

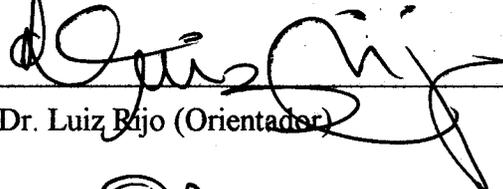
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ELETRORESISTIVIDADE APLICADA À CARACTERIZAÇÃO
HIDROGEOLÓGICA PARA O ABASTECIMENTO DA
CIDADE DE SÃO DOMINGOS DO ARAGUAIA-PARÁ

TESE APRESENTADA POR
ARNALDO DE QUEIROZ DA SILVA
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação : 13/02/1996

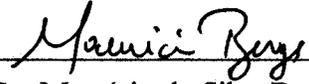
COMITÊ DE TESE:



Dr. Luiz Rijo (Orientador)



Dr. Om Prakash Verma



Dr. Mauricio da Silva Borges

BELÉM

1996

SILVA, Arnaldo de Queiroz da. Eletroresistividade aplicada a caracterização hidrogeológica para o abastecimento da cidade de São Domingos do Araguaia-Pará. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1995. 81p.

Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1995.

1. RESISTIVIDADE APARENTE. 2. MODELAMENTO NUMÉRICO. 3. HIDROGEOLOGIA. 4. SÃO DOMINGOS DO ARAGUAIA. 5. PARÁ. 6. BRASIL. 7. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL. I. Título.

*Ao povo esquecido da
Transamazônica
que sofre com ausência de água
potável.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Rijo, pela ajuda e dedicação, e principalmente pela liberdade de investigação científica que me foi permitida.

Aos meus examinadores Profs. Drs. Om Prakash Verma e Maurício da Silva Borges pelas sugestões e correções que contribuíram para melhorar esta tese.

Ao convênio UFPA/PETROBRÁS/FADESP/CNPq/FINEP, pelo suporte financeiro a este programa de pós-graduação.

Ao geólogo Manfredo Ximenes, pelo importante apoio dado ao nosso trabalho.

A Prefeitura de São Domingos do Araguaia, no nome de seu prefeito sr. Moisés Soares dos Santos, pela hospedagem e pelo apoio logístico dados durante as etapas de campo.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da universidade Federal do Pará ao qual devo meu aprimoramento.

Aos funcionários do Curso de Geofísica, pelo apoio e cooperação, em especial ao Ronald pela dedicação na confecção das figuras desta tese; à Socorro no auxílio bibliográfico; à Regina, Ana Rita e Selene pela amizade.

Ao técnico de campo Afonso Quaresma, pela sua ajuda e dedicação nos trabalhos de campo.

Aos trabalhadores "Toinho", Cleílton e Newton pela paciência e dedicação no trabalho auxiliar de campo.

Ao Prof. Dr. Walter Medeiros por suas críticas construtivas.

Aos Profs. Lúcia Costa da Silva e José Geraldo Alves pelas discussões técnicas e sugestões ao trabalho.

Aos bibliotecário Hélio Martins e Rosemarie de Almeida Costa pela revisão do texto e das normas de editoração.

Aos amigos José Antônio, Valcir e Fernando pelo companherismo em dividir maus e bons momentos.

A todos os amigos e colegas do mestrado e doutorado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica, em particular àqueles que contribuíram mais diretamente para a conclusão deste trabalho (Valéria, Eduardo) com sugestões e críticas.

Finalmente agradeço à minha mãe Maria Evanilde, aos meus irmãos e a Regina Lúcia pelo permanente estímulo e carinho a mim dedicado durante todo este longo percurso.

Não posso deixar de agradecer a DEUS por ter me dado força e inspiração para concluir este trabalho, que em muitos instantes me pareceu impossível de realizar.

SUMÁRIO

	p.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
1.1 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS DA TESE	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	5
2 - METODOLOGIA	8
2.1 ELETRORESISTIVIDADE - FUNDAMENTOS DO MÉTODO	8
2.2 INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA	11
2.2.1 Método Direto	11
2.2.1.1 Análise 1D	12
2.2.1.2 Análise 2D	13
2.2.2 Método Inverso	14
3 - MODELAMENTO NUMÉRICO DE ESTRUTURAS 2D E ANÁLISE DE SUAS INFLUÊNCIAS NA INTERPRETAÇÃO QUANTITATI- VA DE SEVs	17
3.1 INTRODUÇÃO	17
3.2 MODELOS GEOLÓGICOS	20
3.2.1 Estruturação no Embasamento	21
3.2.1.1 Mini "horst"	21
3.2.1.2 Mini "graben"	24
3.2.1.3 Sequência de mini "horsts" e mini "grabens"	25

3.2.2	Falhas Verticais	27
3.2.3	Diques	33
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
4.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO	38
4.2	FISIOGRAFIA	40
4.3	ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS	41
4.4	GEOLOGIA REGIONAL	43
4.5	GEOLOGIA LOCAL	47
5	QUADRO HIDROGEOLÓGICO DE SÃO DOMINGOS DO ARAGUAIA	53
5.1	INTRODUÇÃO	53
5.2	PROCEDIMENTO INSTRUMENTAL E DE CAMPO	53
5.3	RESULTADOS DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS	54
5.4	SECÇÕES GEOELÉTRICAS	63
5.4.1	Secção Geométrica 01	63
5.4.2	Secção Geométrica 02	63
5.4.3	Secção Geométrica 03	66
5.4.4	Secção Geométrica 04	66
5.5	MAPEAMENTO 3D DO EMBASAMENTO	69
5.5.1	Interpretação Estrutural	73
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de funcionamento do método de eletroresistividade. O circuito AB faz o envio de corrente e o MN realiza a leitura da resistividade aparente.	8
Figura 2.2	Arranjos usados em eletroresistividade: (a) arranjo Schlumberger, (b) arranjo Wenner e (c) arranjo Dipolo-dipolo.	10
Figura 3.1	Curvas obtidas por inversão (1D) e pelo modelamento (2D), para um modelo de 5 camadas sobreposta a um embasamento resistivo.	20
Figura 3.2	Modelo bidimensional de um mini "horst" e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.	22
Figura 3.3	Modelo mostrando sequência de 3 SEVs espaçadas de 15 m. Note que a bidimensionalidade do meio é identificada nas alterações que as curvas de SEVs sofrem ao longo do perfil.	23
Figura 3.4	Modelo bidimensional de um mini "graben" e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.	24
Figura 3.5	Modelo bidimensional de uma estruturação complexa do embasamento e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.	26
Figura 3.6	Modelo bidimensional de uma falha vertical com rejeito de 3,19 m e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado.	27
Figura 3.7	Modelo bidimensional de uma sequência estratificada com variação na resistividade do manto de intemperismo a partir do centro da SEV e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.	28
Figura 3.8	Modelo bidimensional de uma falha de rejeito vertical de 3,19 m, recoberta por manto intempérico de resistividade igual 886 ohm.m e 0,60 m de espessura e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.	29

Figura 3.9	Modelo bidimensional de uma falha vertical de rejeito de 3,19 m distante 3,25 m do centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.	30
Figura 3.10	Modelo bidimensional de uma sequência estratificada com variação na resistividade do manto de intemperismo a partir de 3,25 m do centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.	31
Figura 3.11	Modelo bidimensional de uma falha vertical com rejeito de 3,19 m, posicionada a 3,25 m do centro da SEV recoberta por manto de intemperismo e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.	32
Figura 3.12	Modelo bidimensional de um dique resistivo inclinado com 45° de mergulho, aflorando no centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificada 1D.	34
Figura 3.13	Modelo bidimensional de um dique condutivo inclinado com 45° de mergulho, aflorando no centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.	35
Figura 3.14	Modelo bidimensional de um dique resistivo inclinado com 45° de mergulho aflorando a 7 m do centro da SEV, e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.	36
Figura 3.15	Modelo bidimensional de um dique condutivo inclinado com 45° de mergulho aflorando a 7 m do centro da SEV, e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.	37
Figura 4.1	Mapa de Localização	39
Figura 4.2	Mapa geológico da Folha Marabá (compilado de ALMEIDA et al., no prelo)	44
Figura 4.3	Sucessão vertical esquemática dos sistemas deposicionais da bacia do Parnaíba (Pedreira, 1991, in Almeida et al., no prelo)	46
Figura 4.4	Mapa geológico da cidade de São domingos do Araguaia. Notar o contato geológico entre a Faixa Araguaia e a borda oeste da Bacia do Parnaíba, definido pelo braço esquerdo do igarapé Açaizal, bem como os padrões de lineações que controlam o leito do referido igarapé.	48
Figura 4.5	Aspectos texturais e feições de mesoescala dos clorita xistos da Formação Pequizeiro em exposição natural (ponto 05 - Fig. 4.4).	49
Figura 4.6	Aspecto textural do xisto intemperizado, transformado em material argiloso (ponto 04 - Fig. 4.4).	50

Figura 4.7	Perfil estratigráfico esquemático mostrando sequência de estratos horizontais, descrito em um barranco (ponto 01 - Fig. 4.4). Destaque para os dois lençóis freáticos.	51
Figura 4.8	Perfil estratigráfico esquemático, mostrando sequência de estratos horizontais, descrito em um poço (ponto 02 - Fig. 4.4). Notar a ausência do primeiro lençol freático.	51
Figura 4.9	Aspecto textural da horizonte laterítico (ponto 03 - Figura 4.4). Notar a textura escura e compacta da rocha.	52
Figura 5.1	Localização do centro das SEVs. Notar que cada SEV é acompanhada da profundidade do embasamento encontrado para aquele local. . . .	56
Figura 5.2	Família de SEVs que apresentam espessura da camada arenosa inferior a 10 m	60
Figura 5.3	Família de SEVs que apresentam espessura da camada arenosa superior a 19 m.	61
Figura 5.4	Mapa de isópacas da camada arenosa. As mediações dos bairros São Luiz e Moisés são os locais que apresentam as maiores espessuras. . .	62
Figura 5.5	Secção geoeletrica 01, baseada na interpretação das SEVs 01, 05, 10, 12 e 13.	64
Figura 5.6	Secção geoeletrica 02, baseada na interpretação das SEVs 02, 03, 04, 05, 06 e 08.	65
Figura 5.7	secção geoeletrica 03, composta pelas SEVs 17, 15, 14, 10, 06 e 07. . .	67
Figura 5.8	Secção geoeletrica 04, composta pelas SEVs 15, 16 e 17.	68
Figura 5.9	Mapa de contorno estrutural do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia. O intervalo entre as curvas é de 5 m.	70
Figura 5.10	Bloco 3D mostrando o comportamento estrutural do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia. Vista para SW.	71
Figura 5.11	Bloco 3D mostrando o comportamento estrutural do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia. Vista para NW.	72
Figura 5.12	Bloco diagrama sintetizando o quadro estrutural proposto para a área em estudo. A seta indica a posição do eixo distensivo que aponta para NE.	73

TABELAS

Tabela 1.1	Prospecção Geofísica para Água Subterrânea no Estado do Pará - Convênio UFPA/FNS DE 1989-1995 (Jul) (extraído de PONTE, 1995).	7
------------	--	---

Tabela 3.1	Valores de $AB/2$ e os respectivos MN usados no arranjo Schlumberger. As distâncias estão medidas em metro.	19
Tabela 5.1	Resultado das interpretações das SEVs em São Domingos do Araguaia	55
Tabela 5.2	Seção geométrica proposta para a subsuperfície da cidade de São Domingos do Araguaia	59

RESUMO

O uso de métodos geofísicos (elétricos, eletromagnéticos e perfilage m de poço) na prospecção de água subterrânea em muitas localidades no Estado do Pará, tornou-se possível graças a um convênio firmado em 1988, entre a Fundação Nacional de Saúde e a Universidade Federal do Pará, através do Departamento de Geofísica e do Curso de Pós-Graduação em Geofísica, sendo estes responsáveis pelo estudo técnico das áreas prospectadas.

Nosso objetivo nesta tese é contribuir com critérios geoeletricos, com base na utilização de dados de resistividade aparente (ρ_a), medidos em superfície, visando melhorar a caracterização do quadro geológico de subsuperfície e por conseguinte prover informações mais confiáveis quanto aos recursos dos mananciais subterrâneos.

Inicialmente, analisamos a influência que algumas estruturas 2D, em subsuperfície, tem sobre os dados de eletroresistividade, medidos em Sondagens Elétricas Verticais (SEVs), com o arranjo Schlumberger. Este estudo foi realizado através de simulações numéricas utilizando o programa computacional SEV2D desenvolvido no Departamento de Geofísica, baseado na técnica dos elementos finitos. Resultados mostram ambiguidades geradas pelo uso de métodos de interpretação 1D de SEVs, executadas em ambientes geológicos de características bidimensionais.

A parte prática da tese se constituiu no tratamento interpretativo de dados de eletroresistividade coletados na sede do município de São Domingos do Araguaia, cidade localizada na região sudeste do Estado do Pará. A aquisição deste dados se deu através de SEVs, utilizando o arranjo Schlumberger. Correlacionando os resultados das interpretações geofísicas com informações geológicas foi possível definir um quadro geológico para a área que serve como referência para a prospecção de água subterrânea na referida cidade.

ABSTRACT

The use of geophysical methods (electrical, eletromagnetics and well logging) for groundwater exploration in many areas in the State of Pará has been possible due to a program of cooperation between the Fundação Nacional de Saúde and the Universidade Federal do Pará, in which the the Department of Geophysics and the Graduate Programe in Geophysics are responsible for the research and technical work. This thesis has been conducted under such program.

Our objective in this work is to find geoelectrical criterious for characterization of the subsurface geology for hydrogeological exploration, based on apparent resistivity, data observed in cristaline rock environment.

First, we analysed the influence of some 2D structures on resistivity data using vetical electrical sounding with Schlumberger array. This study was carried out with the computer program SEV2D, developed in the Departament of Geophysics, based on the finites elements technique. The results show clearly the ambiguities which are obtained when 1D interpretation is used for two-dimentional geological environment.

The pratical aspect of the thesis is concerned with the processing and interpretation of resistivity data obtained in São Domingos do Araguaia in the southeset of the State of Pará. The Schlumberger array was used in the vertical electrical sounding survey. By correlating the geophysical results with geological informations it was possible to define the best zones for groundwater exploration in the prospected area.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A região Amazônica, detém a maior rede hidrográfica do planeta o que a faz ser conhecida mundialmente como uma região de recursos hídricos abundantes. Ironicamente, Estados Amazônicos, como o Pará, enfrentam problemas seríssimos de falta d'água para o abastecimento de uma cifra considerável de suas populações. Segundo PONTE (1995), estima-se que 3,3 milhões de habitantes do Estado do Pará, de um total de 5,6 milhões, sofram com a falta de abastecimento de água potável, devido principalmente, a falta de recursos financeiros governamentais.

O abastecimento de água potável por meio de tratamento de água superficial (rios, lagos), usado em algumas cidades paraenses, é uma técnica que na prática, tem se mostrado inviável para muitas comunidades do Estado, apesar da abundância de rios perenes e caudalosos na região. Isto é explicado pelos custos, considerados elevados para a realidade financeira de muitas prefeituras de municípios do Pará, para construir e manter sistemas coletivos de captação, e principalmente tratamento e distribuição de água potável.

