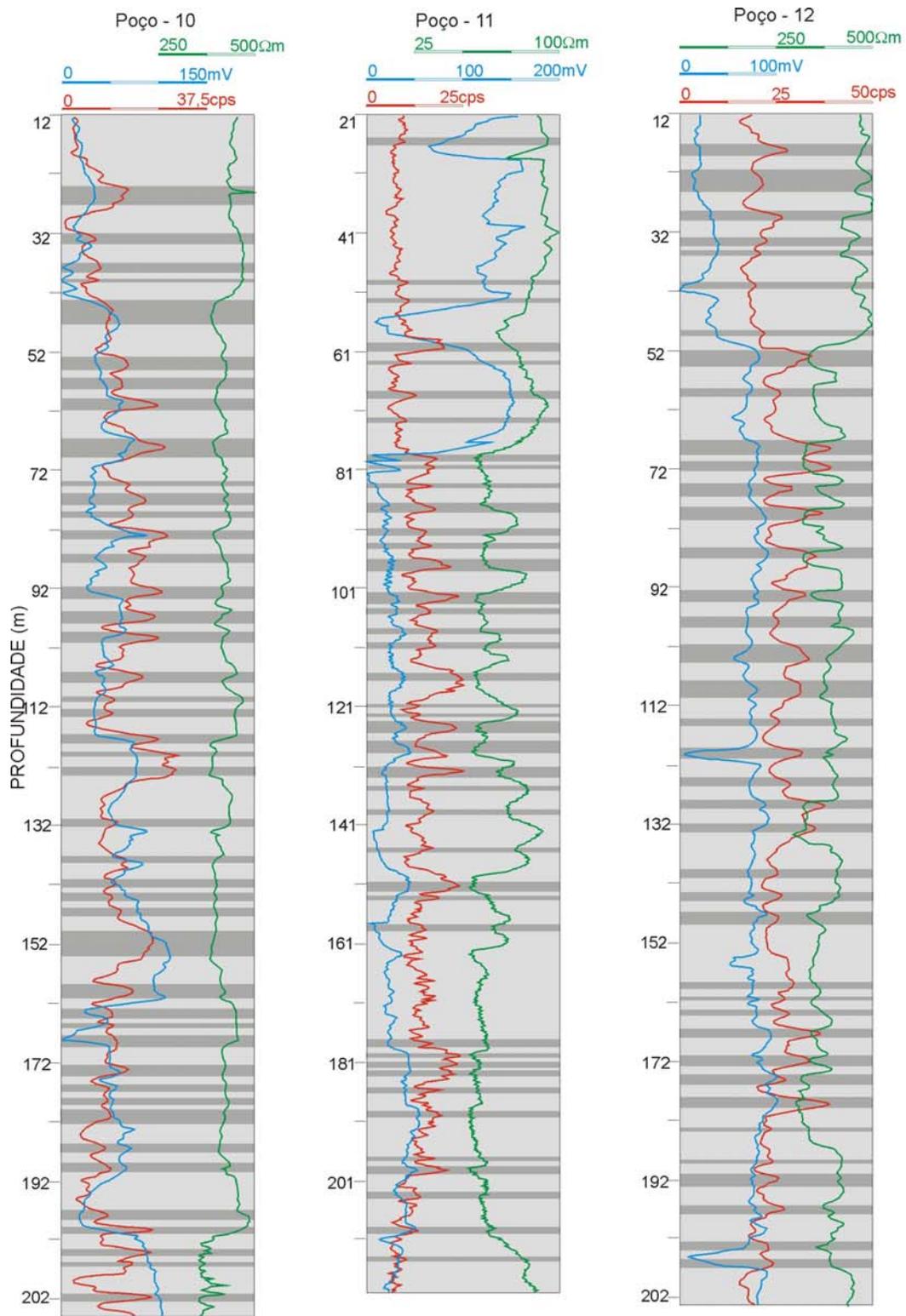


Figura 7D - Perfis geofísicos de poços.  
 10 e 11 Amazonino Mendes.  
 12 Jorge Teixeira.

**LEGENDA**

	Argilite	Perfis geofísicos:
	Arenite	 RG
		 SP
		 RE

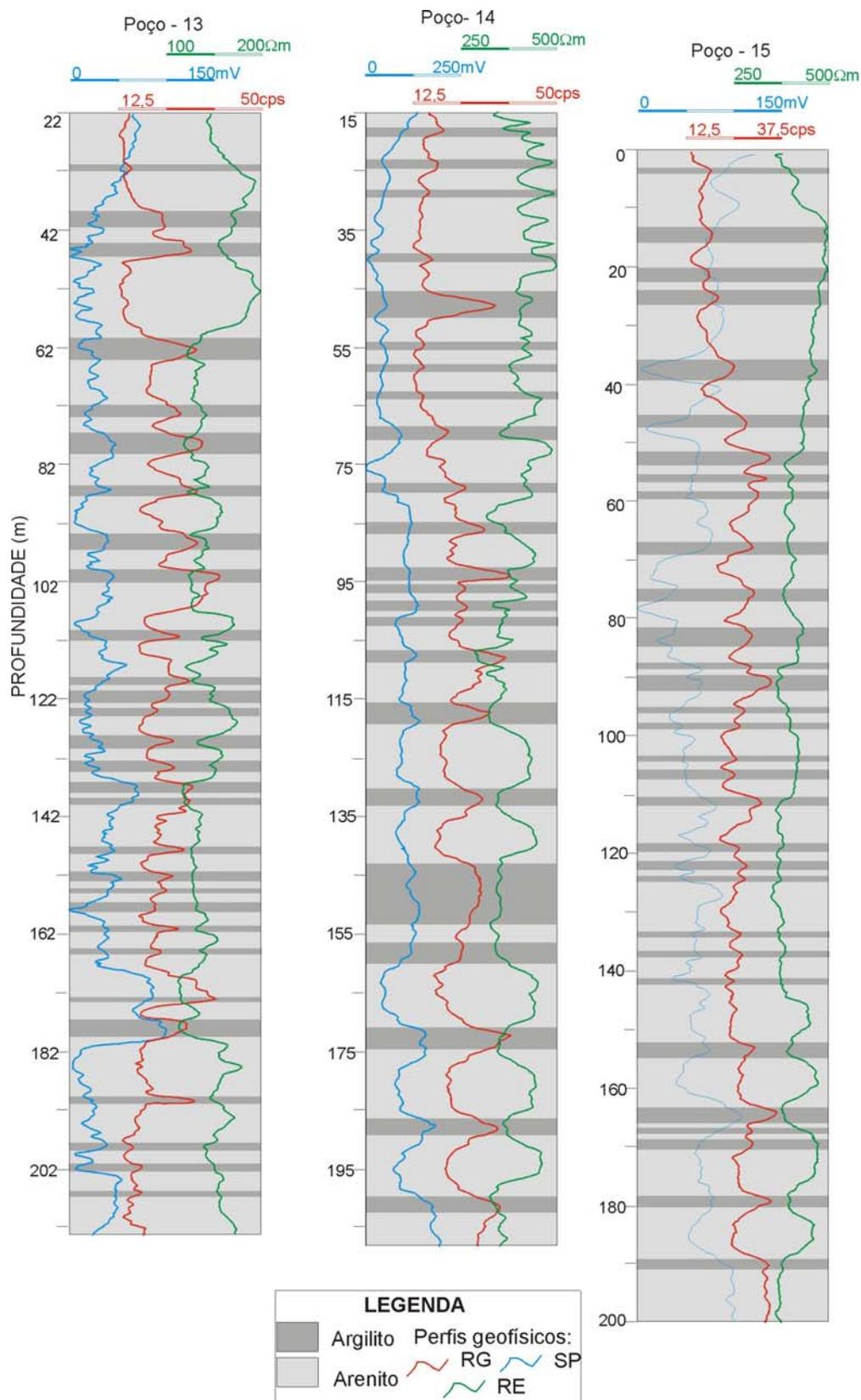


Figura 7E - Perfis geofísicos de poços. 13 S. José. 14 e 15 Zumbi.

## 5.2. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)

As 17 SEVs realizadas em Manaus com distância mínima entre os eletrodos de corrente igual a 8,4 m ( $AB/2 = 4,2$  m) e a máxima de 640 m ( $AB/2 = 320$  m) (Figura 8 e Anexo 1). A figura 8 exhibe a interpretação das SEVs, utilizando o programa ATO (Zohdy & Bisdorf, 1989).

É desejável que investigação por SEV deve ser feita em estações distribuídas de maneira regular na superfície. No entanto, para a sua realização no meio urbano tal premissa não ocorre, pois as ruas devem ser lineares por centenas de metros e não asfaltadas para cravar os eletrodos, com baixo fluxo de automóveis e pedestres para evitar que os cabos sejam partidos ou que alguém toque nos eletrodos quando da injeção de corrente. Estes fatores dificultaram o trabalho e contribuíram para que a malha estabelecida fosse irregular e limitassem as aberturas entre os eletrodos A e B, controladas pelas situações do local da sondagem na cidade.

Ressalta-se que o método de SEV não consegue separar camadas muito delgadas. Logo, o valor da resistividade aparente deve ser entendido como uma média dentro de um pacote que não é homogêneo. Se uma porção do terreno tem elevada resistividade, deve-se considerar que o pacote referido pode possuir não somente camadas de areia grossa, por exemplo, mas também de camadas finas de argila e até pelitos, porém estes em menores volumes. O contrário também pode ocorrer, ou seja, um pacote argiloso de resistividade baixa pode possuir camadas de areia e/ou seixo mais delgadas de alta resistividade. Salienta-se que na SEV, o valor de resistividade aparente é função das resistividades dos materiais, suas frações em volume e sua distribuição geométrica em subsuperfície, que influencia as medidas elétricas para uma determinada abertura e arranjo dos eletrodos.

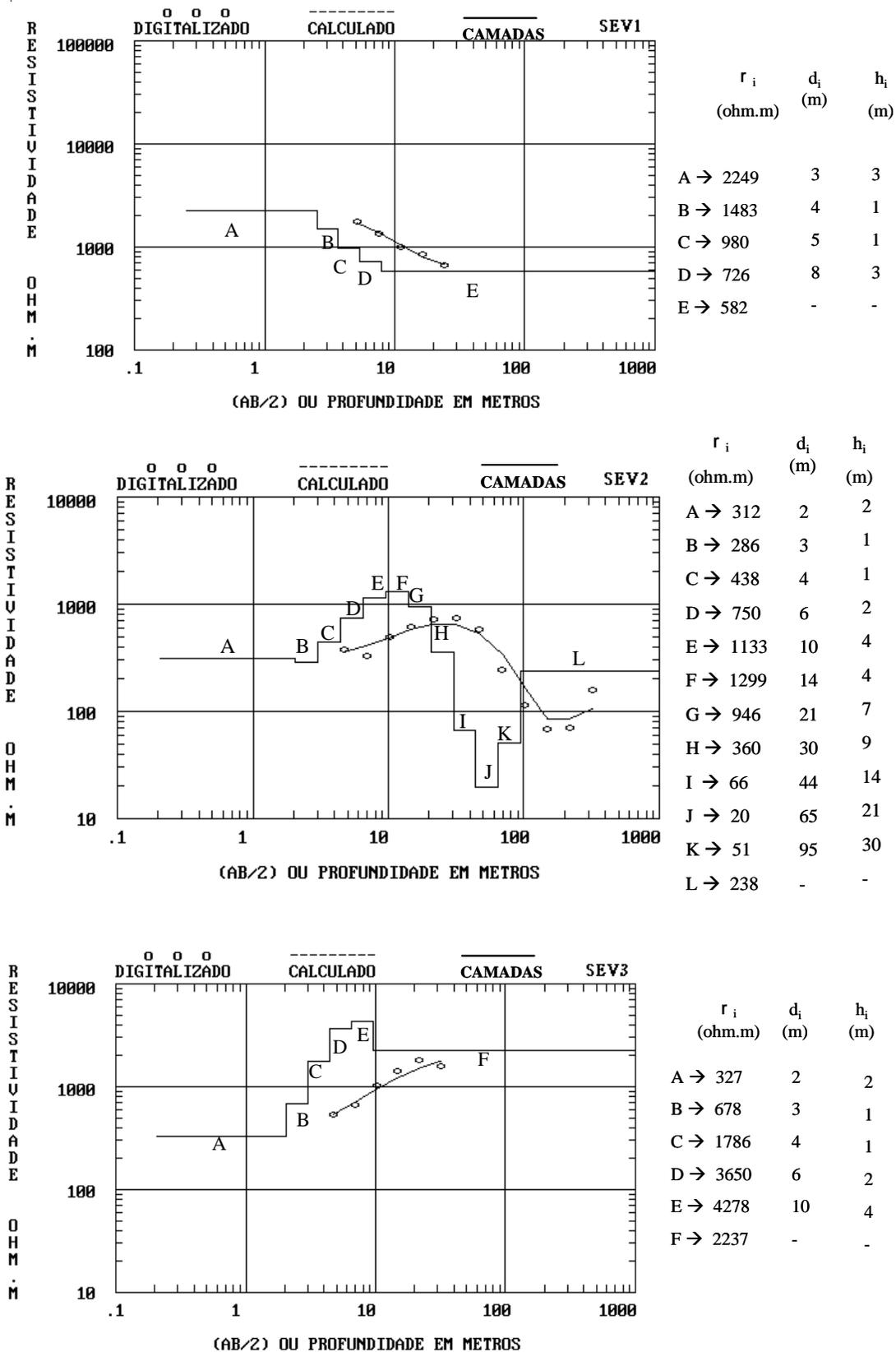


Figura 8 – Interpretação das SEVs.

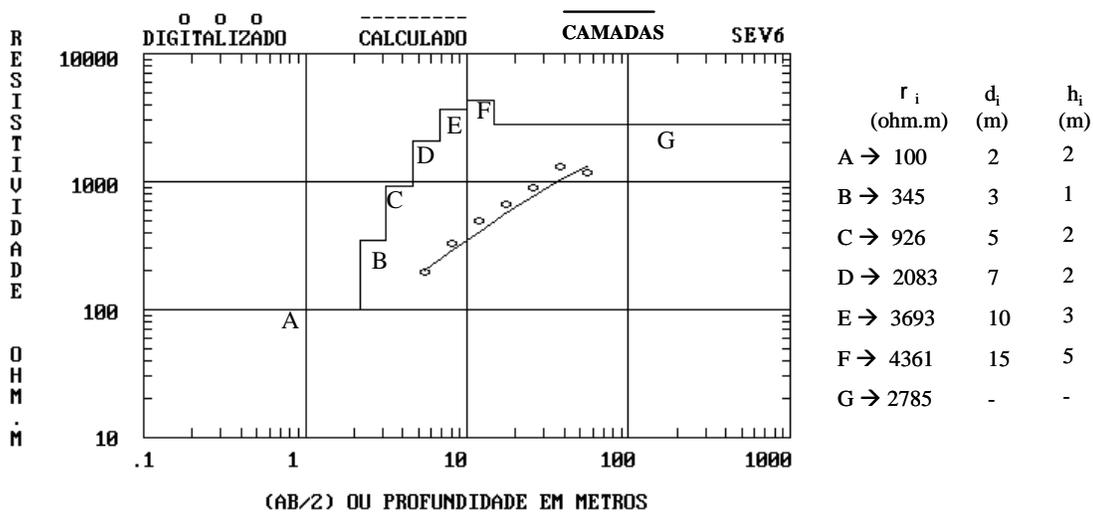
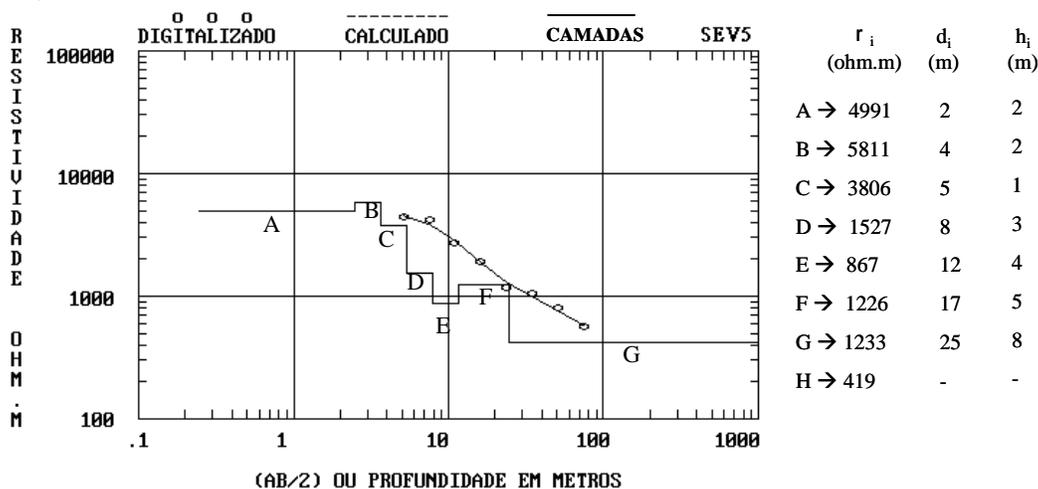
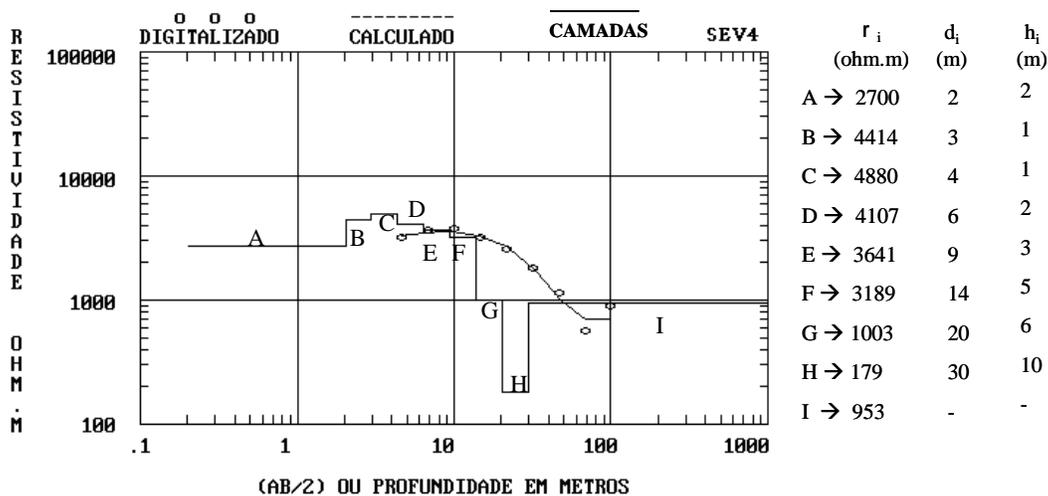


Figura 8 – Continuação

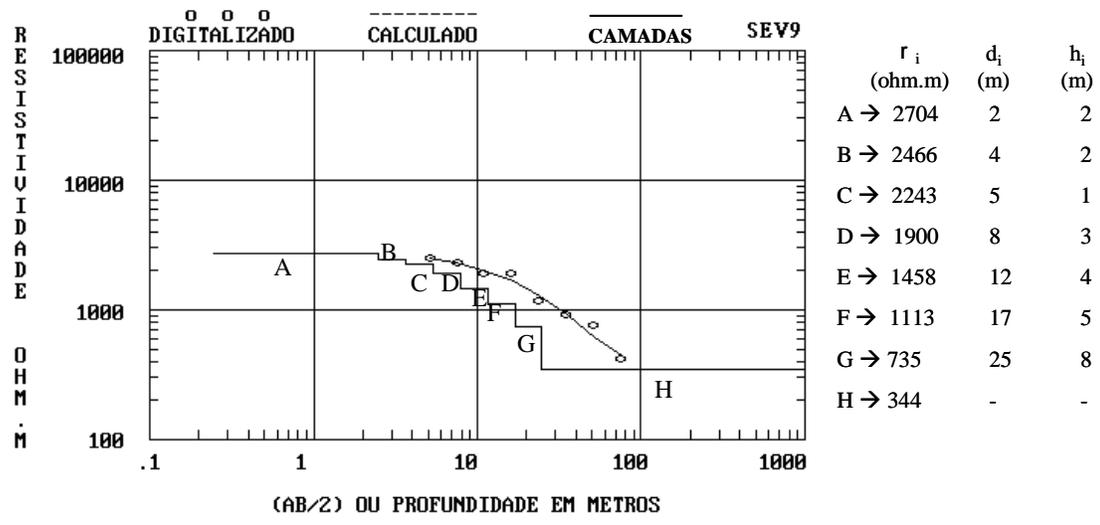
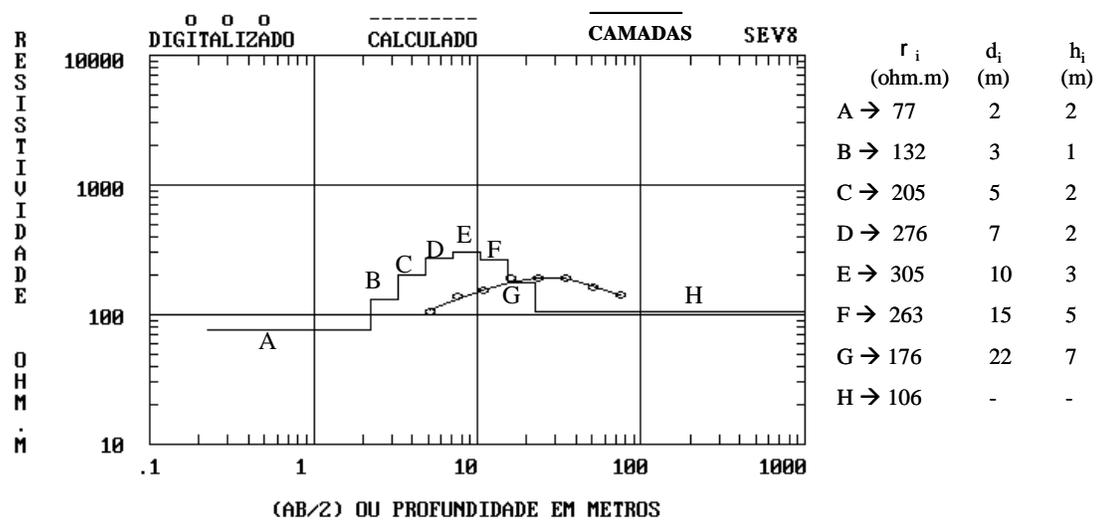
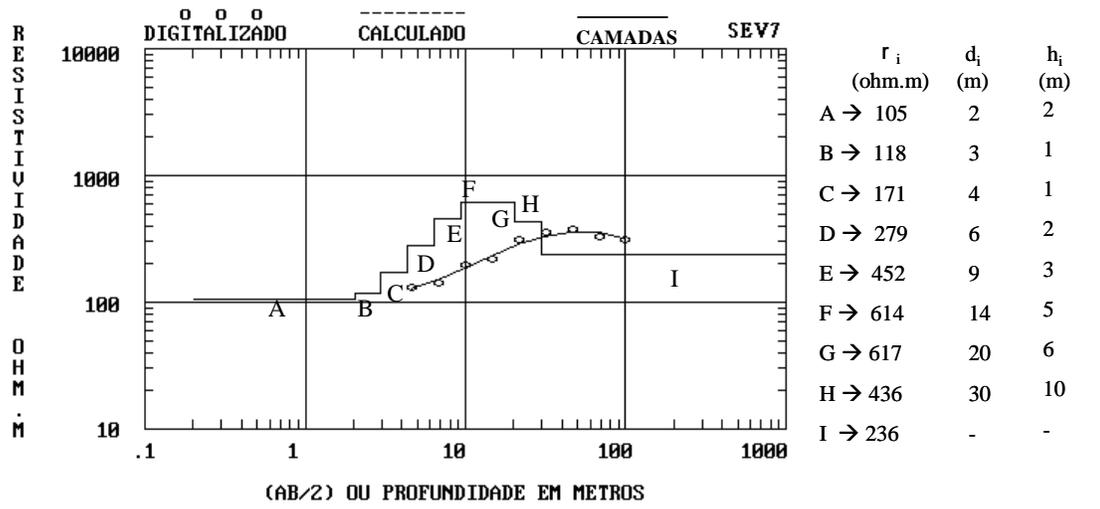


Figura 8 – Continuação

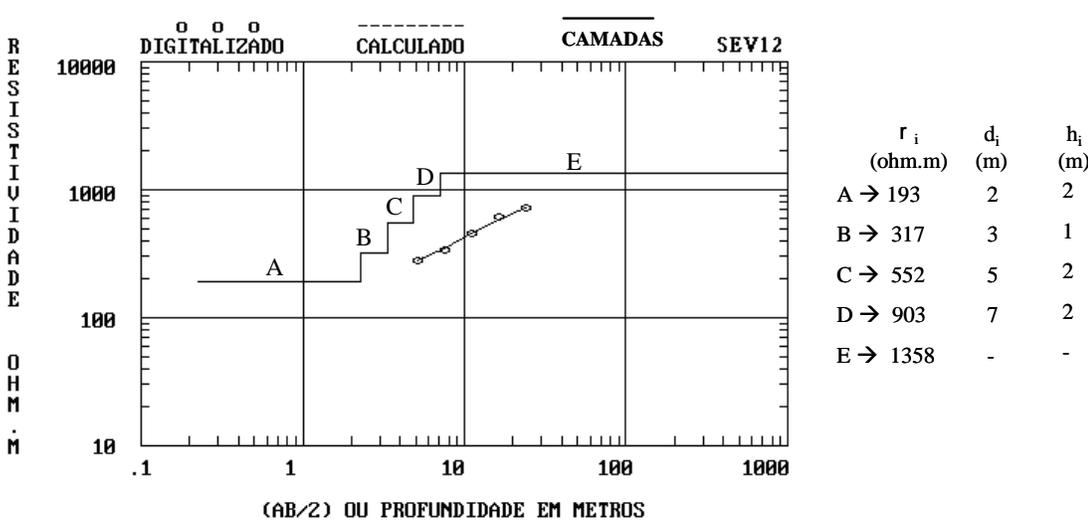
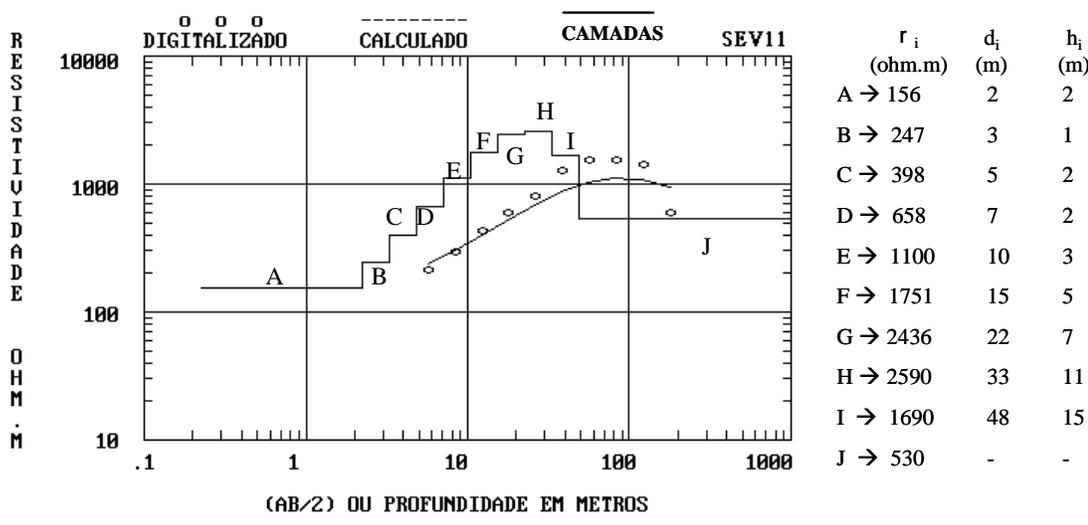
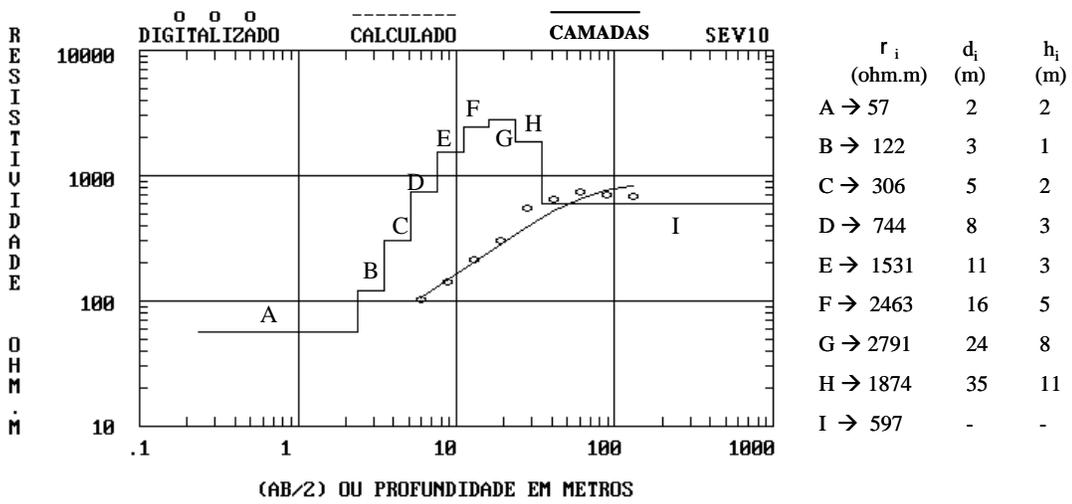


Figura 8 – Continuação.