Diante deste quadro, a Fundação Nacional de Saúde (FNS), preocupada na prevenção de doenças que tem a água como principal agente transmissor, vem se empenhando em implementar sistemas municipais de fornecimento de água potável, usando como fonte preferencial aquíferos subterrâneos.

Da área do Estado do Pará, calculada em $1.248.042\text{km}^2$, 30 % corresponde a áreas de domínio de rochas sedimentares. Estas rochas são litologias com maior potencialidade de armazenamento de água, devido fundamentalmente ao seu maior espaço poroso intergranular. Felizmente, 65,79 % da população paraense habita sobre este tipo de terreno (PONTE, op cit).

Os 70 % restante da área do Estado do Pará, é constituído por rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas), que têm porosidades intergranulares quase nulas. Segundo DAVIS (1969) os valores típicos de porosidade variam de 0,3 % para gnaisses e granitos, até 3.0 % para xistos e ardósias. Entretanto, quando essas rochas encontram-se bastante fraturadas, imtemperizadas ou falhadas, a porosidade total da rocha pode aumentar consideravelmente, chegando a

atingir valores de 20 %.

PONTE (1995), estima que 14 % da população paraense viva sobre terrenos cristalinos, em núcleos urbanos mal assistidos quanto suas necessidades de água tratada. Estes núcleos foram criados principalmente no início da década de 70, após a construção da rodovia Transamazônica e com a política de ocupação do sudeste do Estado do Pará, fomentada com incentivos do governo Federal nas últimas três décadas. É junto a estas comunidades que a FNS em parceria com os governos municipais, vem implementando a captação de água subterrânea, através da perfuração de poços tubulares.

Um Convênio de Cooperação, firmado desde 1989, entre a FNS e a Universidade Federal do Pará (UFPA), através do Departamento de Geofísica (DGf) e do Curso de Pós-Graduação em Geofísica do Centro de Geociências, tem dado apoio às campanhas de prospecção de água subterrânea, através de pesquisas geofísicas que utilizam basicamente a aplicação de métodos elétricos e eletromagnéticos, visando reduzir os índices de erros na locação de poços poucos produtivos, problema comum em regiões de rochas cristalinas. A Tabela 1.1, extraída de PONTE (1995), mostra sinteticamente, os locais estudados e os tipos de pesquisas realizadas pelo Convênio FNS/UFPA no período de 1989 a 1995.

1.2 OBJETIVOS DA TESE

Os dados de PONTE (1995), mostram que a aplicação de métodos geofísicos na prospecção de água subterrânea, em várias localidades do Estado do Pará, tem contribuído para uma melhor avaliação dos recursos hídricos de subsuperfície. Todavia, a maioria das campanhas geofísicas, necessariamente, são executadas dentro de cidades, uma vez que o propósito deste trabalho é implementar ou ampliar sistemas de água potável, onde o poço preferencialmente deve estar o mais próximo possível dos consumidores. Decorre deste fato, algumas complicações na operacionalidade dos métodos geofísicos, particularmente de eletroresistividade, que tem imposto limitações na real potencialidade de investigação do método.

O propósito desta tese é contribuir com uma metodologia que possibilite sistematizar a aplicação da eletroresistividade à pesquisa de água subterrânea dentro do espaço urbano, visando principalmente a caracterização do manto de intemperismo, que devido as condições climáticas da região amazônica pode em muitos casos ser mais importante que a caracterização de um quadro estrutural de subsuperfície, a despeito do que acontece na geologia do nordeste brasileiro onde o aspecto estrutural tem mais importância na prospecção de água subterrânea.

Outro enfoque dado nesta tese, diz respeito às influências que variações laterais de resistividades tem sobre os dados medidos por Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Este estudo foi realizado através de simulações numéricas. Os resultados alcançados nesta etapa, servirão como parâmetros para estimar as reais possibilidades das SEVs em detectarem a presença de estruturas bidimensionais em subsuperfície.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A característica básica desta tese é ser um trabalho de aplicação prática do método de eletroresistividade. Neste sentido o trabalho consta de duas partes. Na primeira parte, é feita uma análise das influências que estruturas bidimensionais, comuns em ambientes geológicos de rochas cristalinas, tem sobre os dados de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), que se constituiu na principal ferramenta usada nos trabalhos campo. Esta análise foi desenvolvida através de modelamento numérico e teve como objetivo estimar os erros introduzidos, na quantificação dos parâmetros geoeletricos coletados sobre ambientes 2D e interpretados, via de regra, como modelos 1D. A aplicação prática é abordada na segunda parte da tese, através do desenvolvimento de uma metodologia que conciliou técnicas geofísicas e geológicas no mapeamento do manto de intemperismo, utilizando dados coletados na sede do município paraense de São Domingos do Araguaia.

Considerando os propósitos deste trabalho, esta tese está dividida em 6 capítulos.

No capítulo 1 é apresentada a motivação do trabalho, sua organização e objetivos.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos básicos do método de eletroresistividade e a metodologias usada no modelamento numérico, bem como os princípios utilizados nos programas computacionais de interpretação direta e inversa de SEVs.

Os resultados dos modelamentos numéricos e suas respectivas análises são apresentadas no capítulo 3, onde se focaliza os efeitos que diferentes estruturas 2D tem sobre os dados de resistividades medidos por SEVs.

Apresentamos no capítulo 4 as características gerais da cidade de São Domingos do Araguaia, cidade escolhida para a realização dos estudos práticos; dando destaque para os aspectos geológicos.

No capítulo 5 desenvolvemos metodologias que permitiram a caracterização geológica e

hidrogeológica de subsuperfície da cidade de São Domingos do Araguaia.

Finalmente, no capítulo 6, apresentamos as conclusões referentes à tese, assim como recomendações para futuros trabalhos são apresentados.

Tabela 1.1 - Prospecção Geofísica para Água Subterrânea no Estado do Pará
 - Convênio UFPA/FNS DE 1989-1995 (Jul) (extraído de PONTE,
 1995).

LOCAL	MUNICÍPIO	REGIÃO DO ESTADO DO PARÁ	UNIDADE TECTÔNICA	SEV	VLF	OBSERVAÇÕES
Maracanã	Maracanã	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Aquíferos salinizados, influência do mar
São Miguel	São Miguel	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Borda da Bacia; ampliação do Sistema de água
Inhangapi	Inhangapi	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Redefinição do manancial para captação de água
Santa Izabel	Santa Izabel	NE	Bacia Sedimentar do Pirabas	X		Redefinição do manancial para captação de água
Mosqueiro	Belém	NE	Bacia Sedimentar do Pirabas	X		Redefinição do manancial para captação de água
Icoaraci	Beém	NE	Bacia sedimentar do Pirabas	X		Ampliação do Sistema de captação de água
Rondom do Pará	Rondom do Pará	NE	Bacia Sedimentar do Maranhão	X		Redefinição de captação de água
Bom Jesus do Tocantins	Bom Jesus do Tocantins	SE	Bacia Sedimentar do Maranhão	X		Substituição de captação de água superficial por subterrânea
Apeú - São Salvador	Vizeu	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Influência de salinização das águas subterrâneas
Mãe do Rio	Mãe do Rio	NE	Bacia Sedimentar Maranhão-Pirabas	X		Instalação Sistema de água
Irituia	Irituia	NE	Bacia Sedimentar Maranhão-Pirabas	X		Ampliação do Sistema de água
Curionópolis	Curionópolis	SE	Craton Amazônico Amazônico	X	X	Instalação do Sistema de água de água
Alter do Chão	Santarém	NW	Bacia Sedimentar do Amazonas	X		Instalação do Sistema de água
Rurópolis	Rurópolis	NW	Borda Sul da Bacia do Amazonas	X	X	Ampliação do Sistema de água
Uruará	Uruará	NW	Borda Sul da Bacia do Amazonas	X	X	Implantação do Sistema de água
Pacajá	Pacajá	NW	Craton Amazônico Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água de água
Anapu	Pacajá	NW	Craton Amazônico Amazônico	X	X	Ampliação do Sistema de água de água
Bom Jardim	Pacajá	NW	Craton Amazônico Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água de água
Nazaré	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Tuerê	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Maracajá	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do sistema de água
Belo Monte	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Bela Vista	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Novo Repartimento	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Ampliação do Sistema de água
Brasil Novo	Brasil Novo	NW	Borda Sul da bacia do Amazonas	X	X	Ampliação do Sistema de água
Altamira	Altamira	NW	Borda Sul da Bacia do Amazonas	X	X	Substituição do manancial superficial por subterrâneo
São João do Araguaia	São João do Araguaia	SE	Faixa Araguaia	X	X	Ampliação do Sistema de água
Diamante	São João do Araguaia	NE	Faixa Araguaia	X	X	Implantação do Sistema de água

2 - METODOLOGIA

2.1 ELETRORESISTIVIDADE - FUNDAMENTOS DO MÉTODO

A operação com o método de eletroresistividade consiste em injetar corrente contínua (ou alternada de baixa de frequência) em dois pontos do terreno e medir a diferença de potencial entre outro dois pontos da superfície. O dispositivo de medida comporta uma linha AB de envio de corrente e uma linha MN de medida (Figura 2.1).

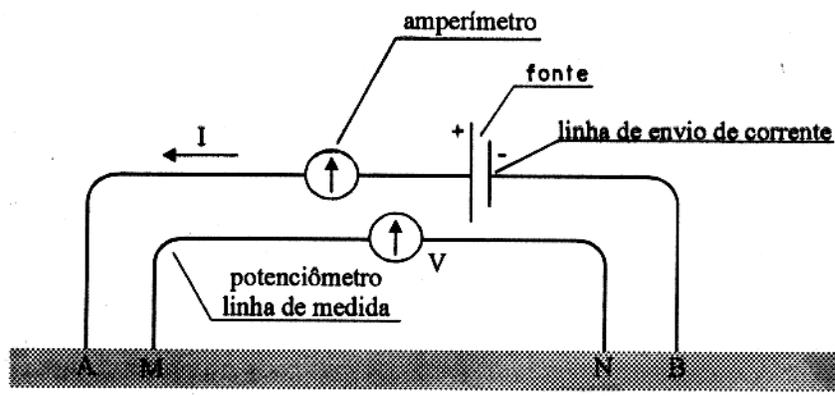


Figura 2.1 - Esquema de funcionamento do método de eletroresistividade. O circuito AB faz o envio de corrente e o MN realiza a leitura da resistividade aparente.

A linha AB se compõe de uma fonte de corrente (pilhas, acumuladores, osciladores ou qualquer outra força eletromotriz de corrente contínua ou de baixa frequência), de dois eletrodos (metálicos) de emissão de corrente cravados no solo e designados pelas letras A e B. Estes estão ligados aos dois polos da fonte por um fio isolante, além de um amperímetro ligado em série no circuito AB, cuja função é medir a intensidade da corrente que circula no circuito constituído pela fonte, pelo fio, pelos eletrodos e pelo solo.

A linha MN de potencial compreende dois eletrodos não polarizáveis ligados ao potenciômetro por um fio isolante. O potenciômetro mede a diferença de potencial entre M e N. O conjunto de todos esses dispositivos constitui um quadripolo AMNB.

No método de eletroresistividade os diferentes horizontes geoeletricos são caracterizados

por suas resistividades. A resistividade de um dado material pode ser definida como sendo a resistência de um condutor feito deste material de comprimento unitário e seção unitária. Dessa maneira a resistividade será função não das dimensões do condutor mas de sua natureza física, permitindo assim caracterizar as diferentes camadas geológicas de uma dada sequência estratigráfica.

Considere um plano horizontal separando dois semiespaços homogêneos e isotrópicos com relação ao parâmetro resistividade elétrica. O conhecimento da corrente injetada (I), da diferença de potencial (ΔV) e das posições relativas dos pontos A, M, N e B permite que se calcule o valor da resistividade do semiespaço abaixo da superfície do terreno. Este problema é uma aplicação da lei de Ohm, cujo equacionamento é dada pela expressão abaixo:

$$\rho = \frac{V}{I}K \quad (2.1)$$

onde K é o fator geométrico do arranjo geral do quadripolo AMNB, dado por:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (2.2)$$

Quando um problema de inversão requer para a caracterização do semiespaço inferior a atribuição de ρ_k parâmetros de resistividades e g_{k-1} parâmetros geométricos, a Equação 2.1 é utilizada através de uma grandeza auxiliar, denominada de resistividade aparente (ρ_a):

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I}K \quad (2.3)$$

onde $\Delta V = f(I, K, \rho_k, g_{k-1})$

A resistividade aparente não se constitui mais em um parâmetro do meio; é uma função que interpretada em conjunto com modelos de constituição do semi espaço inferior, pode fornecer soluções para o problema inverso (MEDEIROS, 1987).

Há dois procedimentos comuns empregados nas medidas de resistividade aparente, usados de acordo com o objetivo de investigar a subsuperfície da terra na vertical ou na horizontal, designados respectivamente de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e de Perfilagem Elétrica de Superfície ou Caminhamento Elétrico (ORELLANA, 1972).

Na SEV, a distância entre os eletrodos de corrente e de potencial são tomados gradualmente crescentes, mantendo-os simétricos em relação a um ponto central, de modo a obter nas medidas de ρ_a a influência dos parâmetros resistivos e geométricos nos diferentes níveis de profundidade, tomadas em um plano vertical que passa no centro do arranjo.

No caminhamento elétrico, os eletrodos de corrente e de potencial, são deslocados lateralmente na superfície do terreno, mantendo-se constante as distâncias entre eles de modo

a obter sobre ρ_a a influência das variações laterais de ρ_i e g_i , a uma dada profundidade, determinada em parte pelas distâncias relativas entre os eletrodos.

Existem varios tipos de arranjos envolvendo os pontos A, M, N e B, empregados nos trabalhos de prospecção elétrica. Um arranjo consiste num esquema de disposição dos eletrodos em superfície de forma a padronizar as relações de distância entre os eletrodos de corrente e de potencial, na obtenção de ρ_a .

Os dispositivos mais usados em eletroresistividade são os colineares Schlumberger, Wenner e Dipolo-dipolo, mostrados esquematicamente, na Figura 2.2.

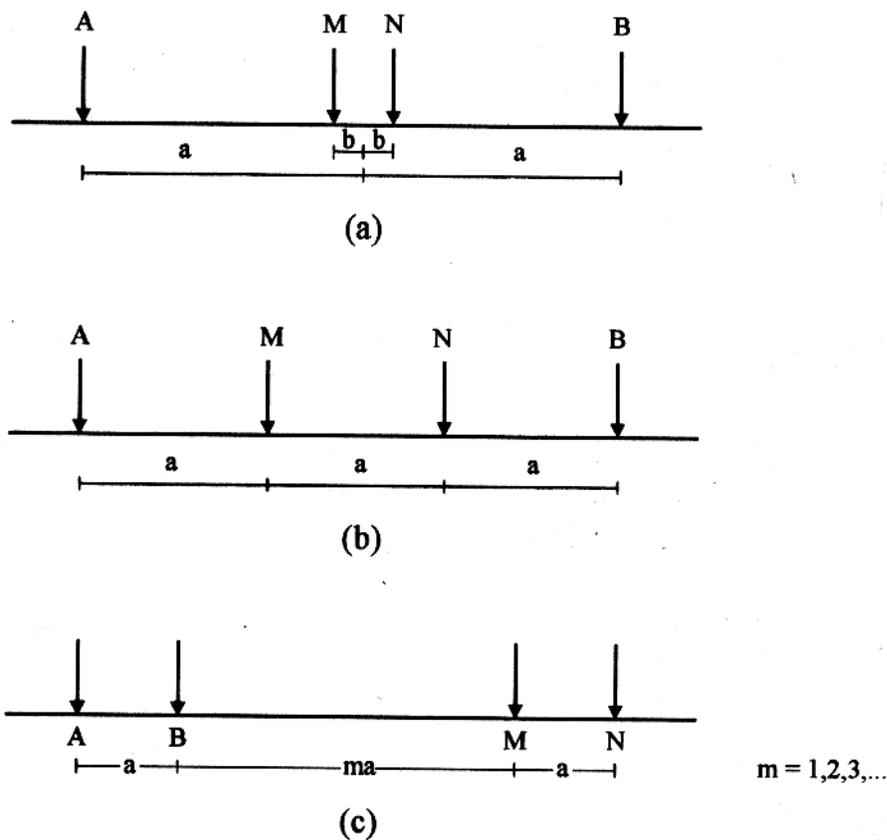


Figura 2.2 - Arranjos usados em eletroresistividade: (a) arranjo Schlumberger, (b) arranjo Wenner e (c) arranjo Dipolo-dipolo.

Os coeficientes geométricos dos referidos arranjos, são dados por:

$$K_s = \pi \frac{a^2}{b} \left(1 - \left(\frac{b}{2a}\right)^2\right) \quad (2.4)$$

$$K_w = 2\pi a \quad (2.5)$$

$$K_d = m(m+1)(m+2)a \quad (2.6)$$

Impondo-se para o arranjo Schlumberger a condição $2a/b > 1$, o fator geométrico é simplificado, de forma aproximada para: $K_s = \pi \frac{a^2}{b}$

O uso do arranjo Schlumberger em trabalhos com SEV é mais difundido, por ser operacionalmente mais simples e mais sensível aos efeitos de variação superficial do solo dos eletrodos de potencial, que tem grandes influências nas medições experimentais de ρ_a . Para a execução de caminhamentos elétricos, a escolha do arranjo é feita dependendo do tipo de estrutura a ser investigada (KELLER & FRISCHKNECHT, 1970; ORELLANA, 1972; KOEFOED, 1979).

Segundo MEDEIROS (1987) e CARRASQUILLA & RIJO (1991), a interpretação quantitativa dos dados de ρ_a é basicamente restrita a modelos unidimensionais (1D) da terra, em face das dificuldades, tanto teóricas quanto operacionais de campo, envolvidas nos problemas geo-elétricos.

2.2 INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA

A quantificação dos parâmetros físicos no tratamento interpretativo de problemas geofísicos segue duas abordagens: a que trata com o problema direto e aquela que usa os conceitos de inversão. GOL'TSMAM (1977) designa, respectivamente, estas duas formas de análise como uma abordagem analítico funcional (determinística) que é mais antiga; e a outra como estatístico - informacional (probabilística) que é mais recente.

LUIZ & SILVA (1995) ilustram a diferença entre as duas metodologias através do seguinte exemplo. Seja um modelo representado pela função $y = ax + b$. No problema direto, os valores dos parâmetros a e b são conhecidos e y , para um x qualquer, é calculado, isto é, o efeito do modelo é calculado a partir dos valores de seus parâmetros conhecidos. No problema inverso, a e b são parâmetros procurados a partir de y , que é conhecido, porque é medido para um determinado x . Neste caso, os valores dos parâmetros do modelo-causa de um determinado efeito, são procurados usando-se medidas desse mesmo efeito.

2.2.1 Método Direto

Neste trabalho mostra-se duas formas de abordagem do método direto no tratamento quantitativo dos parâmetros geoeletricos. A primeira forma, aplica-se em problemas unidimensionais através de um processo iterativo de ajuste de dados reais (dados de SEVs) com dados gerados para um modelo idealizado para representar a subsuperfície, constituído por camadas depositadas horizontalmente e distribuição uniforme de suas propriedades físicas.

Esta abordagem foi realizada através do programa computacional SEV1D (RIJO, 1994a).

A outra abordagem, usando o método direto, foi feita através do modelamento numérico. Neste processo, são construídos modelos simplificados da subsuperfície e previstos seus efeitos nos dados de eletroresistividade. A ferramenta usada nesta análise foi o programa computacional SEV2D, desenvolvido também por RIJO (1994c), com o qual é possível simular tanto modelos unidimensionais quanto bidimensionais. Nas simulações, deu-se ênfase a modelos de aspectos bidimensionais.

Para diferenciar os dois procedimentos de interpretação direta, apresentados acima, adotaremos respectivamente, as expressões Análise 1D e Análise 2D.

2.2.1.1 Análise 1D

O procedimento na interpretação quantitativa dos parâmetros geoeletricos, usando o método direto se constitui num processo comparativo de tentativa e erro, onde se busca o melhor ajuste dos dados de campo com os valores calculados para modelos de parâmetros conhecidos, através do programa computacional SEV1D, elaborado com base na teoria de filtragem linear de GHOSH (1971).

Normalmente, neste processo, as seguintes etapas são seguidas:

- Analisa-se o conjunto de todas as curvas de campo, junto com as informações geológicas com o objetivo de identificar os possíveis horizontes geoeletricos;
- Realiza-se quanto necessário, uma suavização visual das curvas de campo, visando corrigir os saltos devidos às mudanças dos eletrodos de potencial ("embreagens"), ou pequenas distorções introduzidas por outras fontes de ruído;
- Baseado na forma da curva, construída com os dados de campo, idealiza-se um modelo para a subsuperfície constituído por camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas. O número de camadas atribuídas para o modelo, é estimada pelo número de assíntotas definidas na curva;
- De posse do modelo preliminar, faz-se sucessivos ajustes, por tentativa e erro, atribuindo-se valores de resistividade e espessura para as "n" camadas estimadas, até se obter boa superposição entre os dados teóricos e os de campo.

Os valores numéricos, atribuídos aos parâmetros do modelo, que melhor se ajustou aos dados de campo, são tomados como possíveis valores dos parâmetros geoeletricos da subsuperfície investigada.

É notório que os resultados alcançados neste processo, são representações simplificadas da natureza e por conseguinte, todo ajuste de dados de campo a dados teóricos é sempre algo impreciso. Entretanto, a introdução de informações geológicas a priori, pode conduzir a resultados mais compatíveis com a realidade.

2.2.1.2 Análise 2D

A metodologia usada no modelamento numérico, se baseia na construção de modelos matemáticos que possam ser associados a modelos simplificados da natureza e analisar seus efeitos. O programa computacional utilizado nesta análise é de autoria de RIJO (1994c) e é intitulado de SEV2D, com o qual é possível simular modelos geológicos 2D e obter suas respostas para o arranjo Schlumberger.

O algoritmo do programa SEV2D, é baseado no método dos elementos finitos, que é uma técnica de análise numérica capaz de obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas de contorno com as mais complexas geometrias. Segundo RIJO (1977), a premissa básica deste método é que a região de solução pode ser analiticamente modelada ou aproximada, substituindo-se o problema geofísico por um conjunto de elementos discretos, que juntos podem compor uma variedade de formas, usados para representar muitas formas geométricas complexas. Segundo o mesmo autor, a formulação da técnica dos elementos finitos é constituída dos seguintes passos:

- A equação diferencial que governa o problema de contorno é transformada do domínio tridimensional para o bidimensional através da transformada de Fourier.
- A região é dividida em um número finito de subdomínios selecionados na forma de elementos triangulares e/ou quadriláteros (tetraédricos ou hexaédricos). Estes elementos estão ligados em pontos nodais comuns e coletivamente aproximados à forma da região.
- A função contínua desconhecida é aproximada sobre cada elemento por polinômios lineares, que são definidos usando-se os valores nodais da função contínua. O valor da função contínua em cada ponto nodal é denotada como uma variável a qual é determinada.
- As equações para o comportamento dos campos potenciais sobre cada elemento são derivadas da equação de Poisson, usando-se os polinômios lineares definidos e os critérios de Galerkin.
- As regiões de aplicabilidade das condições de fronteiras naturais (tipo Newmann) são estabelecidas.

- As equações dos elementos são convertidas em equações matriciais dos elementos.
- As equações matriciais dos elementos são agrupadas para formar a equação matricial global e também o vetor da fonte é construído.
- As condições de fronteiras tipo Dirichlet são introduzidas.
- O sistema de equações lineares é resolvido.
- Síntese da solução tridimensional através da transformada inversa de Fourier.

É importante esclarecer que para o usuário do programa EGSLIB/SEV2D essas etapas descritas acima, são totalmente transparentes e portanto dispensam qualquer preocupação com as mesmas. Contudo alguma experiência na construção de malhas de elementos finitos é necessário para melhorar o rendimento do programa.

De fato, um aspecto importante nesta técnica diz respeito à construção do modelo discretizado, ou seja, a construção da malha para os elementos finitos. O primeiro passo é decidir sobre a extensão do modelo finito escolhido para representar a região contínua infinita. O objetivo é selecionar uma região o suficientemente grande para garantir que as condições de fronteiras sejam satisfeitas integralmente. Para diminuir o tamanho da malha e consequentemente reduzir o tempo de computação, RIJO (1981), propõe que se use elementos finitos na fronteira. Uma maneira prática de conferir se a malha esta correta é executar um modelo unidimensional e comparar a resposta com o resultado obtido analiticamente pelo método direto.

Na simulação de estruturas inclinadas, utilizou-se uma malha de 935 X 26 nós e nos modelos de estruturas verticais, a malha adotada foi de 511 X 26 nós.

Maiores detalhes sobre a teoria dos elementos finitos podem ser encontradas nos trabalhos de: HUEBNER (1975), RIJO (1977), BECKER et al. (1981), SILVESTER & FERRARI (1983), ROSS (1990) e CARRASQUILLA & RIJO (1991).

2.2.2 Método Inverso

O uso da técnica de inversão na interpretação de dados eletroresistivos começou na década de 70, junto com o desenvolvimento do computador. Seu mérito esta no caráter estatístico dado a interpretação que segundo GOL'TSMAM (1977) resultou numa distribuição mais econômica e racional dos esforços e meios de interpretação de dados geofísicos.

Neste trabalho, o programa de inversão usado na quantificação de SEVs é designado de SEVIDINV. Este programa foi desenvolvido por RIJO (1994b) e se baseia na técnica de "Ridge Regression".

Vários autores (INMAM, 1975; RIJO et al., 1977; PETRICK et al., 1977) justificam o uso do algoritmo de "Ridge Regression" na inversão de dados eletroresistivos unidimensionais, pela sua simplicidade, estabilidade e flexibilidade. Segundo INMAN (1975), o estimador de "Ridge Regression" tem as propriedades do método do gradiente quando o estimador esta longe do mínimo (é sempre possível convergir a um mínimo na soma residual dos quadrados, mas sua convergência é lenta perto do mínimo) e do método de Newton-Raphson quando o estimador esta perto do mínimo (converge rapidamente se o estimador esta perto do mínimo).

Pelton et al. apud CARRASQUILLA, 1984 verificaram que algumas das vantagens derivadas do uso do algoritmo de "Ridge Regression" são:

Estabilidade na presença de ruídos.

Convergência para modelos iniciais extremamente pobres.

Controle estatístico dos parâmetros.

CARRASQUILLA (1984), após utilizar o método de inversão, baseado na técnica de "Ridge Regression", em SEVs realizadas sobre estruturas bidimensionais (paleocanais), na Ilha de Marajó, chama a atenção para a validade de se assumir para dados obtidos sobre região de geologia complexa, com fortes variações laterais nas propriedades físicas, modelos de camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas. Se estes dados 2D são ajustados exatamente com um modelo 1D (sem restrições quanto a geologia), então pode-se acreditar que a interpretação tem pouco valor. Pode-se assim assumir, que apesar de se conseguir um modelo que matematicamente converja e se ajusta aos dados de campo, os parâmetros deste modelo encontram-se altamente comprometidos e a solução não é única.

Mais informações sobre aplicações do método de inversão na interpretação de dados eletroresistivos são encontradas em INMAM et al. (1973), INMAM (1975), WARD et al. (1976), RIJO et al. (1977), CARRASQUILLA (1984) e CARRASQUILLA & RIJO (1991).

O programa de inversão permite um refinamento dos parâmetros geo-elétricos, através de ajustes automáticos. Os dados de campo entram como "input". O modelo inicial requerido para o processo de conversão é aquele obtido pelo método direto que já define o número de parâmetros idealizados para o problema investigado. O número de iterações necessárias para o melhor ajuste bem como sua precisão, dependerão, como demonstrado por CARRASQUILLA (1984), da coerência do modelo inicial usado na interpretação. Nos casos em

que modelos unidimensionais são idealizados para representar a geologia de terrenos complexos, os parâmetros mostram-se altamente correlacionados, induzindo erro de ajuste de até 12 % nos dados, no processo de inversão.

3 - MODELAMENTO NUMÉRICO DE ESTRUTURAS 2D E ANÁLISE DE SUAS INFLUÊNCIAS NA INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DE SEVs

3.1 INTRODUÇÃO

O emprego de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na prospecção geofísica em ambiente geológico simples de camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas é uma técnica de eficácia há muito tempo comprovada. Porém quando o uso da SEV é feita sobre terreno de geologia complexa com fraturas, falhas, zonas de cisalhamento além de outras estruturas, muitas dúvidas ainda pairam sobre a resolução do método em detectar tais estruturas e sobre ambigüidades que este tipo de geologia gera na quantificação de parâmetros geoeletricos (resistividade e espessura) quando interpretados como modelos unidimensionais.

Nos trabalhos de CARRASQUILLA (1984), MEDEIROS (1987), CARRASQUILLA & RIJO (1991), PORSANI & RIJO (1993), nota-se a preocupação dos autores com o uso inadequado de modelos unidimensionais para interpretar problemas geológicos bidimensionais.

CARRASQUILLA & RIJO (1991), trabalhando na identificação de paleocanais na Ilha de Marajó, quantificaram o erro introduzido nos parâmetros geoeletricos, quando é feito o ajuste dos dados de campo, adquiridos sobre estruturas 2D, com modelo simples de estratos horizontais. Para isto, comparou os resultados obtidos pelo método de inversão, que é uma técnica de ajuste 1D, com aqueles gerados por um algoritmo que usa a técnica dos elementos finitos, com o qual é possível simular modelos 2D e calcular suas respectivas respostas. Os índices de erro no ajuste foi em média de 12 %, quando o valor aceitável é em torno de 5 %.