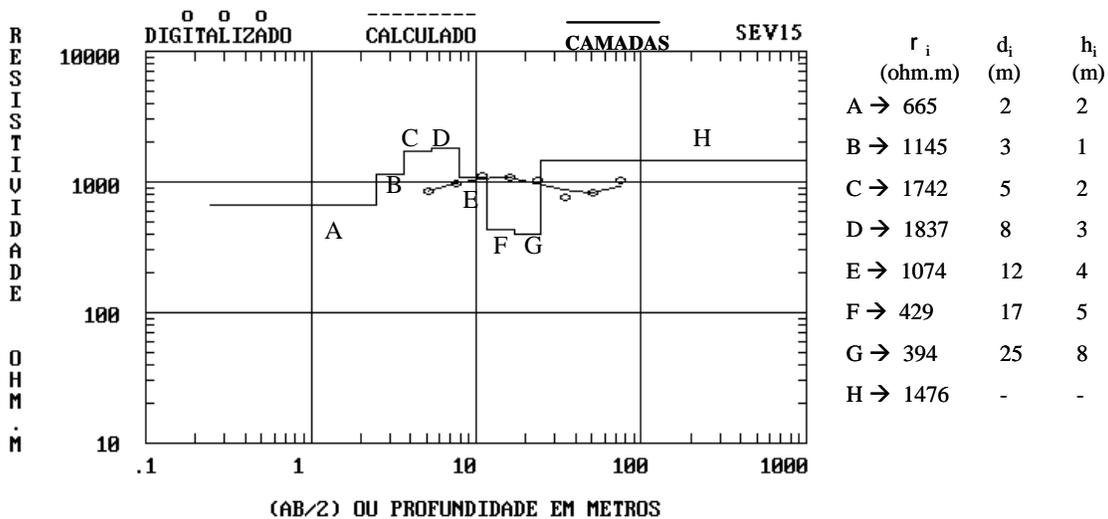
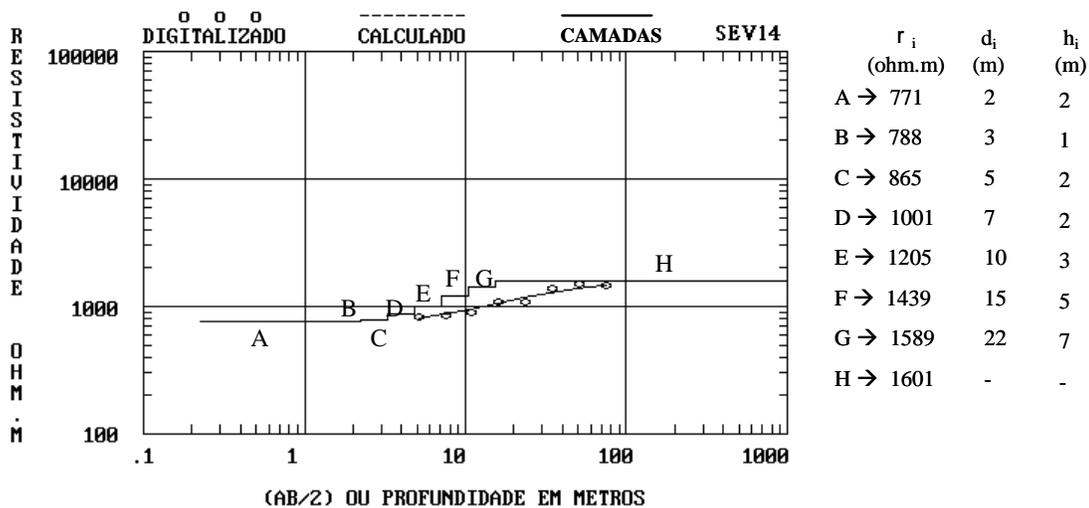
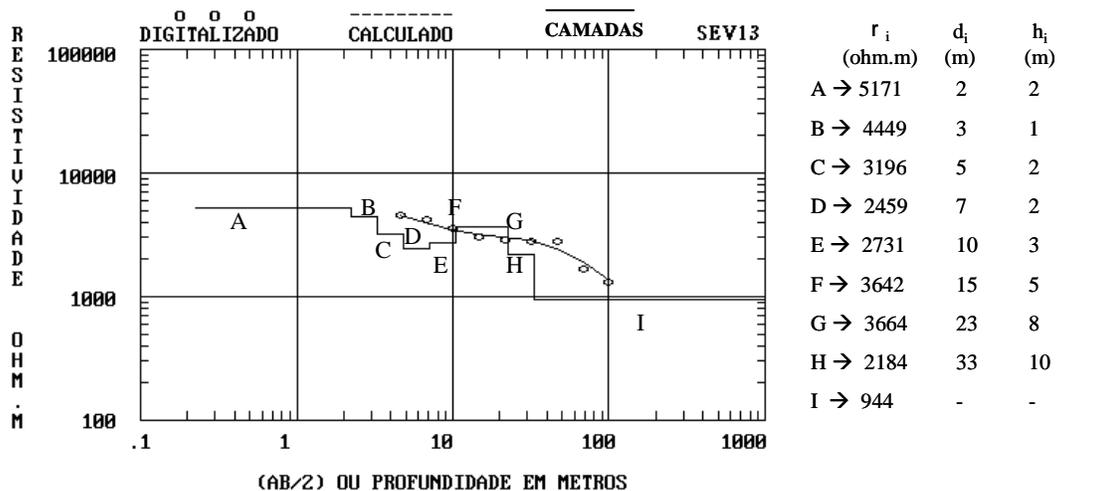
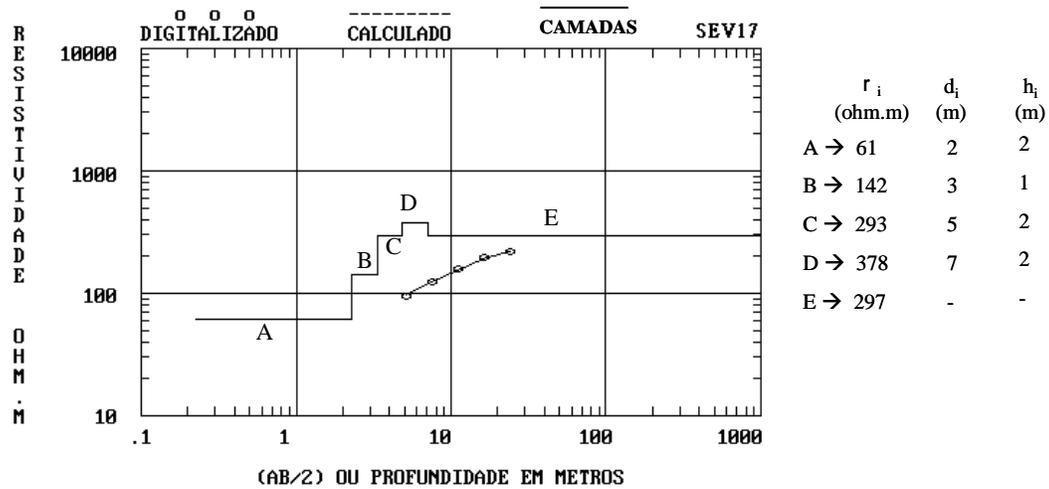
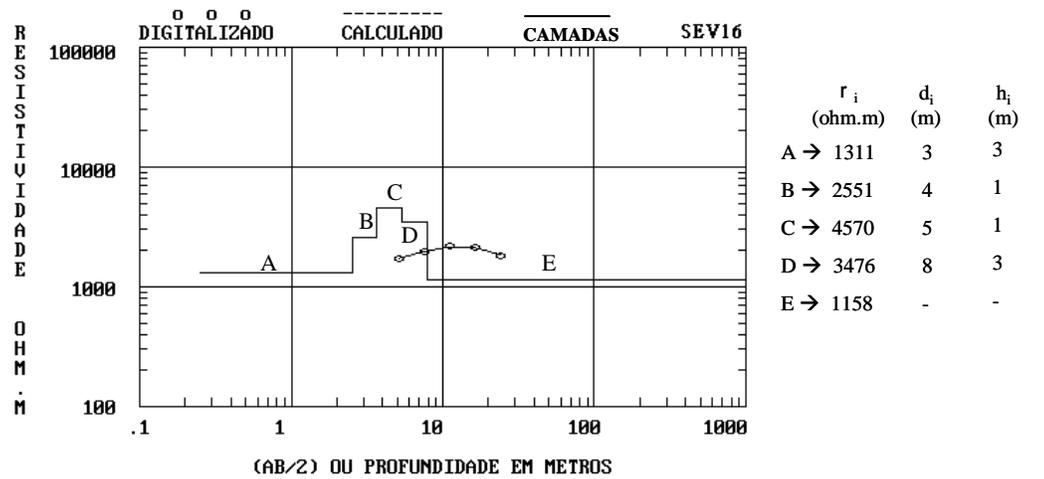


Figura 8 – Continuação.



Sendo:  $\rho_i$  – resistividade verdadeira;  $d_i$  – profundidade; e  $h_i$  – espessura. Todos estes parâmetros da camada geológica “i”.

Figura 8 – Interpretação das SEVs. Conclusão.

### 5.3. PERFIS LITOLÓGICOS DE AMOSTRAGEM DE CALHA

Nos perfis litológicos da figura 9A-C foram identificadas a princípio três tipos de rochas sedimentares: arenito e argilito (pertencentes à Formação Alter do Chão), e calcário (característico da Formação Nova Olinda). O topo destes perfis (em geral os 20 primeiros metros de profundidade) é caracterizado por material argiloso. De 20 m em diante até 200 m predomina material arenoso. O calcário está presente apenas no perfil do poço 4 (Col. S<sup>to</sup> Antônio) a profundidade superior a 200 m. Nota-se também, que o arenito em todos os perfis, exceto nos perfis dos poços 3 e 4 (ambos da Col. S<sup>to</sup> Antônio), apresenta-se a certas profundidades (p. e., superiores a 20 m e inferiores a 200 m) com intensa silicificação, podendo ser chamado de unidade informal “Arenito Manaus” (Aguiar *et al.*, 2002). Sabe-se que esta unidade funciona como uma rocha selante, onde os estratos subseqüentes podem ter potencialidade aquífera.

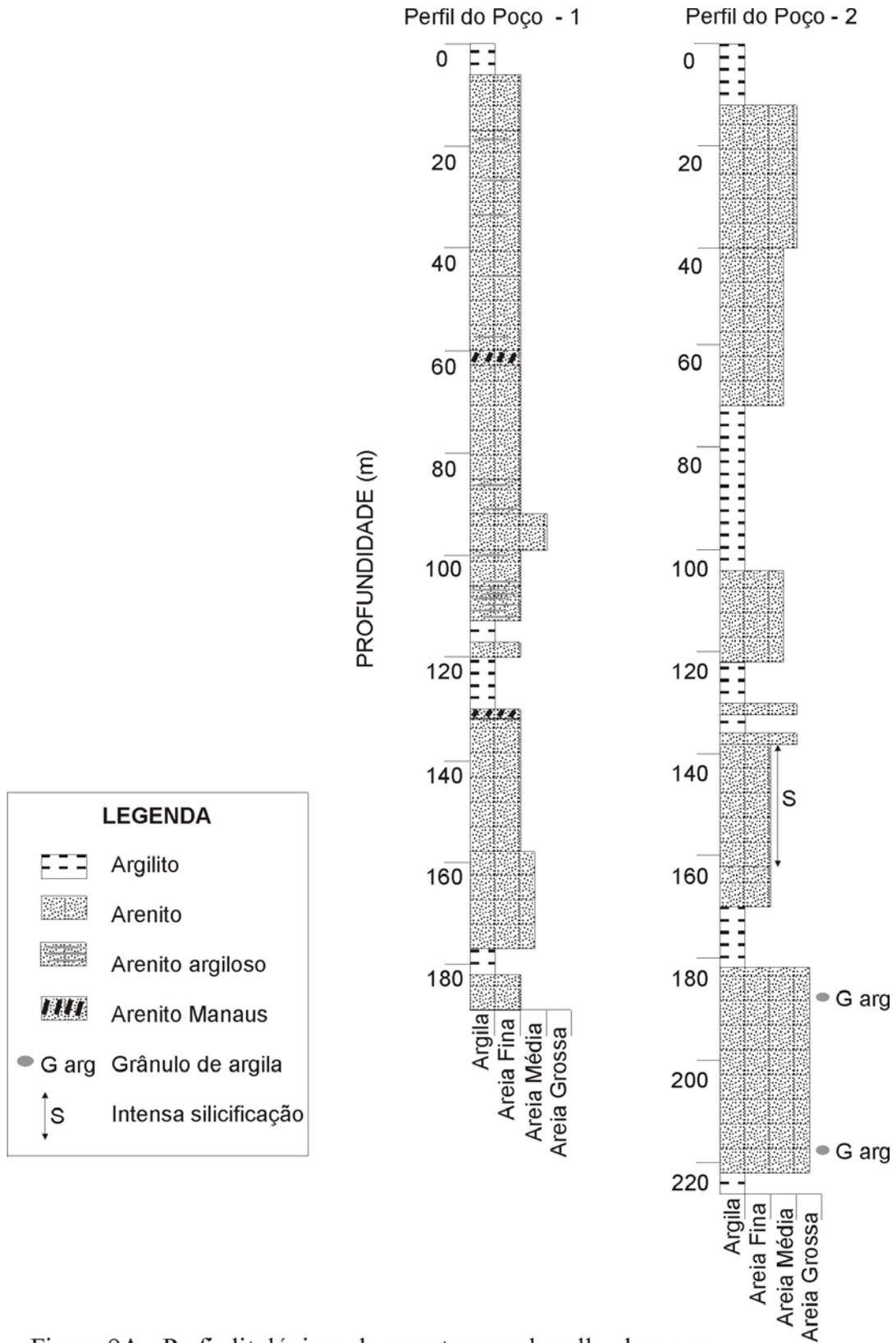


Figura 9A - Perfis litológicos de amostragem de calha de poços.  
1 e 2 - Est. Torquato Tapajós.