No trabalho de MEDEIROS (1987), foi abordada uma nova metodologia na caracterização de descontinuidades (falhas, fraturas) no substrato cristalino, com aplicação na perfilagem elétrica (caminhamento elétrico). Segundo o referido autor, problemas relacionados a descontinuidades, são de natureza 2D e como tal devem ser interpretados segundo métodos que considerem sua bidimensionalidade. Para este objetivo, foi desenvolvido uma técnica 2D de obtenção de dados, baseada num dispositivo multicabo, adaptado do arranjo Schlumberger. Na interpretação desses dados, o autor desenvolveu um algoritmo baseado no método das

Diferenças Finitas, que assim como o usado por CARRASQUILLA & RIJO (1991), permitia a introdução de variações laterais nas propriedades físicas dos modelos. Os resultados alcançados com esta técnica mostraram erros quadráticos relativos a 15 % nos ajustes de seções de resistividade aparente teóricas e reais.

Neste capítulo analisaremos as influências de estruturas 2D nas curvas de SEVs geradas por dados obtidos com o arranjo Schlumberger, sobre elas ou próximo a elas.

Esta análise é justificada, dada a realidade de muitas campanhas geofísicas serem realizadas dentro de limites urbanos, como as executadas pelo Departamento de Geofísica, dentro do convênio com a FNS, na caracterização de aquíferos subterrâneos, em algumas cidades do sul do Pará. Muitos são os problemas encontrados neste tipo de levantamento, como as restritas disponibilidades de locais adequados para a locação de SEVs, que entre outras exigências, necessita de um terreno plano e de espaço para a abertura dos eletrodos de corrente. Via de regra, as SEVs são realizadas em vias públicas (ruas, avenidas), que dependendo da região podem apresentar uma topografia bastante ondulada além de outro agravante que são os fortes ruídos culturais (rede de alta e baixa tensão, indústrias, posto de combustível e outros). Estes fatores dificultam o uso de técnicas de levantamentos 2D, que exigem determinado espaço para a realização de perfis contínuos. Em muitos casos, a interpretação fica restrita a SEVs isoladas e daí a necessidade de se estudar os efeitos que estruturas 2D têm sobre elas. No Capítulo 4, é apresentada uma metodologia que tenta estabelecer correlações entre as SEVs, apoiadas principalmente em informações geológicas.

A idéia básica da simulação numérica é gerar diferentes modelos geológicos, que apresentem variação de resistividade com a profundidade e na direção de abertura dos eletrodos de corrente. Para cada modelo simulado, o programa calcula a curva de SEV obtida com o arranjo Schlumberger para 21 diferentes aberturas dos eletrodos de corrente ($AB/2$) e para quatro posições diferentes dos eletrodos de potencial (MN), considerando a necessidade prática e teórica das “embreagens” nos trabalhos reais. A Tabela 3.1 mostra os valores de $AB/2$ e os respectivos MN usados no levantamentos que utilizam o arranjo Schlumberger.

Tabela 3.1 - Valores de AB/2 e os respectivos MN usados no arranjo Schlumberger.
As distâncias estão medidas em metro.

	0.5	2.0	5.0	10.0
1.0	X			
1.3	X			
1.8	X			
2.4	X			
3.2	X			
4.2	X			
5.5	X			
7.5	X			
10.0	X			
13.0	X	X		
18.0	X	X		
24.0		X		
32.0		X		
42.0		X	X	
55.0		X	X	
75.0			X	
100.0			X	X
130.0			X	X
180.0				X
240.0				X
300.0				X

3.2 MODELOS GEOLÓGICOS

Neste item serão apresentados os resultados dos modelamentos referentes as estruturas geológicas mais interessantes para a prospecção de água subterrânea.

O procedimento inicial foi idealizar uma sequência de cinco camadas horizontais, isotrópicas e homogêneas sobrepostas a um embasamento resistivo, cujas resistividades e espessuras estão mostradas na Figura 3.1.

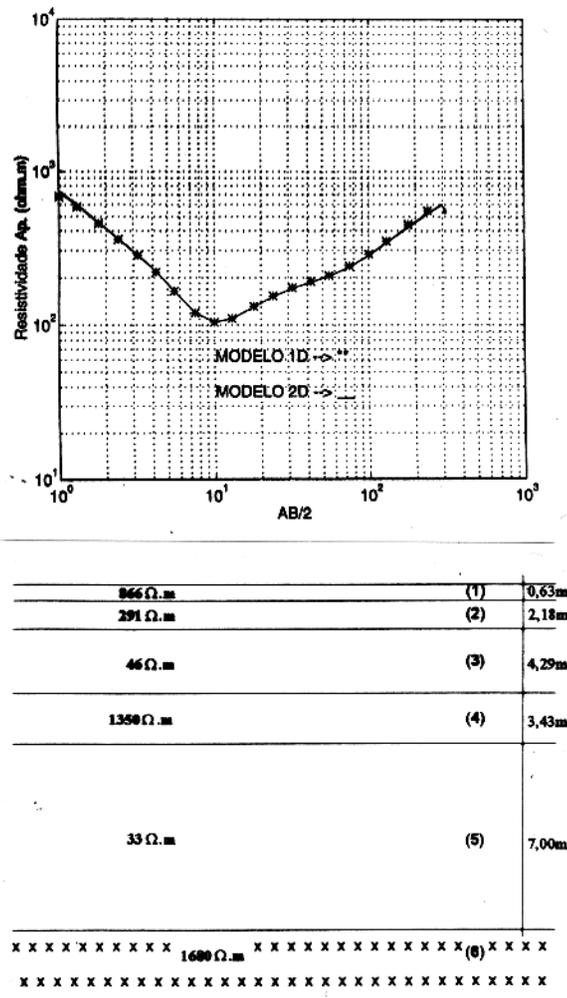


Figura 3.1 - Curvas obtidas por inversão (1D) e pelo modelamento (2D), para um modelo de 5 camadas sobreposta a um embasamento resistivo.

Este modelo serviu para calibrar a malha de elementos finitos a ser usada nos modelos bidimensionais, principalmente no que se referem as dimensões laterais da malha, fazendo a comparação das respostas calculadas pelo programa de inversão SEV1DINV (RIJO (1994))

usada na interpretação 1D de SEVs, com aquelas 2D geradas com o programa SEV2D. Na Figura 3.1 são comparadas as resistividades aparentes, calculadas pelo primeiro processo, com as obtidas no modelamento 2D. Vê-se que para o modelo 1D, não existem diferenças entre os dois resultados, o que demonstra ainda o bom funcionamento do programa SEV2D.

Nos modelos analisados nos subítens subsequentes, estruturas 2D serão introduzidas no meio estratificado e analisada suas influências no padrão das curvas de SEVs, usando como parâmetro de comparação a curva obtida para o modelo 1D, definida nas figuras por asteriscos.

3.2.1 Estruturação no Embasamento

Neste item buscou-se definir as influências das estruturas do embasamento sobre as curvas das SEVs. Com este intuito, analisou-se três estruturas geológicas de mesoescala comuns em vários ambientes: um mini "graben", um mini "horst" e uma sequência de blocos soerguidos e abatidos.

3.2.1.1 Mini "horst"

É uma estrutura gerada por falhamentos se constituindo em bloco elevado. Este modelo pode ser usado também para representar ondulações acentuadas na topografia do embasamento, recoberta por sedimentos, situação comum em regiões de rochas cristalinas. As dimensões do modelo usado nesta simulação, estão mostradas na Figura 3.2. O bloco soerguido eleva-se 11 m em relação ao plano do embasamento, estando o mini "horst" circundado por sedimentos. Entre o topo desta estrutura e a superfície do terreno, há aproximadamente 7 metros. Nesta simulação, o centro da SEV coincide com o plano de simetria do bloco.

Na parte superior da Figura 3.2, estão representadas as curvas das SEVs do modelo 1D e da simulação. Nota-se que para as dez primeiras aberturas de $AB/2$, as duas curvas se sobrepõem, enquanto que para as demais medidas, a tendência da curva simulada é inclina-se com 45° , indicando a proximidade do embasamento. O intérprete baseado apenas nos dados fornecidos por esta SEV não detectaria a presença das camadas 4 e 5, sendo que esta última se constitui em um aquífero em potencial.

A bidimensionalidade do substrato torna-se evidente quando é possível executar um perfil como o mostrado na Figura 3.3. O perfil é constituído de três SEVs, com seus centros estando posicionados a 30 m, 15 m e 0 m do plano de simetria do mini "horst". Nota-se que a 30 m afastada do corpo, a SEV não mostra evidências da presença do mini "horst". A proporção que a SEV é executada mais próxima a estrutura, a curva passa a se modificar. Considerando a simetria do modelo, SEVs executadas diametralmente no lado direito do corpo gerariam curvas semelhantes às apresentadas para o lado esquerdo. Dentro deste raciocínio, seria evidente a presença e a localização da anomalia.

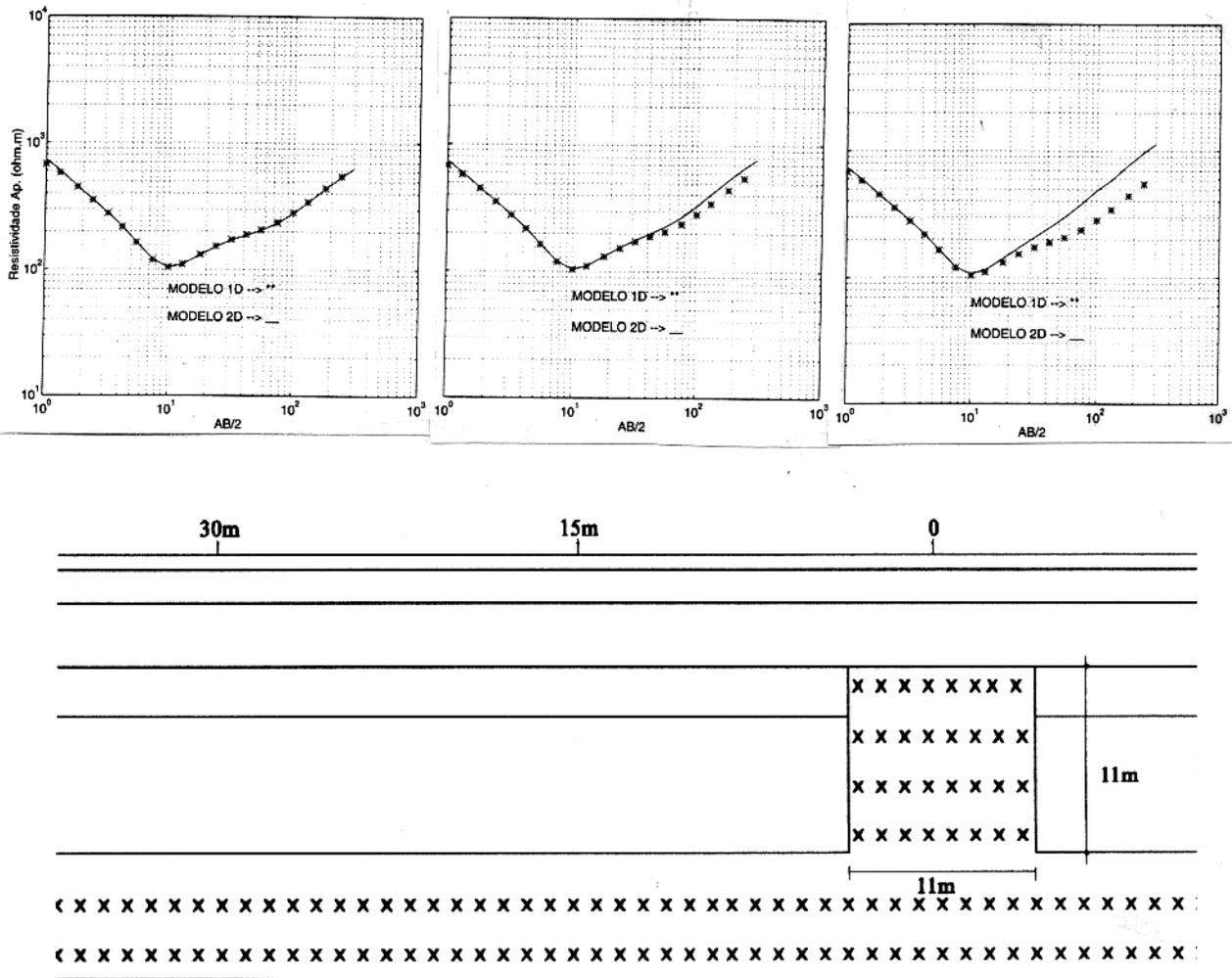


Figura 3.3 - Modelo mostrando seqüência de 3 SEVs espaçadas de 15 m. Note que a bidimensionalidade do meio é identificada nas alterações que as curvas de SEVs sofrem ao longo do perfil.

3.2.1.2 Mini "graben"

A exemplo do mini "horst", o mini "graben" é também uma estrutura tectônica, caracterizado por um vale alargado limitado por escarpas de falhas aproximadamente paralelas (HOLMES & HOLMES, 1987). O graben simulado tem 11 m de largura e 15 m de profundidade, tomado como referência o plano embasamento. Esta pequena depressão se encontra totalmente preenchida por sedimentos de resistividade semelhante ao da camada 5, o que na prática se poderia constituir em um importante reservatório de água, como é mostrado na Figura 3.4.

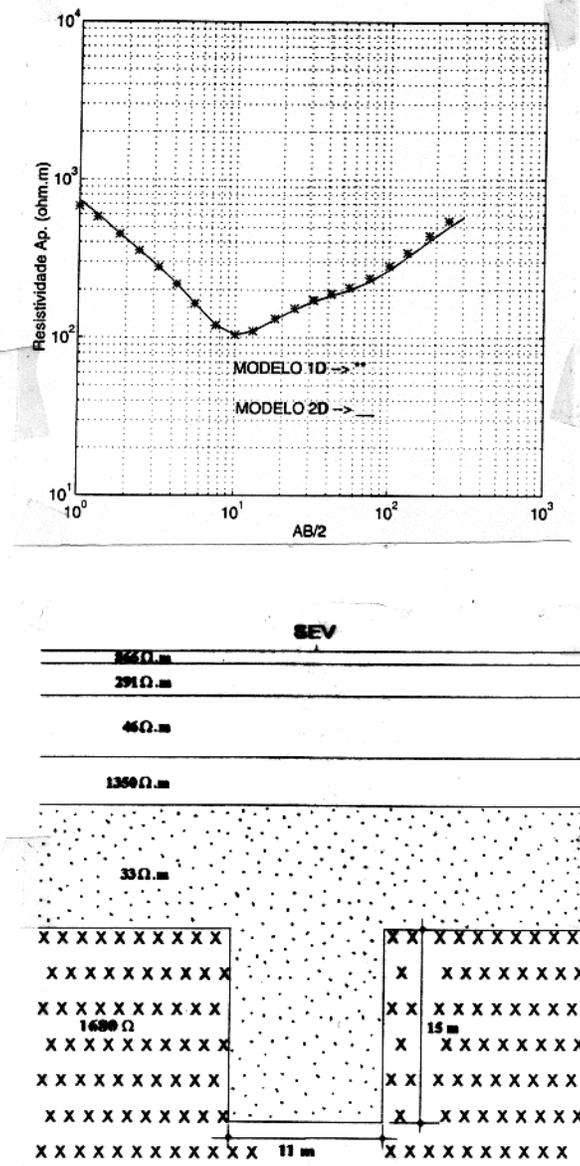


Figura 3.4 - Modelo bidimensional de um mini "graben" e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.