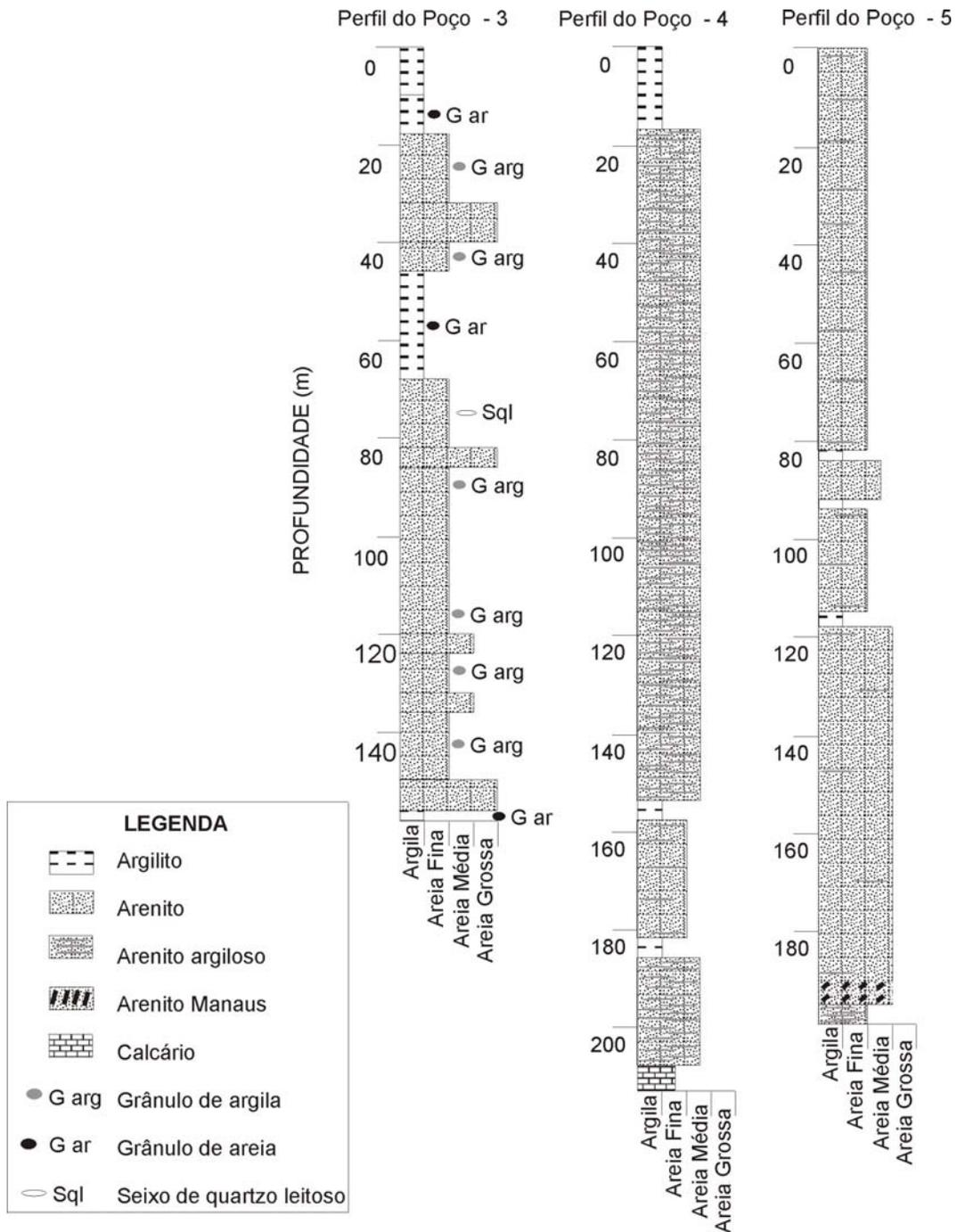


Figura 9B - Perfis litológicos de amostragem de calha dos poços.  
3 e 4 - Col. S<sup>te</sup> Antônio. 5 - Amazonino Mendes.



## 6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados na forma de seções geoeletricas (traduzidas na forma de seções hidrogeológicas) e sua associação com formações representando aquíferos (arenito) e aquícludes (argilito).

### 6.1. SEÇÕES HIDROGEOLOGICAS

As seções mostraram a continuidade vertical em profundidade dos tipos litológicos aflorantes característicos da Formação Alter do Chão, sendo estas traduzidas na forma de seções hidrogeológicas para a área (figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15). Estas seções não levaram em consideração a topografia, devido à preservação tabular do relevo (Aguiar *et al.*, 2002).

Todas as seções hidrogeológicas são caracterizadas por poços profundos (de 152 m a 249 m), podendo-se assim, melhor inferir a continuidade lateral dos corpos sedimentares em profundidade. É importante mencionar que, camadas geoeletricas de baixas resistividades podem ocorrer lado a lado com as de médias a altas resistividades em uma seção. Tal fato sugere que os estratos possuam continuidade lateral irregular, indicando interdigitação ou gradação lateral dos materiais, o que resultaria em resistividades variadas à mesma profundidade.

Na área de estudo das quatro fácies sedimentares descritas por Aguiar *et al.*, (2002) foram identificadas três (i. e., argilosa, areno-argilosa e arenosa) nas seções hidrogeológicas. Em termos gerais, considera-se que materiais pelíticos (argila/argilito), os quais são compostos por argilominerais, possuem resistividade variando de  $10^2 - 10^3 \Omega.m$ . Valores de  $10^3 - 10^5 \Omega.m$  referem-se a areia, grânulo, seixo, em geral, de quartzo. No entanto,

esses valores não são fixos, pois dependem do contexto geológico da área estudada. Ou ainda, resultem do caráter climático no momento da coleta de dados, ou seja, sondagens realizadas em dias extremamente secos e/ou posteriores aos de chuvas, pois em materiais argilosos muito secos as resistividades resultantes são elevadas.

A seção AA' (Figura 10) está posicionada na porção oeste atravessando a área na direção NNW-SSE, perpendicularmente a Bacia do Tarumã-Açú (ver Figura 1). É constituída pelas PGP's (1, 2 e 3) e SEV's (1, 2, 3, 4, 5 e 16). Apresenta uma elevada continuidade lateral dos estratos, onde os primeiros 40 m de profundidade são marcados pelo amplo predomínio de material arenoso com presença pontual de corpos argilosos, estes de espessura e extensão em torno de 3 m e 4 km, respectivamente. De 40 m a 250 m há intercalação areia e argila. Os pontos A e A' (i. e., extremidade NNW e SSE da seção) são caracterizados pelo constante intercamamento argiloso e arenoso, principalmente, sugerindo uma interdigitação ou gradação lateral dos materiais.

Na seção BB' (Figura 11) a área de estudo é cortada no sentido E-W, paralelamente a Bacia do Tarumã-Açú (ver Figura 1). É formada pelas PGP's (1, 4, 5 e 12) e SEV's (4, 5, 8, 11, 13 e 14). Caracteriza-se por uma alta correlação dos estratos por vários metros de profundidade, sendo que nos 30 m iniciais predomina material arenoso com pontuais corpos argilosos, estes com espessura aproximada de 6 m e extensão em torno de 5 km. Dos 30 m em diante até em torno de 230 m há intercalação de areia e argila. Nos extremos desta seção (i. e., pontos B e B') há um elevado intercamamento argiloso e arenoso, indicando interdigitação ou gradação lateral de materiais. Nestas extremidades a proporção de zonas argilosa e arenosa é igual.

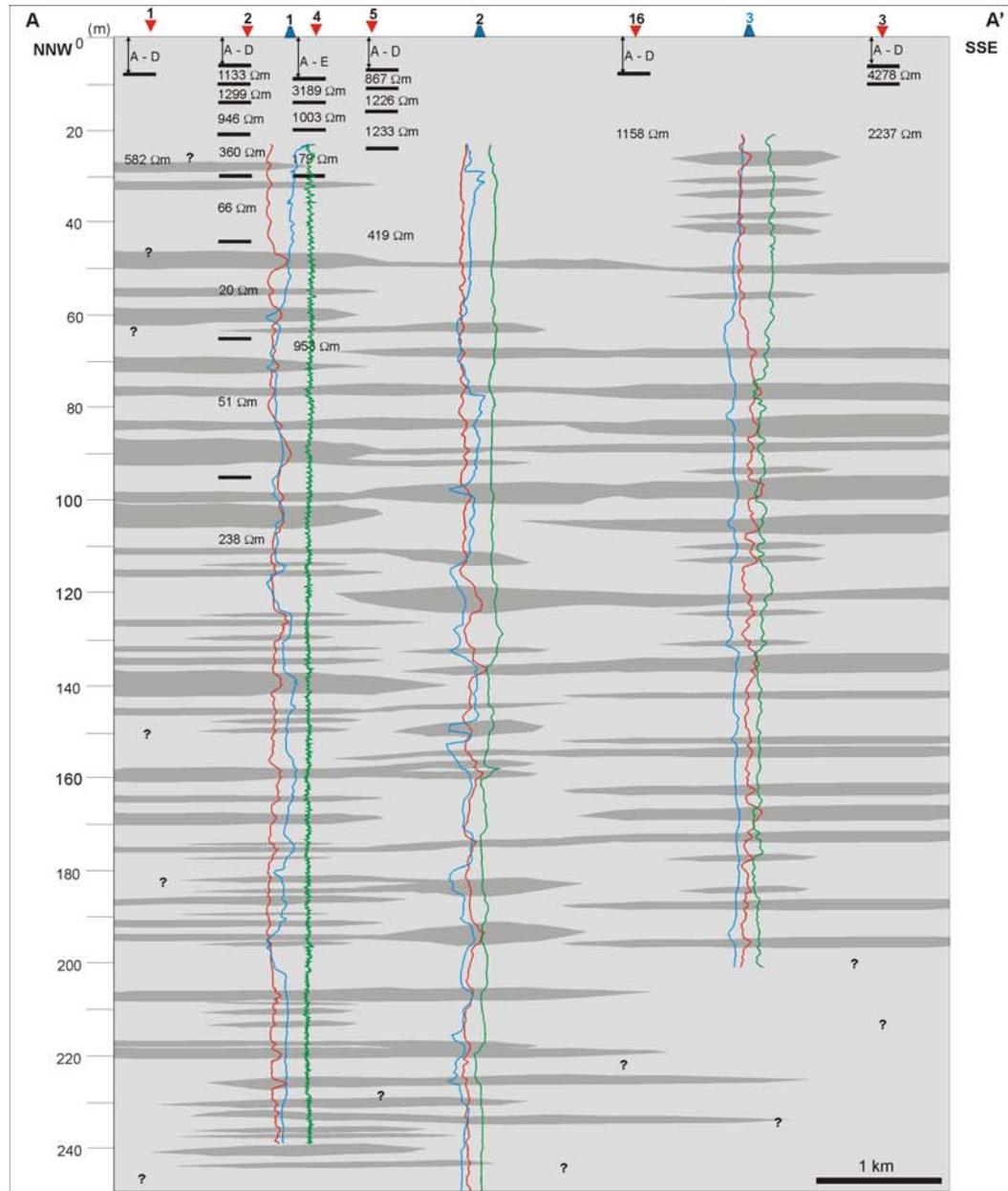
A seção CC' (Figura 12) posiciona-se na porção centro-sul atravessando a área na direção SW-NE, perpendicular e paralelamente as bacias do Igarapé de S. Raimundo e de Educandos, respectivamente (ver Figura 1). Fazendo parte as PGP's (8, 10 e 11) e SEV's (7, 9, 10 e 12). Nela os estratos são bem correlacionáveis, sendo que próximo à superfície, em torno de 5 m de profundidade, o material predominante é a argila. Dos 5 m em diante até quase 50 m de profundidade, o material predominante é a areia com rara presença de corpos argilosos, os quais possuem espessura e extensão em torno de 3 m e 3,5 km, respectivamente. A partir de 50 m até 210 m há intercalação areia e argila. Nas proximidades de C e C' (i. e., região NE e SW da seção, respectivamente) ocorre um moderado intercamamento argiloso e arenoso, esta situação pode sugerir uma interdigitação ou gradação lateral de materiais. A proporção de zonas argilosas e arenosas nestas extremidades é similar a seção BB'.

A seção DD' (Figura 13) corta a área no sentido N-S, perpendicularmente as bacias do Igarapé de S. Raimundo e de Educandos (ver Figura 1). É composta pelas PGP's (5, 6, 7, 8, 10, 13 e 14) e SEV's (12, 13 e 17). Apresenta uma elevada continuidade lateral dos estratos ao longo de vários metros de profundidade, onde os 5 primeiros metros predomina material argiloso. De 5 m em diante até em torno de 210 m de profundidade marcados pelo amplo predomínio dos corpos arenosos com intercalações por argila, estas com espessura de quase 12 m e extensão em torno de 4 km.

Na seção EE' (Figura 14) a área estudada é cortada no sentido SWW-NEE posicionada na porção centro-oeste, perpendicularmente a Bacia Tarumã-Açú (ver Figura 1). É constituída das PGP's (6 e 12) e SEV's (6, 8, 14, 15 e 16). Os estratos apresentam baixa correlação ao longo dos quase 200 m de profundidade, sendo a areia o material predominante com presença moderada de corpos argilosos, estes com espessura de 1 m a 5 m e extensão de 1

km a 8 km. No ponto E' da seção (i. e., extremidade NEE) ocorre um intenso intercamamento de argila e areia, podendo indicar interdigitação ou gradação lateral destes materiais. Já nas proximidades de C (i., extremo SWW) predominam zonas mais arenosas do que argilosas.