A exemplo do modelo anterior, o centro de SEV coincide com o plano de simetria do "graben". Note, na parte superior da figura, que há completa superposição entre as curvas 1D e 2D para todas as aberturas $AB/2$, mostrando que a presença da estrutura, com as dimensões do modelo, não é detectada pelo método.

3.2.1.3 Sequência de mini "horsts" e mini "grabens"

Analisados separadamente os efeitos que mini "horsts" e mini "grabens" tem sobre as curvas de SEV, faz-se agora a análise da influência que o conjunto dessas estruturas tem nas referidas curvas. Neste sentido é mostrada a Figura 3.5, que mostra uma estruturação complexa do embasamento, constituído por blocos soerguidos e abatidos de diferentes dimensões. Este modelo como os outros dois modelos anteriores, que mostram o embasamento desnivelado, podem entre outros casos, simular uma paleosuperfície erosiva com regiões de diferentes graus de resistência a erosão, resultando em porções elevadas e rebaixadas do cristalino sem necessariamente haver relação com falhamentos. Observe que o bloco soerguido logo abaixo do centro da SEV, tem as mesmas dimensões daquele mostrado na Figura 3.2.

O resultado desta simulação é uma curva semelhante àquela obtida para o primeiro modelo. A distinção entre os dois casos poderia ser feita através de uma perfilagem, considerando que este último modelo não é simétrico e daí resultar diferenças entre os padrões de curvas ao longo do perfil.

Estes resultados mostram a pouca sensibilidade da Sondagem Elétrica Vertical em detectar variações laterais nas propriedades elétricas das rochas em subsuperfície.

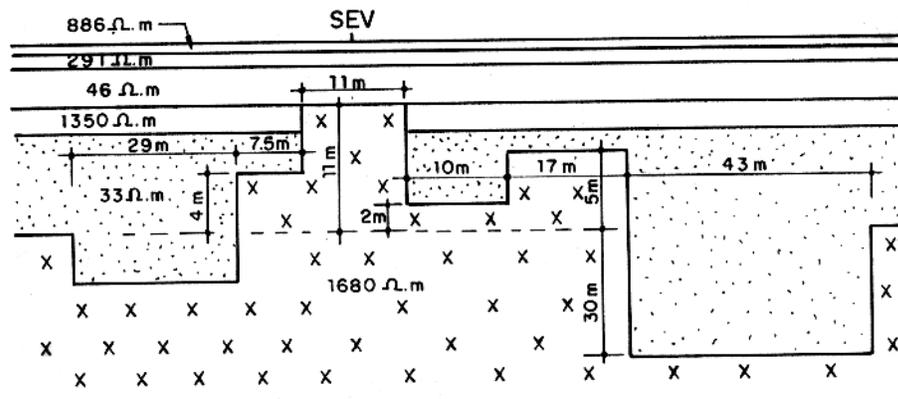
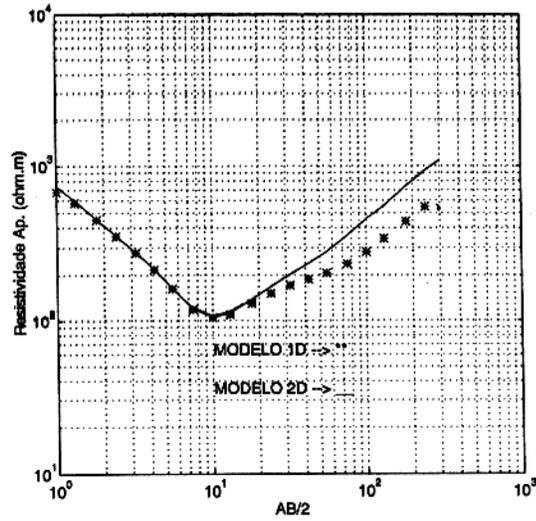


Figura 3.5 - Modelo bidimensional de uma estruturação complexa do embasamento e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.

3.2.2 Falhas Verticais

Falhas são estruturas comuns em diversos ambientes geológicos as quais podem está associadas uma série de feições de interesse para a prospecção. Segundo HOLMES & HOLMES (1987), falhas são descontinuidades que se deslocam uma em relação a outra e podem apresentar rejeitos milimétricos a quilométricos.

Na representação desta estrutura, simulou-se uma falha vertical de movimentação normal com rejeito de 3,19 m, originando-se no embasamento e deslocando a sequência sedimentar sobreposta, conforme pode ser visto na Figura 3.6.

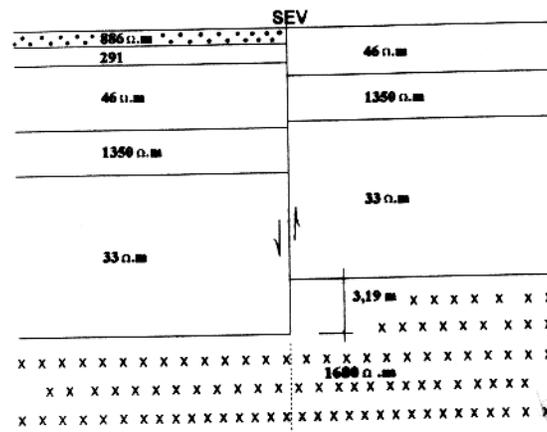
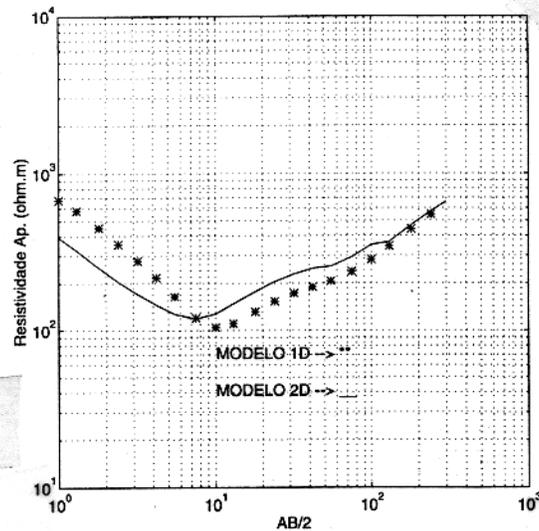


Figura 3.6 - Modelo bidimensional de uma falha vertical com rejeito de 3,19 m e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado.

O movimento dos blocos pôs em contato lateral as camadas 1 e 3, estratos sedimentares com resistividades iguais a 900 ohm.m e 50 ohm.m, respectivamente. O efeito desta estrutura na curva da SEV é visto na parte superior da referida figura . Note que há uma sensível distorção na curva quando comparada com aquela obtida na interpretação 1D.

A questão que surge, é saber qual a contribuição, que a variação superficial na resistividade tem sobre a curva em relação aquela dada pela variação em subsuperfície. Para tentar responder esta questão, elaborou-se os modelos apresentados nas Figuras 3.7 e 3.8.

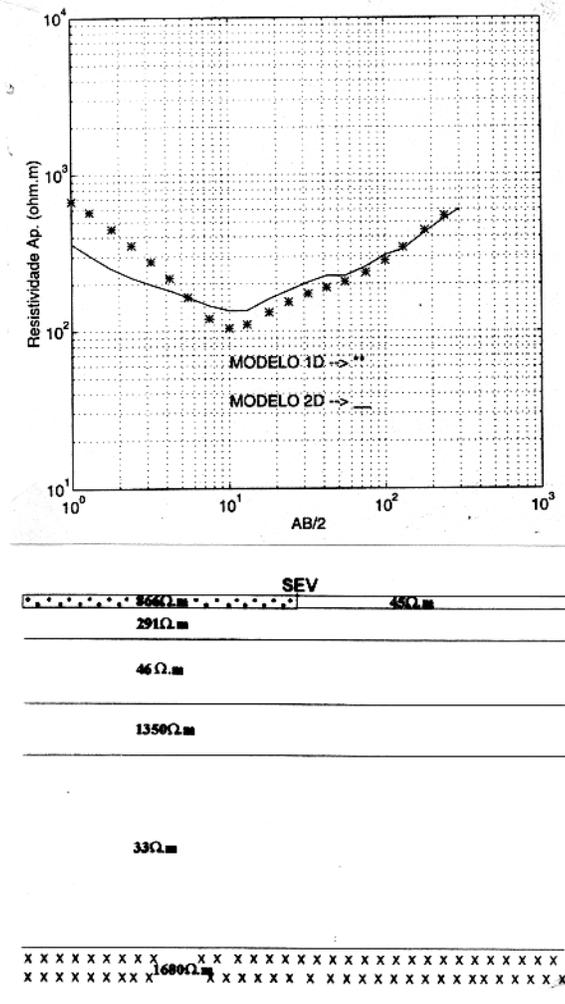


Figura 3.7 - Modelo bidimensional de uma seqüência estratificada com variação na resistividade do manto de intemperismo a partir do centro da SEV e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.

No primeiro modelo, a falha é substituída por uma simples variação na resistividade do manto de intemperismo, com o mesmo constrate resultante do falhamento. A curva que resulta deste modelo é muito semelhante aquela gerada pela movimentação dos blocos.

O próximo passo, mostrado na Figura 3.8, foi manter a falha, recobrimo-a com o manto de intemperismo de resistividade 886 ohm.m e com espessura de 0,60 m.

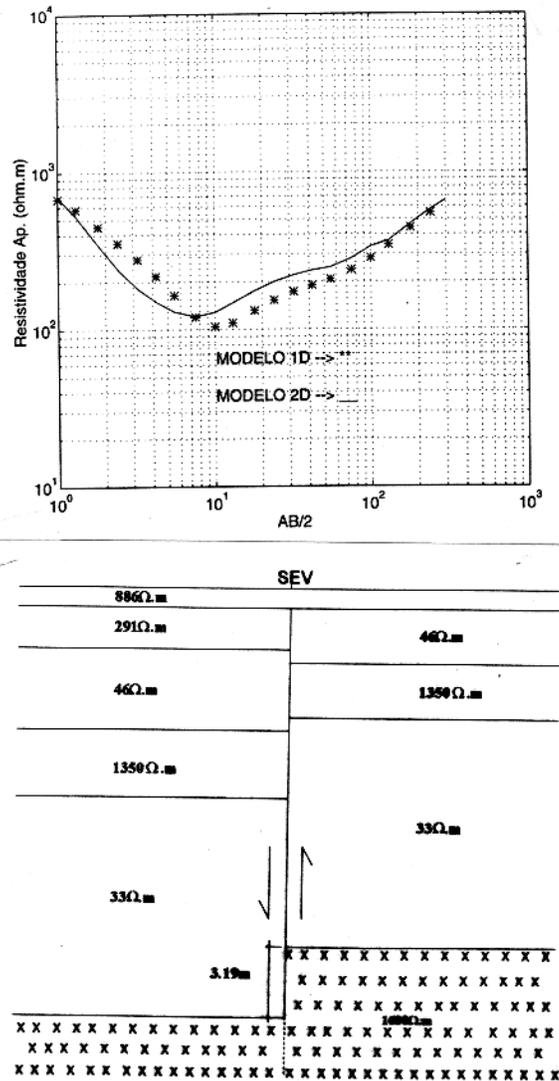


Figura 3.8 - Modelo bidimensional de uma falha de rejeito vertical de 3,19 m, recoberta por manto intempérico de resistividade igual 886 ohm.m e 0,60 m de espessura e sua respectiva SEV comparada com SEV obtida para modelo estratificado 1D.

O que se observa é que nas duas primeiras medidas, as curvas 1D e 2D coincidem, enquanto que para maiores valores de $AB/2$, a curva passa a apresentar distorções semelhantes às observadas nos dois últimos modelos.

As Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 mostram situações semelhantes àquelas observadas nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8, respectivamente, com a diferença que o centro da SEV está deslocado 3,25 m do ponto onde ocorre a variação nos valores de resistividade, seja provocada por falhamento ou por simples alteração nas características do manto de intemperismo.

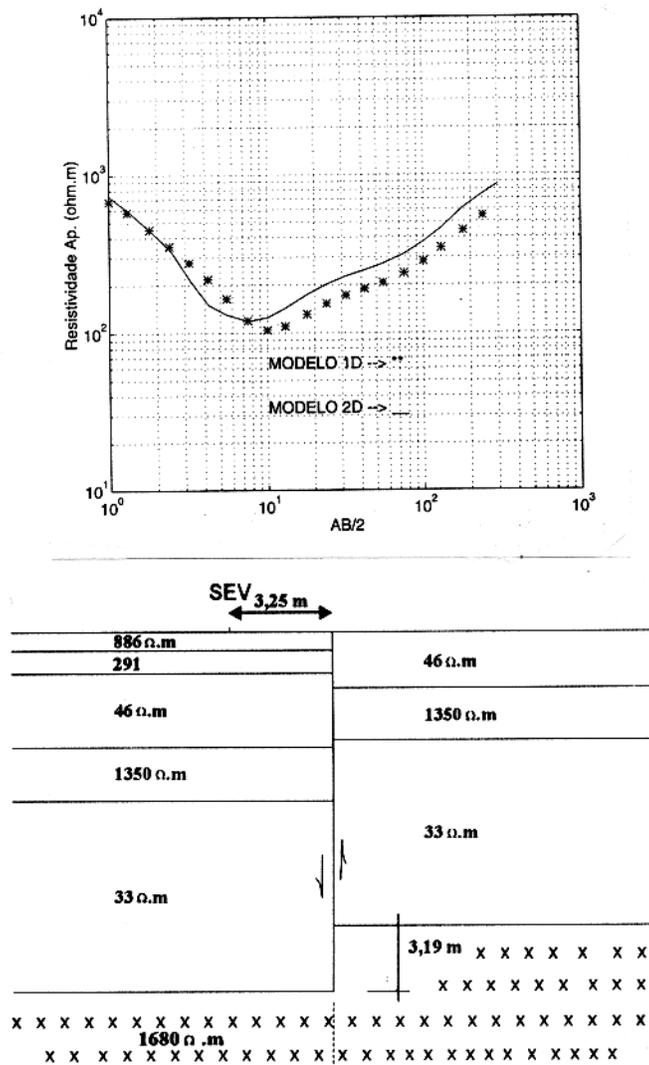


Figura 3.9 - Modelo bidimensional de uma falha vertical de rejeito de 3,19 m distante 3,25 m do centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.