A seção FF' (Figura 15) atravessa a área na direção NNW-SSE, mas um pouco mais ao centro desta, perpendicularmente a Bacia do Igarapé de S. Raimundo (ver Figura 1). É formada pelas PGPs (4, 13 e 14) e SEVs (10, 11, 12 e 15). Apresenta uma mediana correlação dos estratos. Nos 5 m iniciais de profundidade há predominância de argila. A partir dos 5 m em diante até 220 m já predomina areia com presença de corpos argilosos, estes com espessura em torno de 9 m e extensão de quase 9 km.

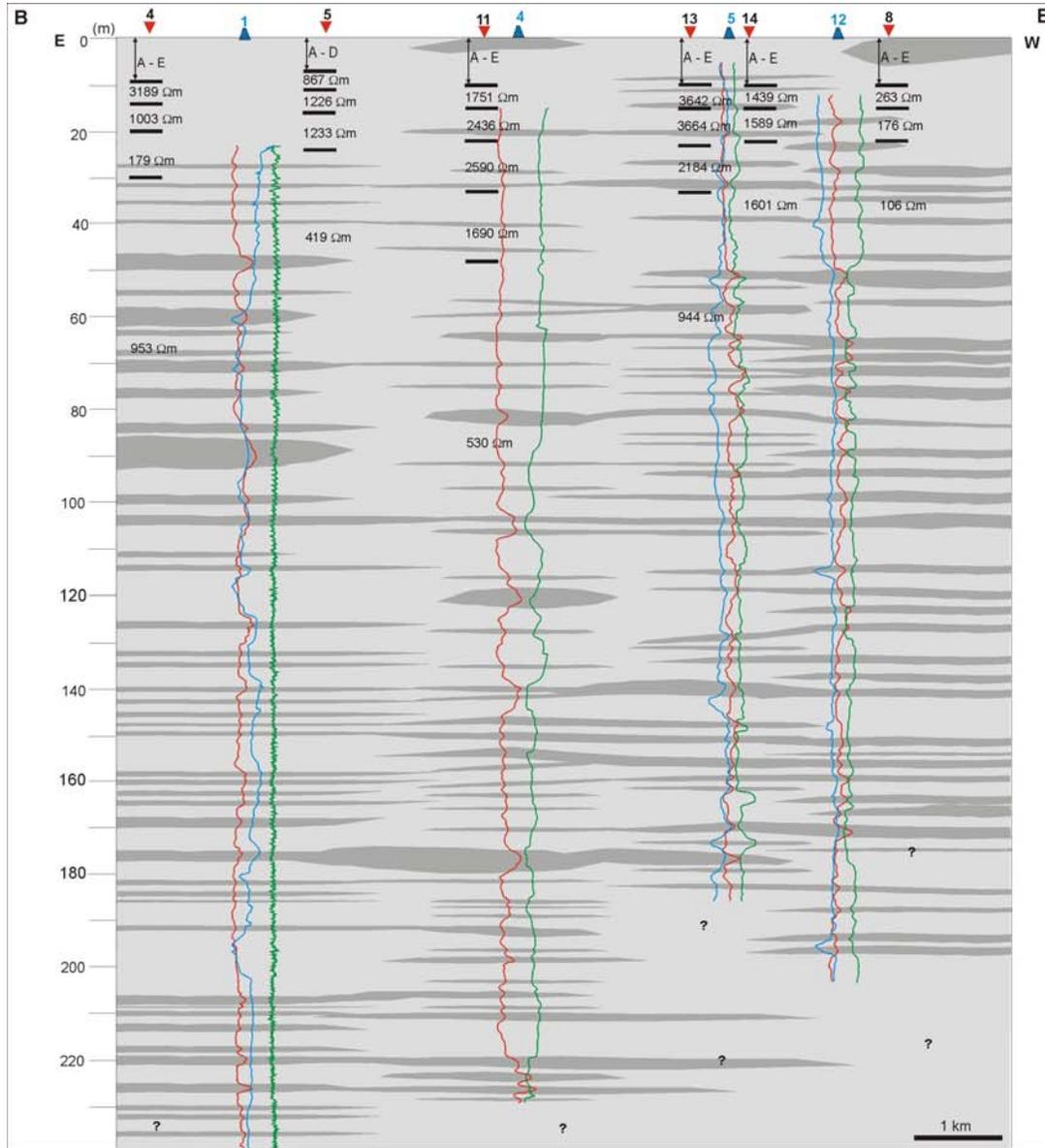


	SEV1		SEV2		SEV3		SEV4		SEV5	
	$\rho_i$	$h_i$								
A	2249	3	312	2	327	2	2700	2	4991	2
B	1483	1	286	1	678	1	4414	1	5811	2
C	980	1	438	1	1786	1	4880	1	3806	1
D	726	3	750	2	3650	2	4107	2	1527	3
E	582	-	1133	4	4278	4	3641	3	867	4
F			1299	4	2237	-	3189	5	1226	5
G			946	7			1003	6	1233	8
H			360	9			179	10	419	-
I			66	14			953	-		
J			20	21						
K			51	30						
L			238	-						

$\rho_i$  ( $\Omega m.m$ ) e  $h_i$  (m)



Figura 10 - Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção transversal AA'.



	SEV4		SEV5		SEV8		SEV11		SEV13		SEV14	
	$\rho_i$	$h_i$										
A	2700	2	4991	2	77	2	156	2	5171	2	771	2
B	4414	1	5811	2	132	1	247	1	4449	1	788	1
C	4880	1	3806	1	205	2	398	2	3196	2	865	2
D	4107	2	1527	3	276	2	658	2	2459	2	1001	2
E	3641	3	867	4	305	3	1100	3	2731	3	1205	3
F	3189	5	1226	5	263	5	1751	5	3642	5	1439	5
G	1003	6	1233	8	176	7	2436	7	3664	8	1589	7
H	179	10	419	-	106	-	2590	11	2184	10	1601	-
I	953	-					1690	15	944	-		
J							530	-				

$\rho_i$  ( $\Omega m.m$ ) e  $h_i$  (m)

**LEGENDA**

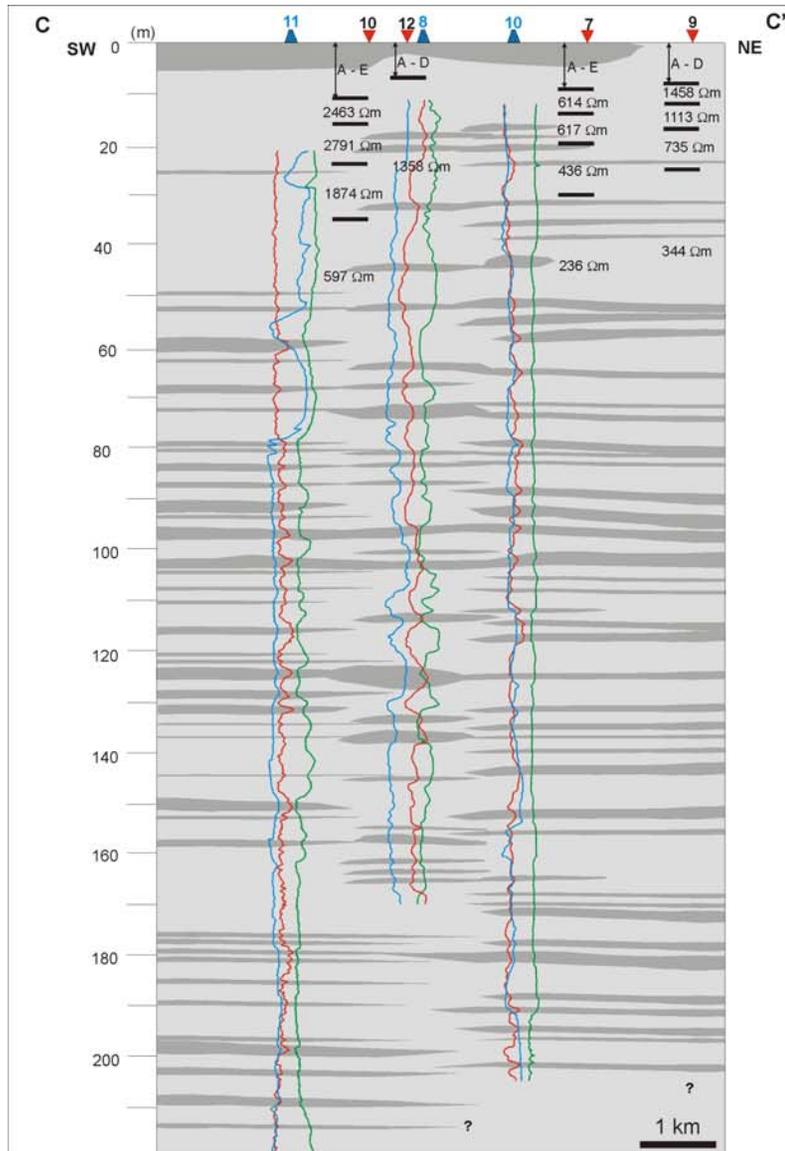
Perfis de geofísica:  
 SP RE  
 RG

Poços com dados geofísicos

SEV

Aquiclude (argilito)  
 Aquifero (arenito)

Figura 11 - Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção transversal BB'.

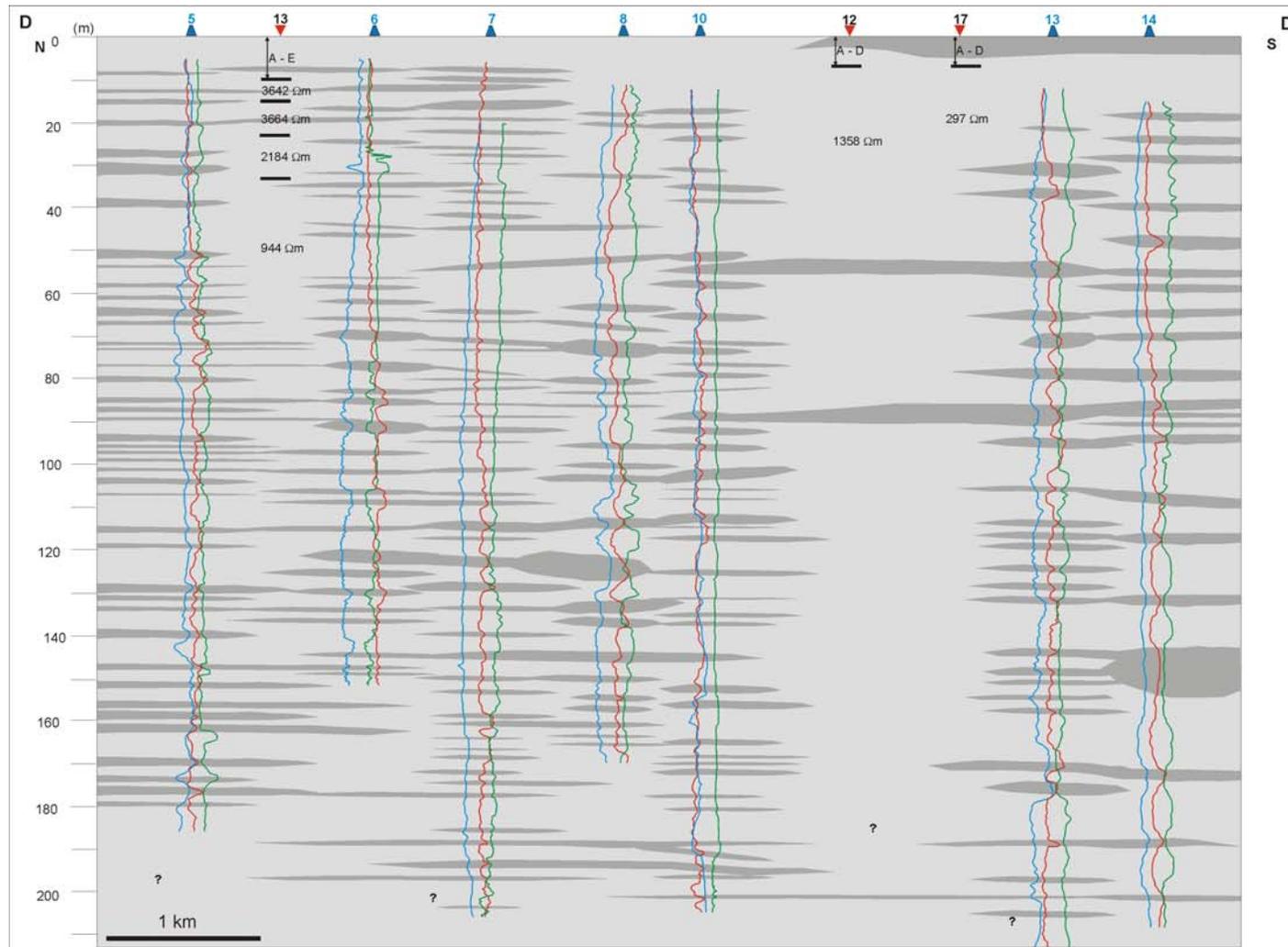


	SEV7		SEV9		SEV10		SEV12	
	$\rho_i$	$h_i$	$\rho_i$	$h_i$	$\rho_i$	$h_i$	$\rho_i$	$h_i$
A	105	2	2704	2	57	2	193	2
B	118	1	2466	2	122	1	317	1
C	171	1	2243	1	306	2	552	2
D	279	2	1900	3	744	3	903	2
E	452	3	1458	4	1531	3	1358	-
F	614	5	1113	5	2463	5		
G	617	6	735	8	2791	8		
H	436	10	344	-	1874	11		
I	236	-			597	-		

$\rho_i$  ( $\Omega m.m$ ) e  $h_i$  (m)



Figura 12 - Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção transversal CC'.