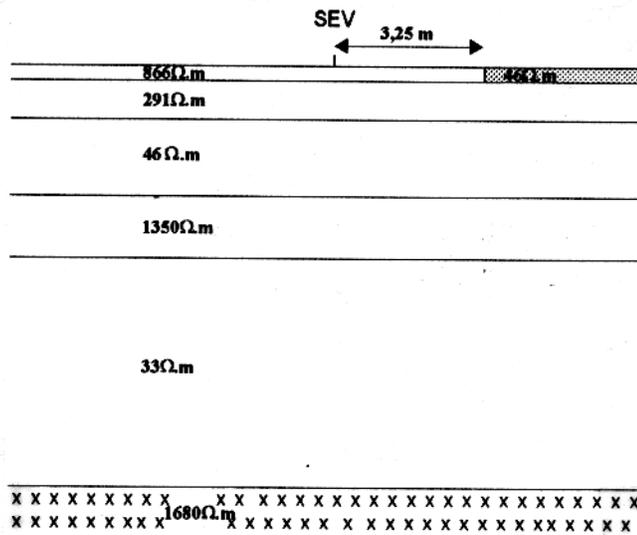
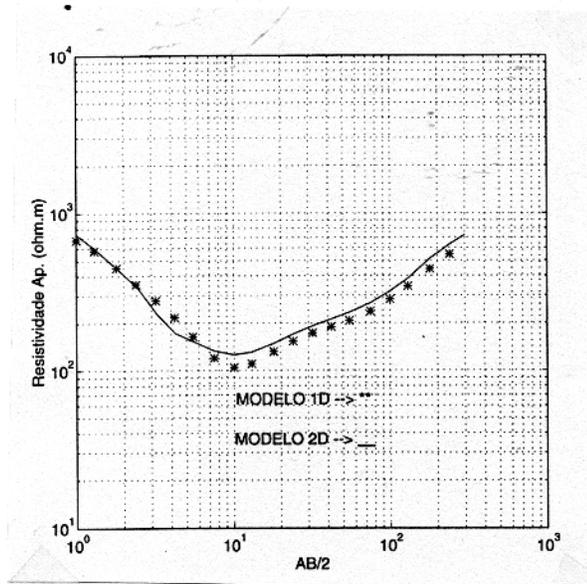


Figura 3.10 - Modelo bidimensional de uma seqüência estratificada com variação na resistividade do manto de intemperismo a partir de 3,25 m do centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.

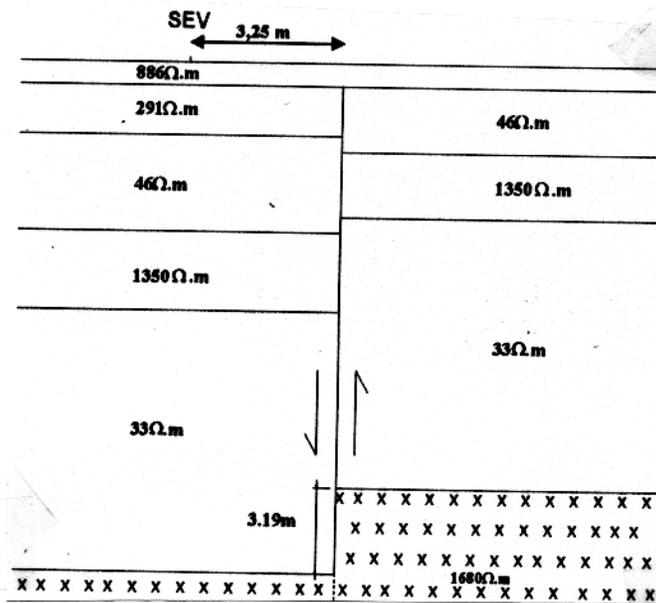
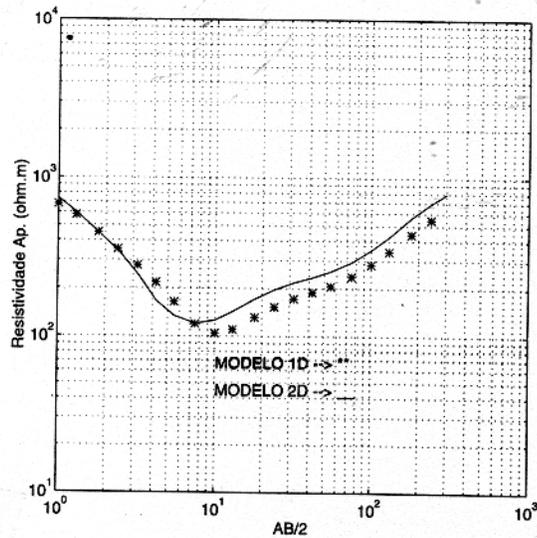


Figura 3.11 - Modelo bidimensional de uma falha vertical com rejeito de 3,19 m, posicionada a 3,25 m do centro da SEV recoberta por manto de intemperismo e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.

Ao se comparar as três curvas, nota-se que a semelhança entre elas é muito maior em relação aos casos em que o centro da SEV coincide com o ponto de transição. Diante destes resultados, fica notório a dificuldade em distinguir a diferença de uma falha, de uma simples variação superficial de resistividade.

3.2.3 Diques

Dique é uma forma comum de intrusão ígnea discordante. Sua principal característica é a forma tabular que frequentemente aparece truncando unidades litológicas mais antigas. A espessura destes corpos é bastante variável, indo de poucos centímetros a dezenas de metros ao mesmo tempo que pode ser mais ou menos resistente aos processos intempéricos, que a rocha encaixante. O interesse da prospecção nesse tipo de estrutura é devido a sua associação com depósitos minerais de sulfetos ou de metais nativos. No caso de prospecção de água subterrânea, diques de baixa resistividade podem simular uma zona de fraturamento preenchida por água, o que se constitui em um importante alvo, principalmente em região de cristalino.

O modelo usado nesta simulação é um dique de 3 m de espessura, com inclinação de 45°, analisado para duas situações diferentes. Na primeira, o dique apresenta resistividade de 1200 ohm.m (Figura 3.12). A presença deste corpo no meio estratificado gera sensíveis mudanças na curva resultante da simulação. Note, na referida figura, que o centro da SEV está posicionado sobre o dique aflorante. Em relação as medidas obtidas no modelamento 1D, a presença de um dique resistivo em subsuperfície, provoca um aumento em todos os valores das resistividades aparentes, omitindo inclusive a presença das camadas 4 e 5.

A outra situação simulada é aquela em que o dique aparece mais condutivo, com resistividade de 120 ohm.m. Este caso é o que apresenta maior interesse, tanto para a prospecção mineral, quanto para a prospecção de água subterrânea. O resultado desta simulação é mostrada na Figura 3.13. O que se observa é uma redução em todas as medidas de resistividades, quando comparadas com aquelas obtidas para o meio estratificado. A forte redução notada nas cinco primeiras medidas, pode ser explicado pelo forte contraste de resistividade entre o dique condutivo e o manto intempérico resistivo. Note que neste caso, a presença das camadas 4 e 5 é sutilmente registrada na curva 2D.

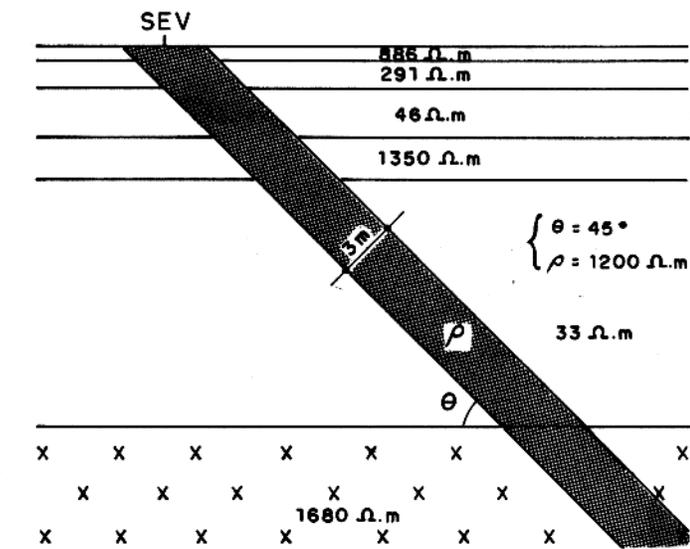
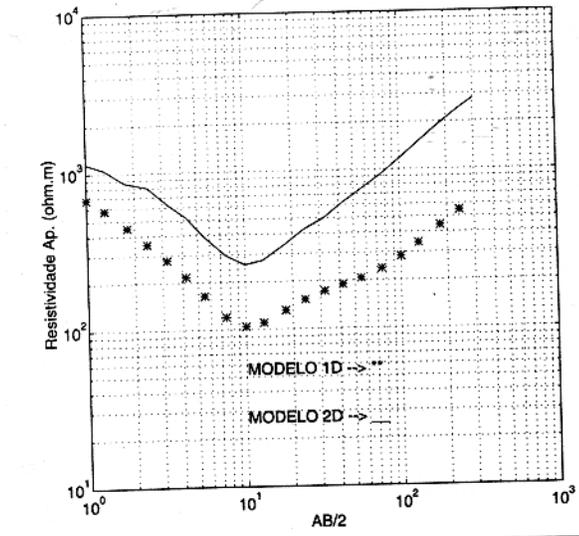


Figura 3.12 - Modelo bidimensional de um dique resistivo inclinado com 45° de mergulho, aflorando no centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificada 1D.

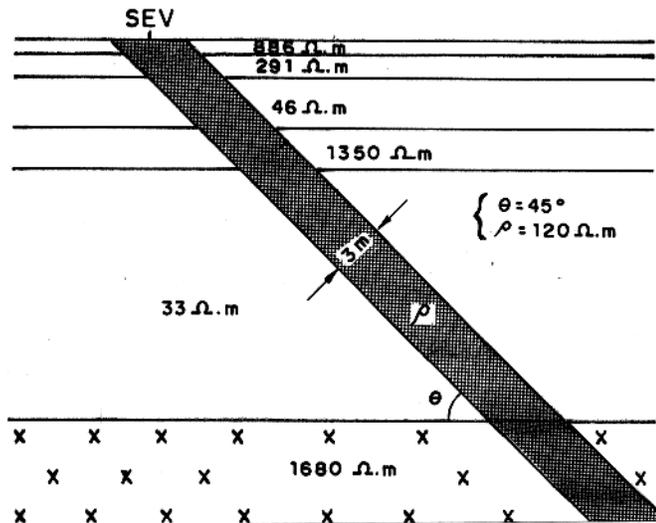
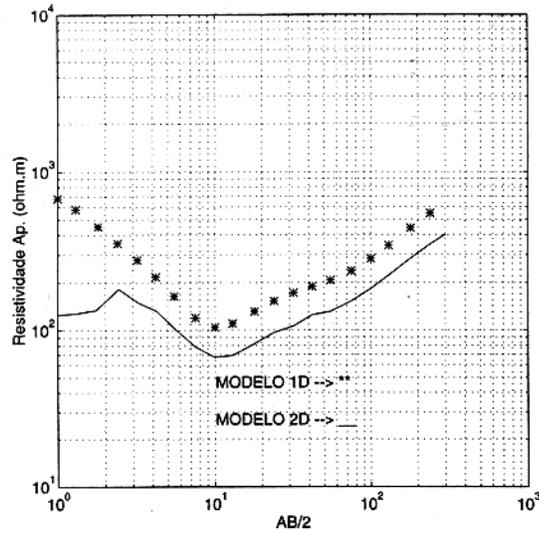


Figura 3.13 - Modelo bidimensional de um dique condutivo inclinado com 45° de mergulho, aflorando no centro da SEV e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.

Outra possibilidade considerada é aquela em que o centro da SEV dista 7 m do local onde aflora o dique, como pode ser vista nas Figuras 3.14 e 3.15. Tanto para o dique resistivo quanto para o condutivo, há tendência das curvas 1D e 2D se sobreporem. Note que a curva 2D apresenta oscilações nas medidas iniciais, para os dois casos, enquanto que os ramos finais, respectivamente, omitem e detectam a presença das camadas 4 e 5, a exemplo dos modelos anteriores.

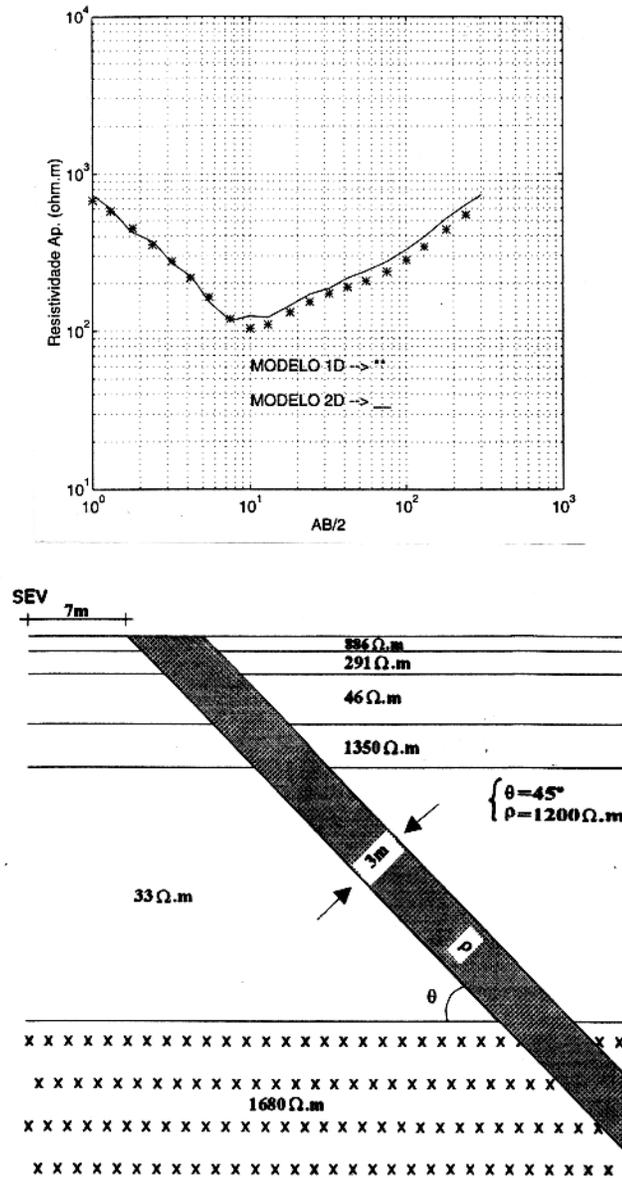


Figura 3.14 - Modelo bidimensional de um dique resistivo inclinado com 45° de mergulho aflorando a 7 m do centro da SEV, e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.

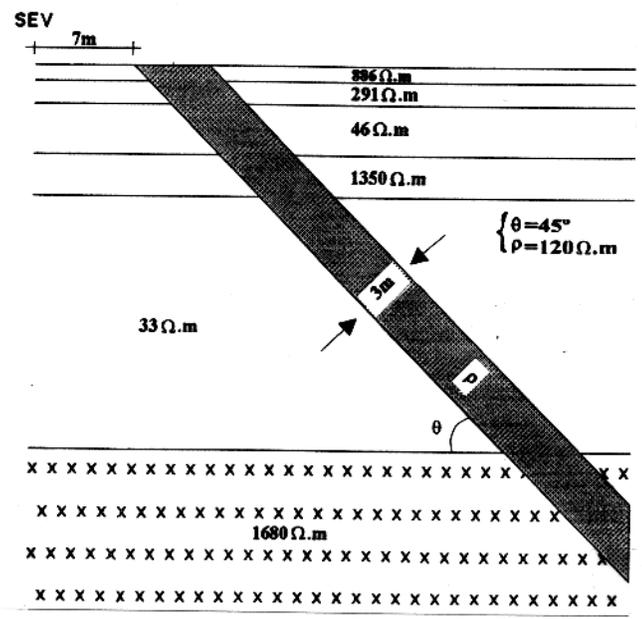
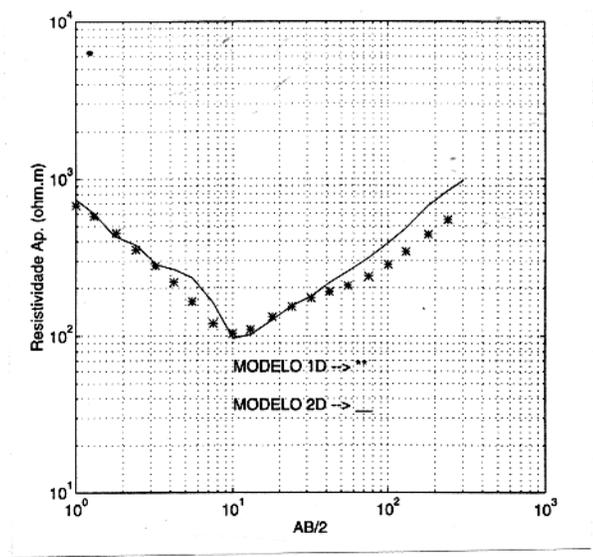


Figura 3.15 - Modelo bidimensional de um dique condutivo inclinado com 45° de mergulho aflorando a 7 m do centro da SEV, e sua respectiva curva comparada com aquela obtida para modelo estratificado 1D.