	SEV12		SEV13		SEV17	
	$\rho_s$	$h_s$	$\rho_s$	$h_s$	$\rho_s$	$h_s$
A	193	2	5171	2	61	2
B	317	1	4449	1	142	1
C	552	2	3196	2	293	2
D	903	2	2459	2	378	2
E	1358	-	2731	3	297	-
F			3642	5		
G			3664	8		
H			2184	10		
I			944	-		

$\rho_s$  (Qm.m) e  $h_s$  (m)

**LEGENDA**

Perfis de geofísica:  
 SP (blue line) RE (green line)  
 RG (red line)

▲ Poços com dados geofísicos

▼ SEV

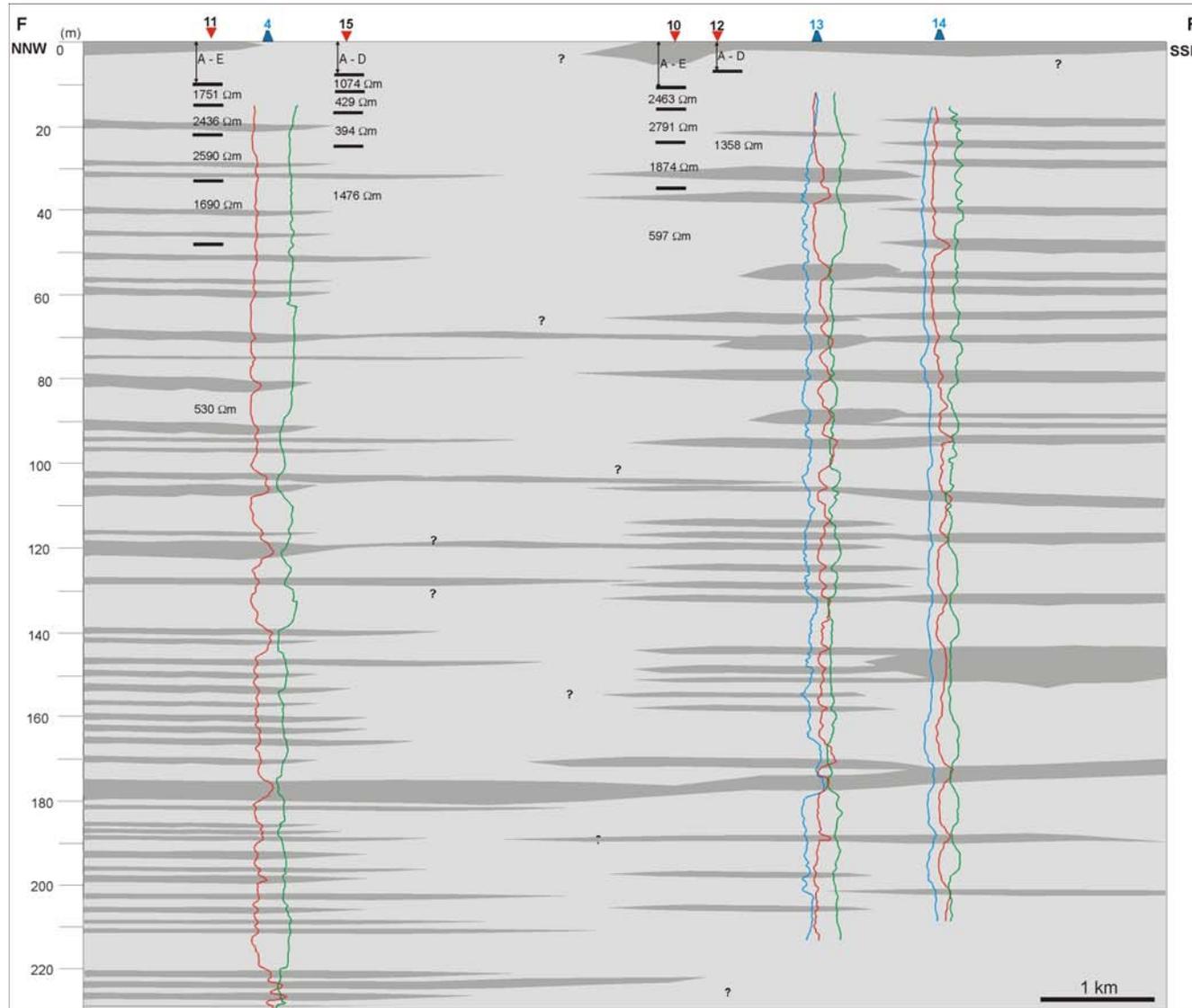
■ Argilite (argillite)

□ Aquífero (arenito)

Figura 13 - Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção transversal DD'.



Figura 14 - Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção transversal EE'.



	SEV10		SEV11		SEV12		SEV15	
	$\rho_i$	$h_i$	$\rho_i$	$h_i$	$\rho_i$	$h_i$	$\rho_i$	$h_i$
A	57	2	156	2	193	2	665	2
B	122	1	247	1	317	1	1145	1
C	306	2	398	2	552	2	1742	2
D	744	3	658	2	903	2	1837	3
E	1531	3	1100	3	1358	-	1074	4
F	2463	5	1751	5			429	5
G	2791	8	2436	7			394	8
H	1874	11	2590	11			1476	-
I	597	-	1690	15				
J			530	-				

$\rho_i$  (Ωm.m) e  $h_i$  (m)

**LEGENDA**

Perfis de geofísica:  
 SP RE  
 RG

▲ Poços com dados geofísicos

▼ SEV

■ Aqüicluda (argilito)  
 □ Aqüífero (arenito)

Figura 15 - Seção hidrogeológica inferida baseada nos dados geofísicos. Seção transversal FF'.

## 6.2. RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS GEOELÉTRICOS E HIDROGEOLÓGICOS

Os caracteres geoeletricos estão relacionados às propriedades hidrodinâmicas dos aquíferos, devido à analogia entre o fluxo de água e o de corrente, que se dá pelo mesmo caminho. Tal fato é bem explicado comparando as leis de *Ohm* e de *Darcy*, respectivamente.

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (8)$$

$$V = K \cdot i \quad (9)$$

Sendo:

Densidade	Condutividade	Gradiente
$\vec{J} \Rightarrow$ de corrente (A/m <sup>2</sup> )	$\sigma \Rightarrow$ elétrica (S/m)	$\vec{E} \Rightarrow$ campo elétrico (V/m)
$V \Rightarrow$ de descarga (m/s)	$K \Rightarrow$ hidráulica (m/s)	$i \Rightarrow$ hidráulico (m/km)

Através desta comparação podemos, relacionar os parâmetros geoeletricos resistência transversal (R) e condutância longitudinal (S) a um dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos, a transmissividade. Transmissividade (m<sup>2</sup>/s), por sua vez, indica a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero, ou seja, é a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. Em um aquífero, baixos valores de S e altos R definem as zonas mais transmissivas do sistema. Por outro lado, baixos R e S elevados representam zonas mais argilosas e, logo, menos permeáveis do sistema. Em aquíferos confinados, a transmissividade é dada por:

$$T = K \cdot h \quad (10)$$

Em que: K é a condutividade hidráulica (m/s) e h a espessura do aquífero (m).

A condutividade hidráulica, também vista na Lei de *Darcy*, é uma característica intrínseca do aquífero e depende da porosidade, tamanho, distribuição e forma das partículas. Por outro lado, a resistência transversal e condutância longitudinal para uma seção geométrica prismática de área igual a  $1 \text{ m}^2$  e constituída por  $n$  camadas, cada uma caracterizada por resistividade  $\rho_i$  e espessura  $h_i$ , são calculadas por:

$$R = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \quad (11)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (12)$$

Sendo:  $h_i$  – espessura da camada geométrica da camada “i” (em m);  $\rho_i$  – resistividade verdadeira da camada geométrica da camada “i” (em  $\Omega \cdot \text{m}$ );  $R$  – resistência transversal (em ohm) e  $S$  – condutância longitudinal (em *siemens*) de todas as camadas de uma seção.

Sri Niwas & Singhal (1981) relacionaram analiticamente a transmissividade ( $T$ ) e resistência transversal ( $R$ ) dada na equação (11), usando dados de Kelly (1977).

$$T = \sum_{i=1}^n h_i K_i \quad (13)$$

Em que:  $K_i$  é a condutividade hidráulica (m/s) de uma camada “i”.

Através das equações (11) e (13) podemos escrever, respectivamente:

$$R = h\rho \quad (14)$$

$$T = hK \quad (15)$$

Então, através das equações (14) e (15) temos:

$$T = K\sigma R \quad (16)$$

Sendo:  $\rho$  – resistividade (em  $\Omega \cdot \text{m}$ ) e  $\sigma$  – condutividade (em  $S/\text{m}$ ).

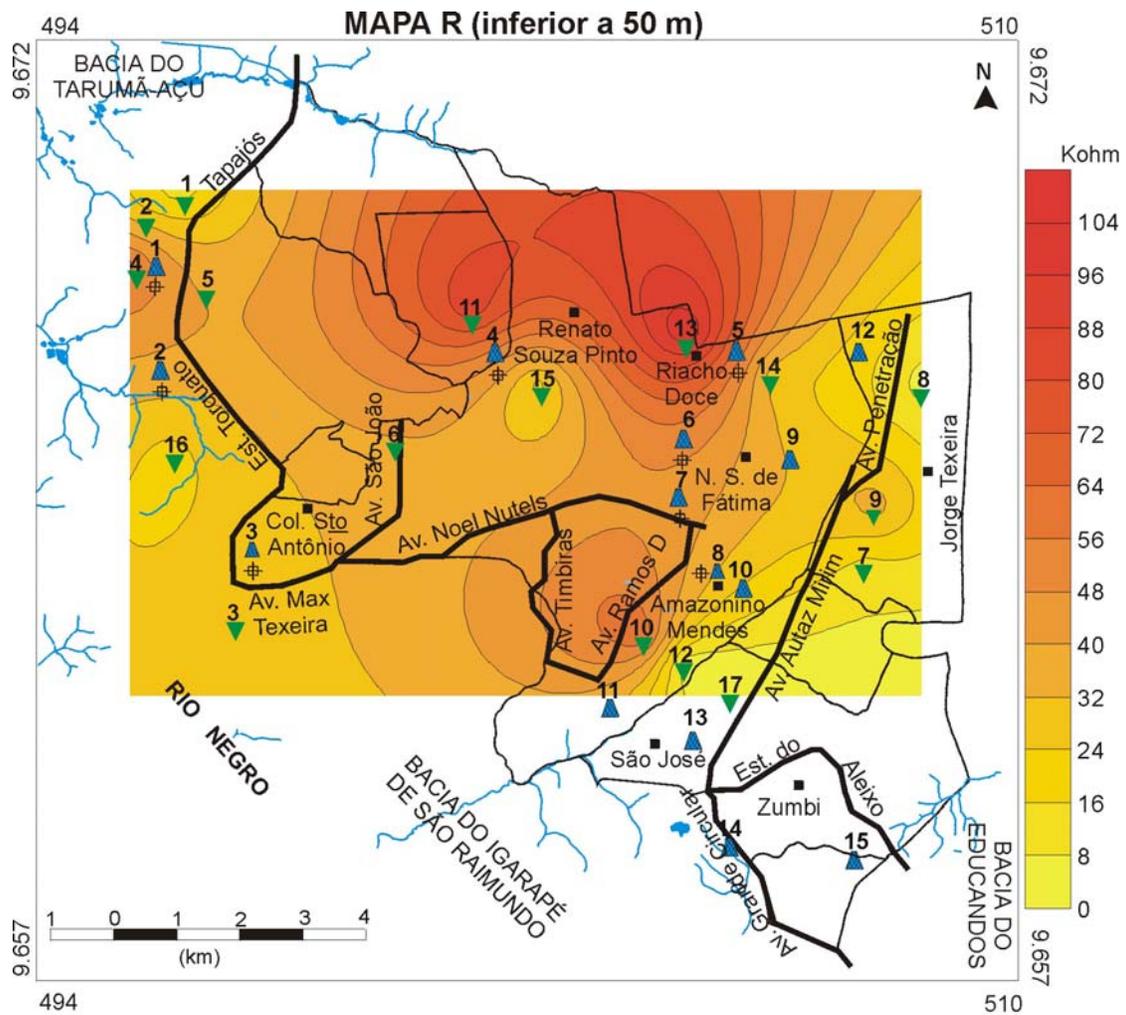
Então, para determinar T seria necessário, além de R, conhecer o produto  $K\sigma$ . Kelly (1977) estabeleceu uma relação linear entre K e  $\rho$ . Isto é, a condutividade hidráulica aumenta linearmente com o aumento da resistividade elétrica ou para regiões com o mesmo ambiente geológico e qualidade de água,  $K\sigma$  é constante para uma área, conhecendo os valores dessa constante pode-se calcular uma vez a resistência transversal e condutividade do aquífero sendo obtido pela resistividade medida. T, então, dependeria apenas de R (que é obtida pela SEVs). Os valores de  $K\sigma$  de uma região podem ser determinados a partir de testes de bombeamento de poços. No entanto, como T e R são diretamente proporcionais, as medidas de R são indícios dos valores de T.

### **6.2.1. Resistência transversal (R) e condutância longitudinal (S)**

Infelizmente, para a área de estudo, não foi possível obter medidas de transmissividade pela indisponibilidade de dados de bombeamento. Mesmo assim, elaboraram-se mapas de contorno de resistência transversal (R) e de condutância longitudinal (S), utilizando os dados de inversão das SEVs com o intuito de avaliar o potencial qualitativo dos aquíferos na região estudada. Foram utilizadas as equações (11) e (12).

Os mapas de R e S confeccionados para a área só alcançam até 50 m de profundidade (figuras 16 e 17). A baixa profundidade de abrangência destes mapas é em virtude, ao número limitado e baixa penetração das SEVs. As zonas são classificadas com o objetivo de indicar o melhor local para instalação de poço, onde os mais rasos podem servir uma menor demanda de água, por exemplo, conjuntos fechados, casas e etc. Já os mais profundos servindo uma maior quantidade de água, por exemplo, bairros da cidade.

Na figura 16 os valores de R são superiores a 40 Kohm nas porções NE, NW e meio da área no extremo sul. Esses valores indicam maior espessura de camadas de areia, conseqüentemente, aquíferos mais espessos com melhor transmissividade. Na figura 17 os valores de S menores que 0,3 *siemens* ocorrem em quase todas as porções do mapa, exceto no extremo NNW onde estão os maiores valores. Entretanto, condutância é indicador de camadas condutivas que nesse ambiente geológico representam camadas de argila/folhelho, as quais possuem baixa permeabilidade hidráulica (i. e., aquítarde). Essas camadas funcionam como protetores de aquíferos contra contaminações superficiais (Henriet, 1976). Logo, mapas em S tem importância, particularmente de até 50 m de profundidade, como indicador da proteção de aquíferos abaixo deles.



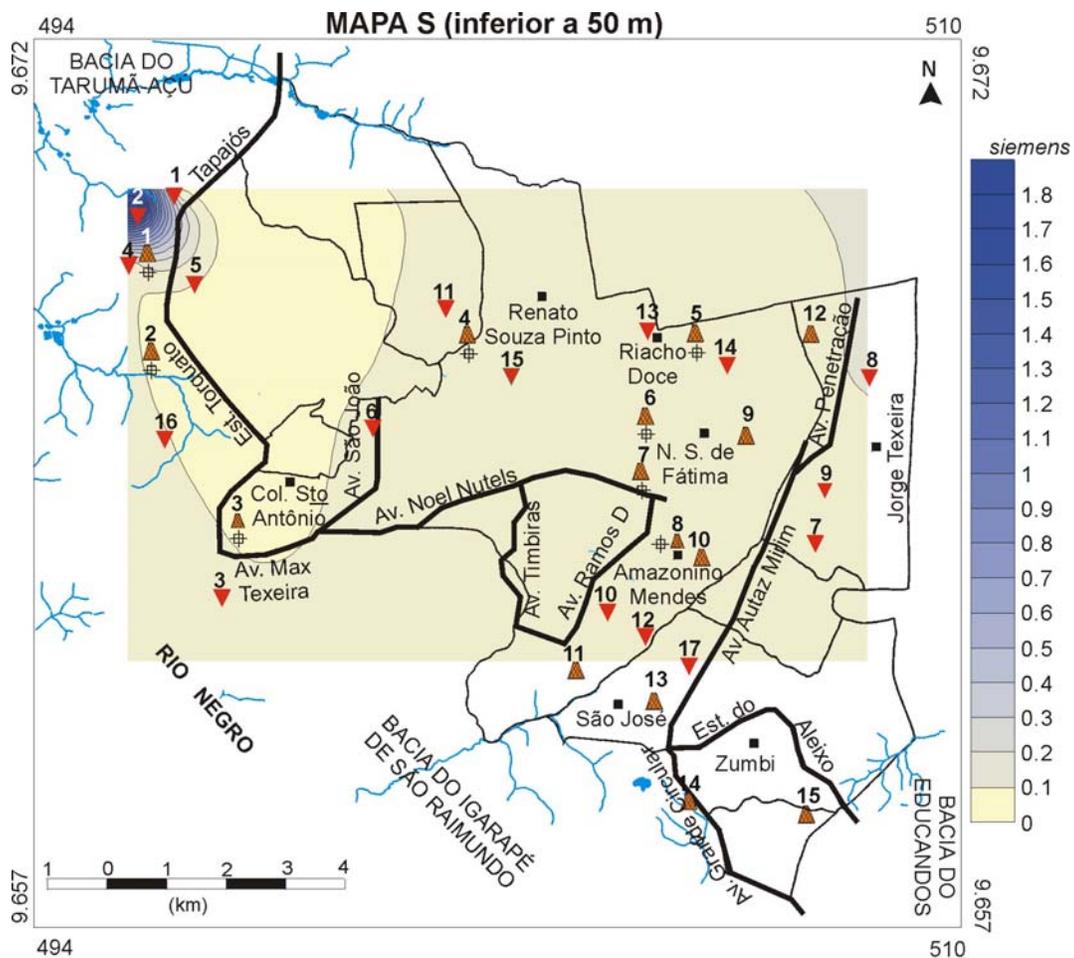


Figura 17 - Mapa de contorno de condutância longitudinal dos horizontes geolétricos inferiores a 50 m de profundidade.

### 6.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados de PGP e SEV que resultaram na confecção das seções hidrogeológicas, embora tenham configurado uma boa continuidade lateral dos estratos em subsuperfície, sabe-se da impossibilidade em definir as geometrias dos corpos e caracterizar um sistema deposicional, devido à existência de poucos dados e a uma malha irregular por causa do meio urbano.

Nas seções hidrogeológicas são visualizadas seqüências de corpos sedimentares arenosos, areno-argilosos e argilosos, geralmente interdigitados, esta interdigitação ocorre na porção mediana das seções, cujo topo e base são quase sempre caracterizados por material arenoso com raras lentes de argila. A forma de lente também é muito freqüente, de dimensões nada uniformes, com espessuras variando em dezenas de metros. No geral, o topo das seções é caracterizado por um conjunto de resistividades bastante variadas em virtude da lixiviação, produto do forte intemperismo vigente na área estudada, que mascara as unidades superficiais e gera um solo de espessura muito variada. Os corpos arenosos apresentaram valores de resistividade extremamente altos, em torno de 5.000  $\Omega$ .m, e corpos argilosos com resistividades de quase 200  $\Omega$ .m.

Na área estudada em Manaus verificou-se, então, que os estratos não têm uma boa continuidade lateral em subsuperfície a profundidades inferiores a 50 m, sendo bastante correlacionáveis a profundidades maiores que estas. São basicamente constituídas por material arenoso intercalado com níveis argilosos. Os perfis litológicos de amostragem de calha (Figuras 9A-C), embora tenham sido utilizados apenas como informação complementar na determinação de zonas permo-porosas para a área, descreveram também a fácies sedimentar “Arenito Manaus” a profundidades superiores a 20 m e inferiores a 200 m. Apesar desta fácies

não ser identificada nas sondagens, e conseqüentemente, nas seções hidrogeológicas, ela funciona como uma rocha selante, onde as camadas subseqüentes possuem potencialidade aquífera, devido ao seu alto grau de silicificação. Em um dos perfis litológicos (Figura 9B, Perfil do poço 4) a profundidades superiores a 200 m, descreveu-se ainda calcário que é pertencente à Formação Nova Olinda.

Nos mapas de resistência transversal (R) e condutância longitudinal (S) os altos valores de R indicam presença de areia, logo, maior espessura do aquífero e melhor transmissividade. Por outro lado, os valores elevados de S sugerem a ocorrência de argila, e, portanto, a ocorrência de baixa permeabilidade hidráulica como nos aquíferos. Estas camadas de argila funcionam como protetores de contaminação de aquíferos superficiais. Assim, o mapa de S (Figura 17) tem importância, particularmente, até profundidades inferiores a 50 m, pois indica os locais onde os aquíferos profundos estão mais protegidos.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Integralizando-se os dados de PGP e SEV, e ainda, perfis de amostragem de calha, levando-se em conta o contexto geológico na interpretação, foi possível discriminar duas zonas aquíferas na Formação Alter do Chão para Manaus, de características hidrogeológicas e litológicas distintas: zona 1 e zona 2.

Na zona 1, marcada pelos 50 m iniciais de profundidade, distinguem-se três tipos de litologias: argilosa, arenosa e areno-argilosa com as mais variadas dimensões. Estas duas últimas litologias são descritas por Aguiar *et al.*, (2002), como as fácies sedimentares de elevado potencial aquífero. Mesmo assim, esta zona parece não conter um volume de água considerável, devido a sua limitada continuidade lateral dos corpos arenosos e por estar sujeita aos estorvos antrópicos superficiais. Portanto, não indicada para exploração de água em grandes quantidades.

A zona 2 se estende a partir dos 50 m até aproximadamente 290 m de profundidade. É caracterizada por dois tipos de litologias: arenosa e areno-argilosa. Ao contrário da primeira, a esta profundidade há propensão do armazenamento e exploração de água, por causa da alta profundidade, litologias com elevado potencial aquífero, cujos corpos arenosos são mais espessos e possuem uma maior continuidade lateral que os da zona 1; e valores de vazão de quase 300 m<sup>3</sup>/h. Serve, então, para abastecimento público por causa das boas vazões, garantia de água de boa qualidade protegida de ações antrópicas e não requerer um alto custo em sua captação.

A análise de resistência transversal (R) e condutância longitudinal (S) feita para os aquíferos da área, salientando-se que esta análise está vinculada a parâmetros de resistividade

e a espessura de cada horizonte geoeletrico, onde para baixos valores de S e altos de R definem as faixas mais transmissivas do sistema aquifero. Por outro lado, baixos valores de R e de S elevados representam as faixas mais argilosas, e logo, menos permeaveis do sistema. Sendo assim, de acordo com o mapa das figuras 16 e 17 os setores NE e SW correspondem às zonas permeaveis. Portanto, possuem menos faixas argilosas, sendo considerados os setores mais transmissivos do sistema aquifero da área estudada em Manaus.

As técnicas geofísicas utilizadas neste trabalho tiveram como objetivo primordial reconhecer propriedades/características que pudessem ser associadas a padrões litológicos, e assim correlaciona-los lateralmente. Com vistas à identificação de aquíferos contínuos o suficiente, que possibilitasse sua exploração com maior vazão possível.

Ressalta-se aqui que se deve levar sempre em consideração as limitações de cada método, por exemplo: (1) os perfis de amostragem de calha apresentam uma investigação meramente pontual e sujeita as misturas de materiais devido às várias subidas e descidas da sonda, por isso a perfilagem geofísica é a técnica melhor indicada para caracterizar com uma maior grau de precisão os tipos de materiais litológicos pertinente a área estudada; e (2) a técnica de SEV apresenta certas dificuldades quando aplicada sobre espessos pacotes de material argiloso, uma vez que, estes são normalmente muito condutivos, funcionando como blindagem impedindo o fluxo da corrente em profundidades maiores, assim, dificultam a investigação a profundidades elevadas, e ainda, no que diz respeito ao pouco espaço para a abertura dos cabos em meio urbano. Recomenda-se, então, o emprego de sondagens eletromagnéticas variando frequência, embora também seja necessário ter cuidado com ruídos durante a aquisição dos dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, C. J. B.; HORBE, M. A.; GASNIER, T. 2004. *A vulnerabilidade do Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus – um caso de contaminação por amônia e nitrato*. Manaus, CPRM. p. 1-12. (Relatório Interno).
- AGUIAR, C. J. B.; HORBE, M. A.; R FILHO, S. F.; LOPES, E. S.; MOURA, U. F.; ANDRADE, N. M.; DIÓGENES, H. S. 2002. *Carta hidrogeológica da cidade de Manaus*. Manaus, CPRM-AM. p. 1-4. (Relatório Interno).
- ALI, H. O. & WHITELEY, R. J. 1981. Gravity exploration for groundwater in the Bara Basin, Sudan. *Geoexploration*. 19: 127-141.
- CARRASQUILA, A.; RIJO, L.; PORSANI, M. J. 1991. Estudo geofísico regional das águas subterrâneas na Ilha do Marajó – Pará. *Rev.Bras. Geof.*, 9 (2): 187-197.
- CUNHA, P. R. C.; COUTINHO, L. F. C.; FEIJÓ, F. J. 1994. Bacia do Amazonas. In: *Bol. Geoc. Petrobrás*. Rio de Janeiro, 8 (1): 47-55.
- DINO, R.; SILVA, O. B.; ABRAÃO, D. 1999. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cenozóicos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. In: SIMP. SOBRE O CRETÁCEO, 5., Serra Negra. *Anais ...* Rio Claro, SP, UNESP. p. 557-565.
- FIGUEIREDO, A. M. & GABAGLIA, G. P. R. 1986. Sistema classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileiras. *Rev. Bras. Geoc.*, 16: 350-369.
- GATTO, L. C. S. 1991. Relevo. Geografia do Brasil – Região Norte. IBEG. Rio de Janeiro. vol.3, p. 47-60.
- GEISSLER, P. E. 1989. Seismic reflection profiling for groundwater studies in Victoria, Austrália. *Geophysics.*, 54 (1): 31-37.

- HAENI, F. P. 1986. Application of seismic refraction methods in groundwater modeling studies in New England. *Geophysics.*, 51 (2): 236-249.
- HENRIET, J. P. 1976. Direct applications of the dar zarrouk parameters in ground water surveys. *Geophysical Prospecting.*, 24: 344-353.
- HASSELSTRÖM, B. 1969. Water prospecting and rock-investigation by the seismic refraction method. *Geoexploration.*, 7: 113-132.
- KELLY, W. E. 1977. Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. *Groundwater.*, 15: 420-425.
- MARINHO, J. M. L. & VASCONCELOS, S. M. S. 2004. Bacia Costeira do Rio Cauípe, Caucaia, Ceará: levantamentos geoeletricos e hidrogeológicos. *Rev. Geol.*, 17 (1): 22-37.
- MBONU, P. D. C.; EBENIRO, J. O.; OFOEGBU, C. O.; EKINE, A. S. 1991. Geoelectric sounding for the determination of aquifer characteristics in parts of the Umuahia area of Nigeria. *Geophysics.*, 56 (2): 284-291.
- MENDES, R. L. R. 2000. *Geofísica aplicada ao mapeamento de aquíferos da região metropolitana de Belém*. Belém, CPGF/UFPA. 72p. (Dissertação de Mestrado).
- MENDES, R. L. R. & VERMA, O. P. 2002. Prospecção de água subterrânea na região de Belém (PA) através de perfilagem geofísica de poço e eletroresistividade. *Rev. Bras. Geoc.*, 32 (1): 87-94.
- NERY, G. G. 1997. Perfilagem geofísica aplicada a água subterrânea. In: FEITOSA, A. C. & M FILHO, J., (coord). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM. p. 203-241.

- NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, V.; SOARES, E. A. A. 1997. Contribuição a tectônica Cenozóica da região de Presidente Figueiredo, norte de Manaus-AM. In: SIMP. NAC. EST. TECT., 6. Pirinópolis. 1997. *Bol. Res. Exp. Pirinópolis*, SBG. p. 123-125.
- ORELLANA, E. 1972. Prospección geolétrica en corriente contínua. Madrid: Paraninfo. 523p.
- PEIXOTO, J. P. & OORT, A. T. 1990. Le cycle de l'eau et le climat. *La Recherche-Special: L'eau.*, 21: 570-579.
- SANTOS, J. O. S. 1984. A parte setentrional do Cráton Amazônico (Escudo das Guianas) e a Bacia Amazônica. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. *Geologia do Brasil*. Brasília. DNPM. p. 57-88. (Ed. Comemorativa do Cinquentenário).
- SILVA, M. L. da. 2001. *Hidroquímica elementar e dos isótopos de urânio no Aquífero Alter do Chão de Manaus – AM*. Rio Claro, (SP), Centro de Estudos Ambientais da Universidade Paulista (UNESP). 82p. (Dissertação de Mestrado).
- SOUZA, L. S. B. & VERMA, O. P. 2004. Mapeamento de aquíferos em Manaus (AM) utilizando Perfilagem Geofísica de Poço. In: SIMP. DE GPR E SIMP. HIDROGEOFÍSICO, 1, Fortaleza. CD-ROM.
- SRI, N. & SINGHAL, D. C. 1981. Estimation of aquifer transmissivity from Dar-zarrouk parameters in porous media. *Journal of Hydrology.*, 50: 393-399.
- VERMA, O. P. & BISCHOFF, J. H. 1989. Laboratory and field studies of the application of eletromagnetic prospecting for groundwater on Marajó Island, Brazil. *Geophysics.*, 54 (1): 23-30.