4 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A sede do município de São Domingos do Araguaia, está situada a aproximadamente 48 km a SE da sede do município de Marabá (Figura 4.1), no sudeste do Estado da Pará, próximo a região do Bico do Papagaio que marca os limites entre os Estados do Maranhão, Tocantins e Pará, dentro do contexto da Folha Marabá (SB-22-X-D). A cidade de São Domingos do Araguaia tem altitude média de 145 m e tem como coordenadas geográficas 5°32'12" de latitude sul e 48°43'50" de longitude oeste WGr.

O acesso a essa localidade pode ser feita por vias fluvial, aérea, rodoviária ou ferroviária.

O acesso fluvial pode ser feito tanto pelo rio Tocantins quanto pelo rio Araguaia, navegáveis em qualquer época do ano para barcos de pequeno e médio portes. Os portos de referência são o de Marabá e o da cidade próxima de São João do Araguaia, localizados na margem esquerda dos referidos rios.

O acesso por via aérea pode ser feito por vôos comerciais regulares (VARIG e BRASIL CENTRAL) até a cidade de Marabá, ou por aviões monomotores e bimotores que utilizam para pouso a pista da cidade de São João do Araguaia ou outras instaladas em algumas fazendas da região.

Partindo de Belém, o acesso rodoviário pode ser feito tanto pela rodovia estadual PA-150 até a cidade de Marabá, num percurso de 540 km feito em estrada asfaltada, ou através da rodovia federal BR-010 (Belém - Brasília) até a cidade de Dom Elizeu. Desta cidade a Marabá, o percurso é feito pela estrada cascalhada PA-332. De Marabá a São Domingos do Araguaia, são percorridos 45 km ao longo da rodovia Transamazônica (BR 230), no sentido leste, e mais 5 km na rodovia PA-153 (antiga OP-2, estrada construída pelo exército, em 1972, para combater os focos de guerrilha na região do Araguaia), que inicia às margens da Transamazônica e interliga o município aos de São Geraldo e Brejo Grande do Araguaia.

O acesso ferroviário é realizado através da estrada de ferro Carajás-Ponta da Madeira, que liga a cidade de Marabá a Serra dos Carajás e ao Porto de Itaqui, na cidade de São Luiz (MA).

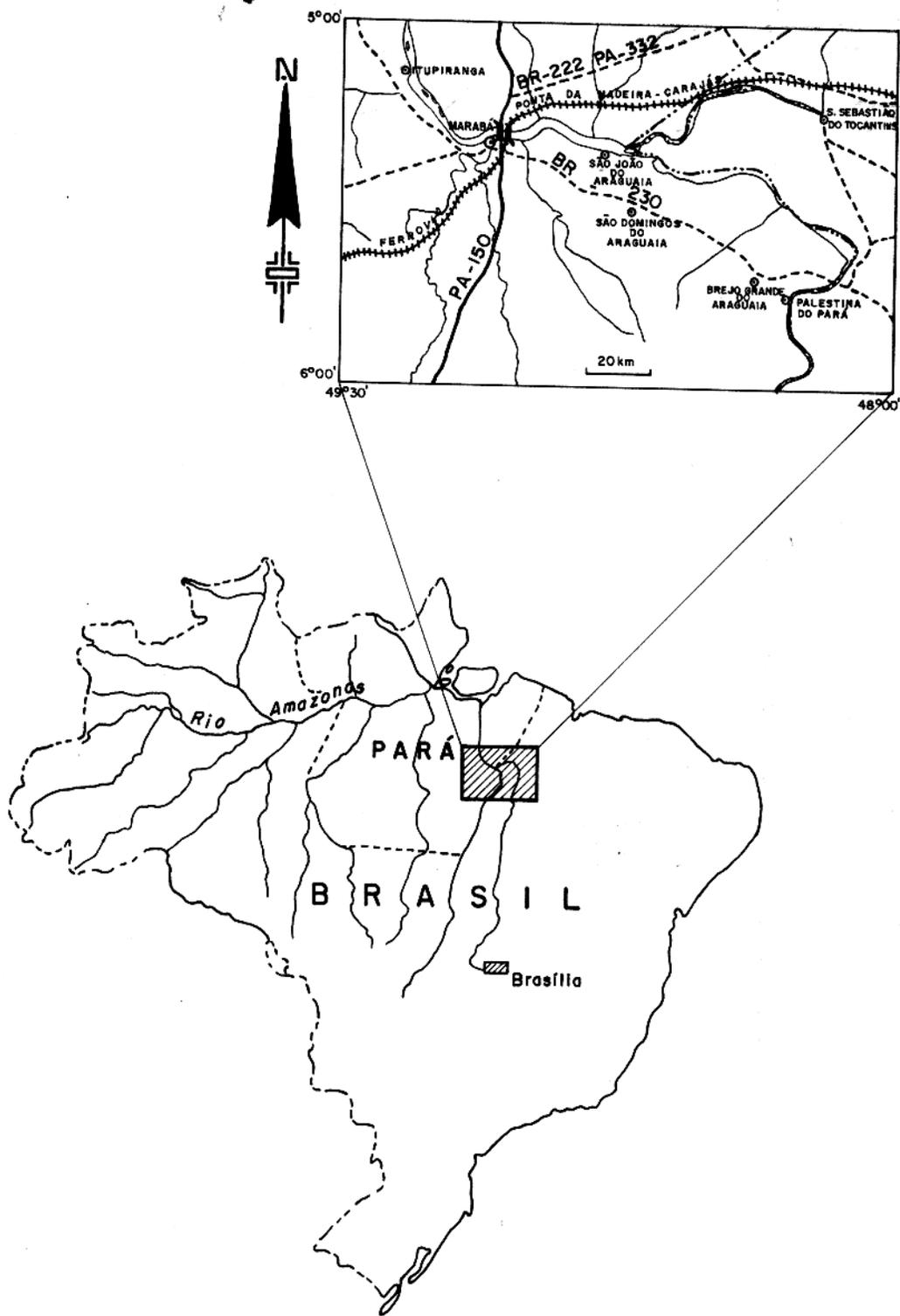


Figura 4.1 - Mapa de Localização

4.2 FISIOGRAFIA

A cidade de São Domingos do Araguaia está dentro dos domínios do subtipo climático Aw da classificação de Köppen que pertence ao clima tropical chuvoso, caracterizado por apresentar temperatura média mensal superior a 18° C. MARTORANO et al. (1993) realizaram estudos detalhados do clima no Estado do Pará, adaptando o método de Köppen. Concluíram, usando como critério básico o índice pluviométrico, que o subtipo climático Aw pode ser subdividido em três unidades: Aw3, Aw4 e Aw5. A área em estudo está sobre influência do subtipo Aw5, caracterizado por apresentar inverno seco bem definido com precipitação média mensal inferior a 60 mm e o menor índice pluviométrico do Estado, compreendendo valores que estão entre 1000 mm a 1500 mm.

Os referidos autores realizaram ainda estudos da deficiência hídrica anual do Estado, baseado no método de Thornthwaite & Mather, que trata a água do solo como uma grandeza contabilizável, permitindo estimar a umidade disponível no solo, ao longo do ano, considerando a relação entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração potencial. Um dos resultados deste trabalho foi a definição de um “corredor seco” na porção leste do Estado, de direção NE-SW, dentro do qual se situa a cidade de São Domingos do Araguaia. Esta região apresenta a maior deficiência hídrica do Estado com déficit variando entre 400 mm a 500 mm, concentrado em um período de seis a sete meses (inverno e primavera).

Os solos do município de São Domingos do Araguaia são caracterizados pela presença dos Podzólicos Vermelhos Amarelos, Litólicos Distrófico, Gleys, Aluviais e Areia Quartzosa Distrófica. Há também a presença de lotossolos Vermelhos Amarelos, associado a Gley pouco húmido (LIRA et al., 1993).

Dois tipos de relevos caracterizam a área de estudo: colinas de topos arredondados e amplas colinas dissecadas de topos suavizados. O primeiro tipo de relevo se desenvolve sobre rochas pré-cambrianas da Faixa Araguaia, enquanto a morfologia mais suave é sustentada pela formação sedimentar Itapecuru da Bacia do Parnaíba. Segundo BOAVENTURA (1974), estas unidades morfológicas estão dentro da abrangência da Depressão Periférica do Sul do Pará e seriam resultado da atuação de processos erosivos pós-pleiocênico que elaboraram uma ampla faixa de circundesnudação nas periferias da Bacia do Parnaíba.

A vegetação natural da referida área é segundo VELOSO et al. (1974) do tipo Floresta Aberta onde predominam espécies como o babaçu (*Orbignya martiana*) e uma variedades de espécies arbustivas e cipós. Intercalada nesta vegetação aparecem “manchas” de florestas densas caracterizada por vegetais de grande porte como a castanheira (*Bertholetia excelsa*), que aparecem principalmente junto aos vales dos rios ou nas encostas das colinas. Nos últimos

anos, com a expansão das atividades agropastoris e da indústria madeireira na região, vem ocorrendo um intenso processo de substituição da cobertura vegetal natural por pastagens ou por vegetação secundária.

No aspecto hidrográfico, o Igarapé dos Veados, um dos afluentes do lado esquerdo do rio Araguaia, é o curso d'água mais importante próximo a cidade de São Domingos do Araguaia, distando desta aproximadamente 5 km. Outros pequenos córregos drenam a região como o Acaizal que cruza longitudinalmente a cidade. Durante os meses mais secos, estes córregos são as únicas fontes de água de que se servem a população mais carente.

4.3 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

O município de São Domingos do Araguaia, cujo nome vincula-se ao santo padroeiro local, São Domingos Gusmão, foi criado pela Lei 5706, de 27 de Dezembro de 1991, a partir da área desmembrada do município de São João do Araguaia. Sua sede está localizada a 5 km das margens da rodovia Transamazônica e a 48 km da sede do município de Marabá.

A população do município é de 16500 habitantes, segundo estimativas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), para o ano de 1995, composta basicamente de maranhenses, em decorrência do intenso fluxo migratório, que ocorreu em direção a esta área, após a construção da Transamazônica e da política de colonização que se associou a esta rodovia, no início da década de 70 (LIRA et al., 1993).

Segundo dados da FNS (Fundação Nacional de Saúde) de julho/92 apud LIRA et al., 1993, existem na sede municipal 1929 prédios, para uma população de 6900 pessoas. Os prédios de alvenaria se concentram principalmente no centro da cidade, enquanto que na periferia, predominam prédios construídos com madeira ou barro.

O centro da cidade é a área mais dinâmica do município, onde estão localizadas as agências dos Correios, da CELPA (Centrais Elétricas do Pará), da EMATER (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Pará), o posto telefônico da TELEPARÁ, grande parte do setor comercial, a sede da Prefeitura Municipal e as principais escolas do município. Seus moradores dispõem de fornecimento integral de energia elétrica.

Em São Domingos do Araguaia, além do centro da cidade, são considerados como bairros as áreas denominadas de: Novo São Domingos, Perpétuo Socorro, Liberdade, São Luiz e Moisés, estes últimos criados recentemente.

A expansão urbana da cidade se dá de forma acelerada no sentido norte-sul, havendo sempre a necessidade de desapropriação de novas áreas por parte do poder municipal, pois a

sede encontra-se circundada por propriedades privadas.

O quadro político do município é formado pelo prefeito Moisés Soares dos Santos, pelo subprefeito Raimundo Souza Cruz Filho e por mais nove vereadores.

Segundo LIRA et al. (1993), a arrecadação tributária do município é inferior aos gastos com infraestrutura. A fontes de arrecadação é baseada nos recursos do FPM (Fundo de Participação dos Municípios), do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) e IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano).

A base econômica do município é a produção agrícola, voltada exclusivamente para culturas de subsistência: arroz, feijão, milho e mandioca. Dentre estas, há um expressivo domínio da produção de arroz, comercializada no próprio município.

A pecuária é uma atividade em expansão, sendo desenvolvida de forma extensiva por médios e grandes produtores, sendo o gado destinado exclusivamente para corte. O extrativismo do babaçu e da castanha do Pará, é hoje uma atividade econômica de menor importância.

O setor industrial é muito incipiente, sendo formado por três serrarias, três movelarias, duas panificadoras, uma olaria, duas fábricas de farinha e por dezesseis usinas de beneficiamento de arroz.

O extrativismo mineral se resume a exploração da argila usada na indústria oleira. Todo material usado na construção civil, como areia, barro e pedra, provém de São João do Araguaia.

O setor comercial é significativo, baseado principalmente no comércio varejista.

A cidade conta ainda com cinco hotéis modestos, dois açougues, uma unidade mista de saúde com atendimento médico ambulatorias, um posto de combustível, várias farmácias, uma feira coberta, onde aos sábados, se realiza a feira do produtor.

Não há na cidade serviços bancários e nem judicial, sendo necessário o deslocamento até a cidade de Marabá para realiza-los. Também não existe sistema coletivo de captação e distribuição de água, sendo conseguida por conta de cada morador por meio de poços a céu aberto, tipo "amazônico", poços artesianos - privilégio da população mais abastada - , ou "cacimbas", designação regional para poços localizados em áreas próximas a região de brejo.

A predominância de poços para a captação de água expõe a população a sérios riscos de doenças, justamente por não existir nenhum tipo de tratamento de água e pela facilidade desses poços serem contaminados.

A cidade também não conta com serviços de coleta de lixo e nem de esgoto doméstico.

O setor educacional é constituído de 54 escolas, sendo 20 pertencentes a rede estadual de ensino e 34 à rede municipal. Deste total, 10 escolas estão localizadas na sede do município.

O setor de segurança pública conta com uma delegacia, com um efetivo policial de três soldados militares, que recebe periodicamente a visita de um delegado da polícia Civil, da comarca de Marabá.

O transporte intermunicipal e interestadual é feito por uma única empresa de ônibus, a Transbrasiliana, com linhas regulares e diárias em direção à Marabá ou outros municípios vizinhos. Dentro da cidade não existe linha de transporte urbano e nem carros de aluguel.

As opções de lazer se restringem as festas dançantes, nos finais de semana, animadas por músicas eletrônicas, que acontece nas três danceterias da cidade, a banhos de rio, principalmente na localidade de Apinajés, onde ocorre o encontro dos rios Tocantins e Araguaia, e também em balneários particulares como a "Bica". Os festejos religiosos são outras opções de lazer para a comunidade, principalmente do santo padroeiro, realizado no dia 4 de Agosto, e é precedido de um arraial.