ZOHDY, A. A. & BILDORF, R. J. A. 1989. Programs for the automatic processing and interpretation of schlumberger sounding curves in Quickbsic 4.0 Open-file report 89-137 A & B, U. S. *Geological Survey.*, 19p.

**ANEXO**

## Anexo 1 – Tabelas dos dados de campo das SEVs (arranjo Schlumberger).

SEV 1								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	40,6	2,3	1949	2	180,7	2,3	2054
5,5	-/-	20,1	2,3	1657	-/-	90,8	2,3	1814
7,5	-/-	11,5	3,1	1309	-/-	51,5	3,1	1441
10	-/-	4,4	2,6	1063	-/-	19,9	2,7	1146
13	-/-	1,9	2,4	840	-/-	8,6	2,5	908
18	-/-	9,1	24,9	743	-/-	2,9	1,6	919
24	-/-	4,3	32,2	483	-/-	2,1	2,2	862

SEV 2								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	10,2	3,2	352	2	48,6	3,1	410
5,5	-/-	6,7	3,8	335	-/-	30,3	3,7	376
7,5	-/-	2,8	2,6	380	-/-	12,7	2,6	306
10	-/-	2,3	3,2	451	-/-	10,4	3,1	522
13	-/-	1,7	3,2	564	-/-	7,3	3,2	602
18	-/-	1,2	4,2	582	-/-	5,9	4,1	730
24	-/-	7,9	40,2	711	-/-	3,8	4,2	817
32	2	1,4	2,8	804	5	3	2,8	686
42	-/-	10,9	45,2	668	-/-	2,4	4,5	589
55	-/-	5,7	54,8	494	-/-	1,3	5,6	440
75	-/-	1,5	73,5	180	-/-	4,2	73,3	202
100	5	1,1	62,9	110	20	4,9	63,1	121
130	-/-	0,7	102,5	73	-/-	3,5	102,4	90
180	-/-	0,3	109,7	56	-/-	1,4	110,4	64
240	-/-	0,3	122,9	88	-/-	1	124,5	73
320	20	0,3	41,1	118	50	1,3	40,9	203

SEV 3								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	7,7	1,5	566	2	28	1,5	487
5,5	-/-	4,5	1,4	609	-/-	15,8	1,4	518
7,5	-/-	3,2	1,4	807	-/-	10,6	1,4	657
10	-/-	2,1	1,2	1099	-/-	7,1	1,2	920
13	-/-	2	1,6	1327	-/-	7,1	1,5	1249
18	-/-	1	1,1	1850	-/-	3,4	1,2	1438
24	-/-	7,1	12,6	2039	-/-	2,2	1,2	1656
32	2	9,3	8,3	1800	5	3	1,4	1370

SEV 4								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	47,5	1,8	2913	2	233	1,8	3383
5,5	-/-	33,6	2,	3186	-/-	158,7	2,1	3472
7,5	-/-	18,8	1,9	3492	-/-	87,7	1,9	4006
10	-/-	9,6	1,7	3545	-/-	44,5	1,7	4070
13	-/-	4,9	1,8	2889	-/-	23,6	1,8	3460
18	-/-	2,4	2,2	2200	-/-	11	1,7	3283
24	-/-	1,6	2,9	1996	-/-	5,5	2	2483
32	2	2,6	2,4	1740	5	6,9	2,4	1838
42	-/-	1,3	2,5	1440	-/-	3,1	2,5	1369
55	-/-	0,4	2,4	805	-/-	1,6	3,2	948
75	-/-	0,3	2,2	481	-/-	1,5	2,1	620
100	5	7,1	74,3	600	20	23,9	46,1	805

AB/2 (m)	SEV 5							
	$\rho_{a1} (\Omega m)$				$\rho_{a2} (\Omega m)$			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	14,2	0,4	3919	2	63	0,4	4117
5,5	-/-	6,9	0,3	4363	-/-	30,5	0,3	4672
7,5	-/-	3,4	0,3	4000	-/-	15	0,3	4340
10	-/-	1,4	0,3	2930	-/-	6,5	0,3	3369
13	-/-	5	2,5	2123	-/-	2,5	0,3	2300
18	-/-	2,6	3,6	1470	-/-	1,2	0,3	2030
24	-/-	1,3	4,3	1094	-/-	2,7	1,9	1283
32	2	2,5	3,9	1030	5	6,7	3,1	1128
42	-/-	1,8	5,3	941	-/-	4,7	5,3	979
55	-/-	1,8	11,9	719	-/-	2,4	5,8	785
75	-/-	1,6	26,8	527	-/-	2,2	13	597

AB/2 (m)	SEV 6							
	$\rho_{a1} (\Omega m)$				$\rho_{a2} (\Omega m)$			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	7	5,6	138	2	34,7	5,5	165
5,5	-/-	5,6	5,8	183	-/-	27,3	5,9	213
7,5	-/-	4,1	5,4	268	-/-	19,3	5	335
10	-/-	3,5	5,9	372	-/-	16,5	5,9	435
13	-/-	2,6	5,7	484	-/-	12,6	5,5	605
18	-/-	1,6	5	651	-/-	8	5,6	725
24	-/-	2,3	11,7	711	-/-	4,4	4,1	969
32	2	3,2	4,4	1169	5	8,2	4,3	1220
42	-/-	1,2	2,5	1329	-/-	3,2	2,5	1413
55	-/-	1,1	4,7	1112	-/-	3	4,6	1237

AB/2 (m)	SEV 7							
	$\rho_{a1} (\Omega m)$				$\rho_{a2} (\Omega m)$			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	3,7	3,6	113	2	20	3,5	149
5,5	-/-	2,8	3,7	144	-/-	11	3,7	137
7,5	-/-	1,6	4,5	149	-/-	7,4	4,4	146
10	-/-	3,8	12,3	194	-/-	15,7	12,2	200
13	-/-	1,5	8,6	185	-/-	3,3	3,9	223
18	-/-	1	7,2	283	-/-	3,6	7,1	257
24	-/-	1,6	17,1	339	-/-	5,6	16,8	301
32	2	3,8	17,7	345	5	9,8	17,5	358
42	-/-	1,9	14,3	368	-/-	2,5	6,9	400
55	-/-	1,2	18,4	310	-/-	2,1	9,8	406
75	-/-	0,4	13	272	-/-	1,1	11,2	347
100	5	1,1	25,1	275	20	5,5	25,1	341

AB/2 (m)	SEV 8							
	$\rho_{a1} (\Omega m)$				$\rho_{a2} (\Omega m)$			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	3,6	4,4	90	2	14,9	4,5	87
5,5	-/-	2,8	4,7	113	-/-	11,3	4,8	108
7,5	-/-	1,9	4,9	137	-/-	7,6	4,8	137
10	-/-	8,3	37,8	138	-/-	2,5	2,5	155
13	-/-	1,7	10,1	179	-/-	6,7	10,2	173
18	-/-	4,1	42,2	198	-/-	1,7	4,7	184
24	-/-	2,4	45,4	191	-/-	8,9	43	187
32	2	1,4	12,1	186	5	3,6	12,2	189
42	-/-	1	14,5	191	-/-	3,1	17,5	196
55	-/-	3,7	121,4	148	-/-	9,6	121,3	150
75	-/-	2,6	165,7	139	-/-	6,7	165,5	143

SEV 9								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	8,4	0,4	2318	2	43,4	0,4	2836
5,5	-/-	3,5	0,3	2213	-/-	18,4	0,3	2818
7,5	-/-	3,1	0,6	1823	-/-	16	0,5	2777
10	-/-	1	0,4	1569	-/-	5,5	0,4	2138
13	-/-	6,5	6,6	1916	-/-	3,5	0,4	2300
18	-/-	2,9	3,8	1553	-/-	13,1	3,8	1749
24	-/-	1,7	6,1	1008	-/-	4,2	3	1264
32	2	1,7	2,7	1011	5	3,9	2,7	923
42	-/-	1,4	4,5	861	-/-	3	4,4	753
55	-/-	1,9	13,1	688	-/-	1,9	6	600
75	-/-	1,4	27,1	456	-/-	1,4	12,8	386

SEV 10								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	3,3	3,9	93	2	17,5	4	114
5,5	-/-	1,5	3,2	89	-/-	7,9	3,2	113
7,5	-/-	9,4	28,7	115	-/-	3,2	2,3	120
10	-/-	12,1	49,2	154	-/-	6,3	5,5	178
13	-/-	9,7	52,8	194	-/-	5,2	6	228
18	-/-	4,9	38,2	261	-/-	2,5	4	317
24	-/-	1,9	18,8	365	-/-	9,5	18,8	456
32	2	1,5	3,5	688	5	3,2	3,3	620
42	-/-	3,9	15,9	680	-/-	9,4	16,3	636
55	-/-	3	19,2	742	-/-	7,1	19,5	690
75	-/-	3,5	40	772	-/-	8,4	40,7	728
100	5	4,6	44,7	646	20	19,9	44,8	690
130	-/-	2,3	37,1	658	-/-	11,3	43,9	703

SEV 11								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	1,6	1,6	110,4	2	13,1	1,6	214
5,5	-/-	1,2	1,6	142	-/-	9,3	1,6	267
7,5	-/-	1,6	3,	188	-/-	8,6	2,1	355
10	-/-	6,8	17,7	241	-/-	4,6	1,6	447
13	-/-	5,2	17,2	320	-/-	3,6	1,6	593
18	-/-	1,4	7,3	390	-/-	11,2	7,2	789
24	-/-	1,7	12,8	480	-/-	12,9	12,8	910
32	2	5,8	8,5	1097	5	15,1	8,5	1136
42	-/-	3,4	7,4	1284	-/-	9	7,5	1325
55	-/-	2,5	8	1484	-/-	6,8	8,1	1592
75	-/-	1,8	10,6	1500	-/-	2,3	5,2	1561
100	5	1,1	4,9	1409	20	5,5	4,9	1745
130	-/-	2,1	17,2	1296	-/-	2,4	4,3	1442
180	-/-	1,1	40	560	-/-	5,2	4,1	643

SEV 12								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	1,9	1,1	190	2	10,9	1,1	259
5,5	-/-	1,1	0,8	260	-/-	5,5	0,8	315
7,5	-/-	5,1	6,2	290	-/-	3,1	0,7	384
10	-/-	4,1	7	367	-/-	3	0,9	518
13	-/-	2,9	6,8	452	-/-	1,8	0,9	527
18	-/-	2	7,1	573	-/-	11,2	7,2	789
24	-/-	1,4	8,3	610	-/-	7,8	8,4	838

SEV 13								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	48	1,2	4416	2	261	1,2	5625
5,5	-/-	5,6	0,3	3541	-/-	29,9	0,3	4580
7,5	-/-	6,3	0,6	3706	-/-	32,7	0,7	4730
10	-/-	2,5	0,5	3140	-/-	12,6	0,5	3918
13	-/-	8,1	3,3	2605	-/-	4,3	0,3	3782
18	-/-	2,4	2	2442	-/-	11,2	1,8	3157
24	-/-	1,1	1,5	2653	-/-	3,9	1,1	3202
32	2	3,7	2,5	2378	5	13,7	2,7	3244
42	-/-	5,4	5,7	2623	-/-	2,3	0,8	3175
55	-/-	4,2	8,8	2267	-/-	1,6	1,3	2528
75	-/-	2,5	17	1300	-/-	8	17	1661
100	5	2,4	11,3	1333	20	9,1	10,7	1322

SEV 14								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	19,3	2,6	819	2	84,9	2,5	887
5,5	-/-	11,5	2,7	807	-/-	54,1	2,9	857
7,5	-/-	5,3	2,4	780	-/-	25,2	2,4	911
10	-/-	4,3	3,4	792	-/-	20	3,5	888
13	-/-	3,5	3,9	952	-/-	16,5	3,9	1116
18	-/-	2	3,8	1071	-/-	9,3	4,3	1097
24	-/-	2,5	8,9	1016	-/-	5,2	4,2	1118
32	2	2,4	2,7	1428	5	5,4	2,9	1190
42	-/-	2	3,6	1538	-/-	4	3,2	1380
55	-/-	5,8	17,7	1556	-/-	3	3,9	1459
75	-/-	2,8	16,3	1517	-/-	6,2	16	1368

SEV 15								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	12,8	1,5	942	2	51,3	1,5	893
5,5	-/-	8,5	1,9	848	-/-	34	1,9	822
7,5	-/-	6,9	2,5	974	-/-	27,5	2,5	954
10	-/-	4,6	2,6	1110	-/-	18,3	2,7	1053
13	-/-	2,5	2,3	1153	-/-	9,8	2,4	1077
18	-/-	1,6	3	1085	-/-	4,4	2,2	1014
24	-/-	1,2	4,3	1010	-/-	2,8	2,5	1011
32	2	1,2	2,5	771	5	3,5	2,9	771
42	-/-	5,2	17,4	827	-/-	13,4	17,6	840
55	-/-	4,5	25,6	834	-/-	10,6	25,4	791
75	-/-	2,8	26,8	922	-/-	8,4	26,2	1131

SEV 16								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	22,1	1,6	1524	2	91,8	1,6	1500
5,5	-/-	15,6	1,7	1740	-/-	63,4	1,6	1820
7,5	-/-	10,5	1,9	1950	-/-	42,1	1,8	2029
10	-/-	3,9	1,2	2040	-/-	15,6	1,1	2200
13	-/-	3,2	1,5	2264	-/-	12,9	1,4	2431
18	-/-	1,4	1,4	2035	-/-	5,6	1,2	2367
24	-/-	6,3	12,8	1781	-/-	2,3	1,1	1888

SEV 17								
AB/2 (m)	$\rho_{a1}$ ( $\Omega\text{m}$ )				$\rho_{a2}$ ( $\Omega\text{m}$ )			
	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$	MN (m)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	$\rho_a$
4,2	0,5	1,8	3,2	62,1	2	10,2	3,1	81
5,5	-/-	2	3,5	108	-/-	4,9	2,3	97
7,5	-/-	1,9	5,6	120	-/-	4,4	3	127
10	-/-	1,6	6,8	147	-/-	3,2	3,4	146
13	-/-	7,5	48,3	167	-/-	3,6	4,9	193
18	-/-	8,3	87,5	193	-/-	3,6	9	202
24	-/-	5,6	100,5	201	-/-	2,6	9,9	237