4.4 GEOLOGIA REGIONAL

A região onde se situa a área em estudo, está na transição de duas importantes províncias geotectônicas: a Faixa Orogênica Araguaia e a Bacia Paleozóica do Parnaíba (Figura 4.2). A relação entre as unidades destas províncias se faz por contatos discordantes.

A Faixa Araguaia é segundo HASUI & COSTA (1990), um cinturão de cisalhamento oblíquo cavalgante de baixo ângulo, constituído por um conjunto de rochas supracrustais de "trend" geral de foliação com orientação submeridiana (variando de NNW-SSE a NNE-SSW), resultante do cavalgamento do bloco Parangatu sobre o bloco Araguacema, com idade atribuída ao Proterozóico Inferior a Médio. A movimentação preferencial se deu de SE para NW. Zonas transcorrentes com orientação WNW-SSE são interpretadas como rampas laterais.

Na folha Marabá, segundo ALMEIDA et al. (no prelo), o Cinturão Araguaia é constituído pelas formações Xambioá, Pequizeiro e Couto Magalhães as quais apresentam entre si, uma gradação progressiva de granulometria e composição mineralógica, com aumento de granulação e do grau metamórfico de oeste para leste.

A Formação Xambioá é constituída por um conjunto uniforme de rochas metassedimentares cuja paragênese mineral é indicativa de metamorfismo na fácies xisto-verde médio a alto (xisto a base de quartzo, biotita, muscovita, granada, epidoto e clorita). Outra litologia com ocorrência frequente nesta unidade são anfibólio xistos, entendidos como metavulcânicas máficas intercaladas no pacote sedimentar.

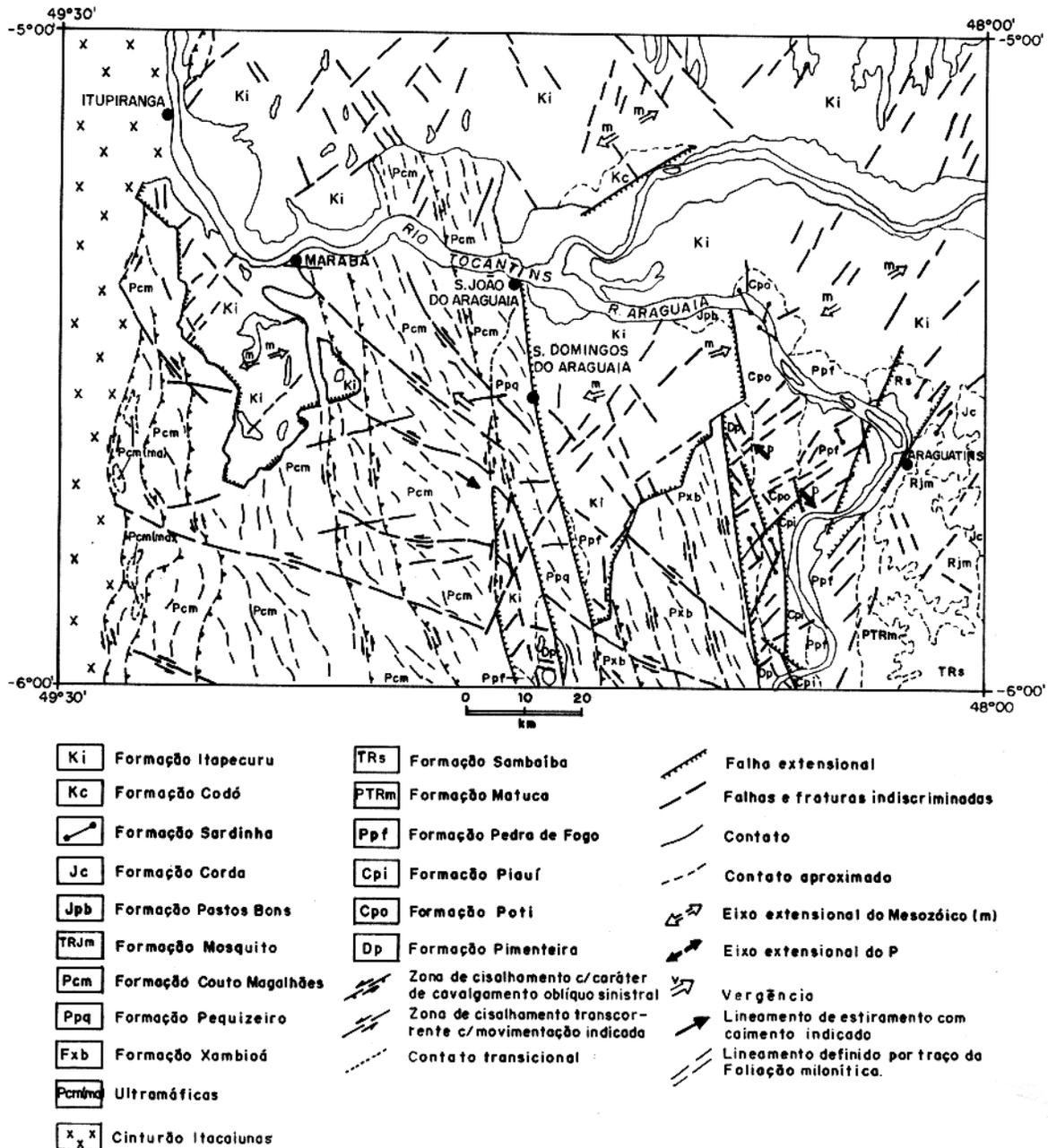


Figura 4.2 - Mapa geológico da Folha Marabá (compilado de ALMEIDA et al., no prelo)

A unidade intermediária, representada pela formação Pequizeiro, ocorre ao longo de uma estreita faixa de direção submeridiana, sendo constituída basicamente por clorita-xistos, de granulação média a fina com coloração esverdeada e tendo cores de alteração amareladas e/ou avermelhadas. Subordinadamente aparecem muscovita-clorita xistos, cujas assembléias minerais apresentam paragêneses relacionadas a fácies metamórfica xisto verde médio a baixo, localmente podendo alcançar graus mais elevados. Texturalmente estas rochas apresentam bandamento composicional paralelo a xistosidade e é marcado por milimétrica intercalação de níveis quartzo-feldspáticos e micáceos.

A formação Couto Magalhães apresenta entre as três unidades, a maior distribuição espacial, incluindo aí a cidade de São João do Araguaia. A transição desta unidade para a anterior é gradacional se dando através de uma zona de cisalhamento com transformações mineralógicas progressivas. Quanto a sua constituição litológica, esta unidade é constituída por filitos, ardósias, xistos (de granulação fina), quartzitos e metacalcários do fácies metamórfico xisto verde baixo a médio alcançando ocasionalmente, o grau anquimetamórfico. Os xistos tem características texturais semelhantes as das rochas da unidade anterior, enquanto as espécies pelíticas tem constituição quase monomineralica, compreendendo essencialmente sericita com algum quartzo disseminado. Os afloramentos desta unidade mostram-se via de regra, bastante intemperizados, face a pronunciada dominância de material pelítico sob a forma de flossilicatos.

Os sedimentos da Bacia do Parnaíba afloram nas partes oriental e norte da área. Esta bacia teve período evolutivo tanto no Paleozóico quanto no Mesozóico. Suas unidades litológicas se relacionam através de contatos discordantes, dos tipos erosivos e angulares, com as rochas proterozóicas da Faixa Araguaia.

O Paleozóico é representado pelas Formações Pimenteiras, Poti, Pedra de Fogo e Motuca, com sedimentação a partir de depósitos de frente deltáica, fluvial, lacustre e planície de maré.

O Mesozóico compreende as Formações Sambaíba, Mosquito, Pastos Bons, Corda, Sardinha, Codó e Itapecuru, formadas por depósitos continentais (fluvial e eólico), marinho (planície de maré) e por magma básico (intrusão e extrusão fissural). Completando o quadro estratigráfico, depositaram-se sedimentos Cenozóicos, representados pelo Terciário (coberturas detríticas e/ou lateríticas) e pelo Quaternário (coberturas sedimentares recentes), distribuído ao longo dos leitos dos rios, lagos e nas planícies de inundação.

Pedreira apud ALMEIDA et al., (no prelo) propôs uma interpretação para a susseção vertical dos sistemas deposicionais dessa bacia, baseada em oscilações do nível do mar ao longo do tempo. Esta interpretação está resumidamente mostrada na Figura 4.3.

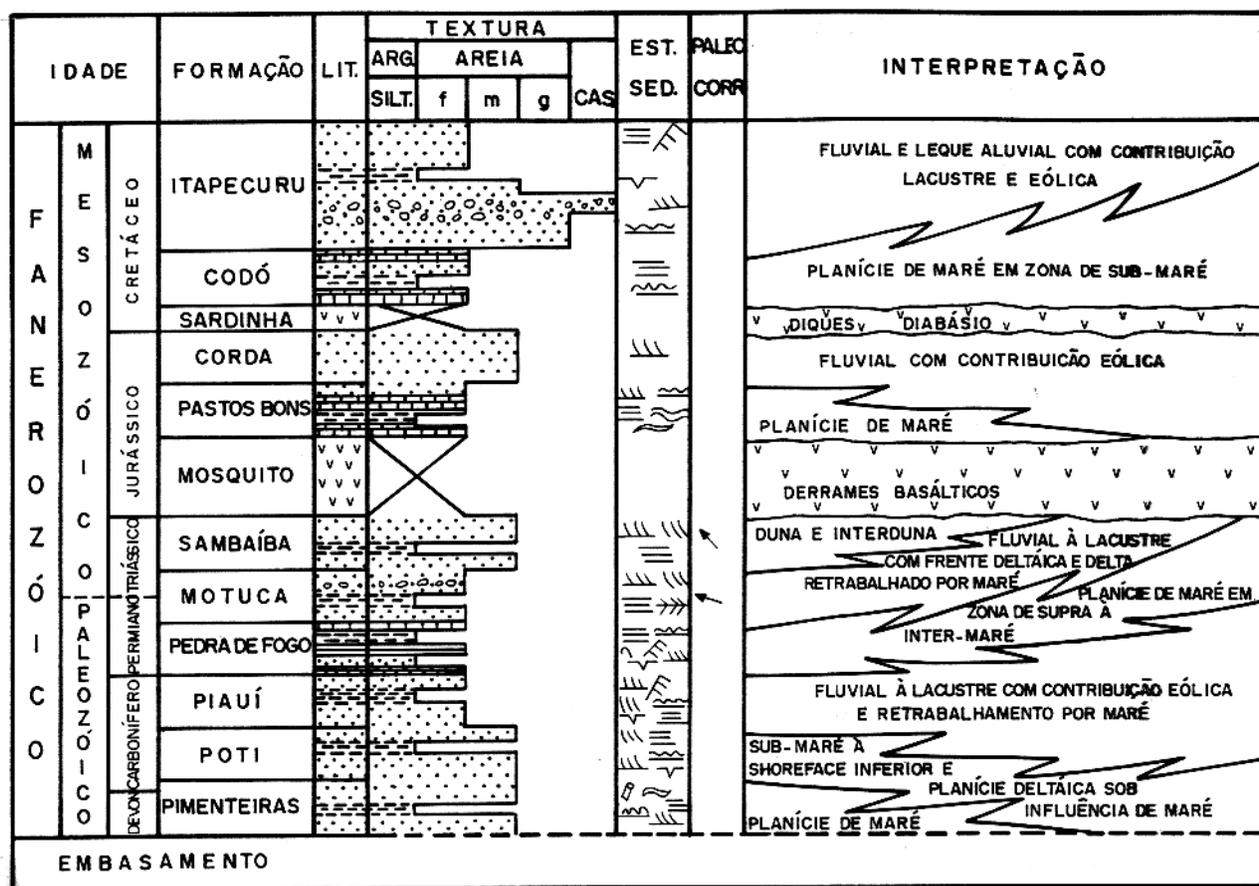


Figura 4.3 - Sucessão vertical esquemática dos sistemas deposicionais da bacia do Parnaíba (Pedreira apud ALMEIDA et al., no prelo)

O arcabouço estrutural da bacia do Parnaíba foi fortemente influenciado por estruturas pré-cambrianas da Faixa Araguaia (COSTA et al., 1991; BORGES et al., 1994). A borda oeste da bacia é marcada por forte anisotropia submeridiana N-S a NNW-SSE que caracteriza os principais conjuntos de discontinuidades. As falhas submeridianas têm caráter predominantemente normal e mergulham forte para ENE. Estas falhas são truncadas por outro conjunto de discontinuidades de orientação NE-SW, posição vertical e caráter transcorrente (BORGES et al., op cit).

Este quadro estrutural é vinculado ao evento de abertura do Atlântico Equatorial (Mesozóico) em um regime extensional oblíquo, com o eixo distensivo posicionado a NE-SE e transporte para NE. Durante o Cenozóico, a bacia sofreu reativação das falhas Mesozóicas, com neoformação de feixes de falhas E-W. O quadro estrutural Cenozóico está ligado a implantação de um regime estrutural transcorrente em função dos campos de tensão intraplacas, gerados pela deriva para oeste da placa Sul-Americana (BORGES et al., 1994).

Dados geofísicos (magnetométricos, gravimétricos e gamaespectométricos) apresentados por MARTINS (1994), para a folha Marabá, corroboram as grandes estruturas regionais detectadas pelo mapeamento geológico.

4.5 GEOLOGIA LOCAL

A sede do município de São Domingos do Araguaia tem aproximadamente 10 % de seu espaço erguido sobre terreno de substrato cristalino (Faixa Araguaia) e os 90 % restante está dentro dos limites de terreno sedimentar (Figura 4.4). A topografia suavizada, em detrimento as colinas onduladas das rochas cristalinas, explicam em parte a preferência da expansão urbana para as áreas de domínio sedimentar.

A Faixa Araguaia está representada por rochas da Formação Pequiizeiro. Trata-se basicamente de clorita-xisto, que aparece em afloramentos naturais (Figura 4.5), ao longo de uma faixa norte-sul, no lado oeste da cidade. Texturalmente, são rochas de granulação média, de coloração cinza esverdeada variando para amarelada nas porções mais alteradas, apresentando xistosidade bem desenvolvida com atitude média da foliação de $N - S/18^\circ E$. O exame de amostras de mão indicam que além da clorita, outros minerais importantes na composição mineralógica da rocha são o quartzo, muscovita e feldspatos.

Nas fases mais avançadas de alteração, o xisto se transforma em material argiloso (Figura 4.6). As condições climáticas da região induzem a intensa oxidação dos minerais de ferro, o que resulta em uma coloração amarelo avermelhada com variação para textura mosqueada. Apesar do intenso processo de obliteração da textura primária do xisto, localmente ainda se preservam o caráter xistoso da rocha, identificado por ondulações do material argiloso.

O terreno sedimentar que ocupa toda porção centro-oriental da cidade, corresponde aos sedimentos da borda oeste da Bacia do Parnaíba que se relacionam através de contatos discordantes com as rochas proterozóicas da Faixa Araguaia.

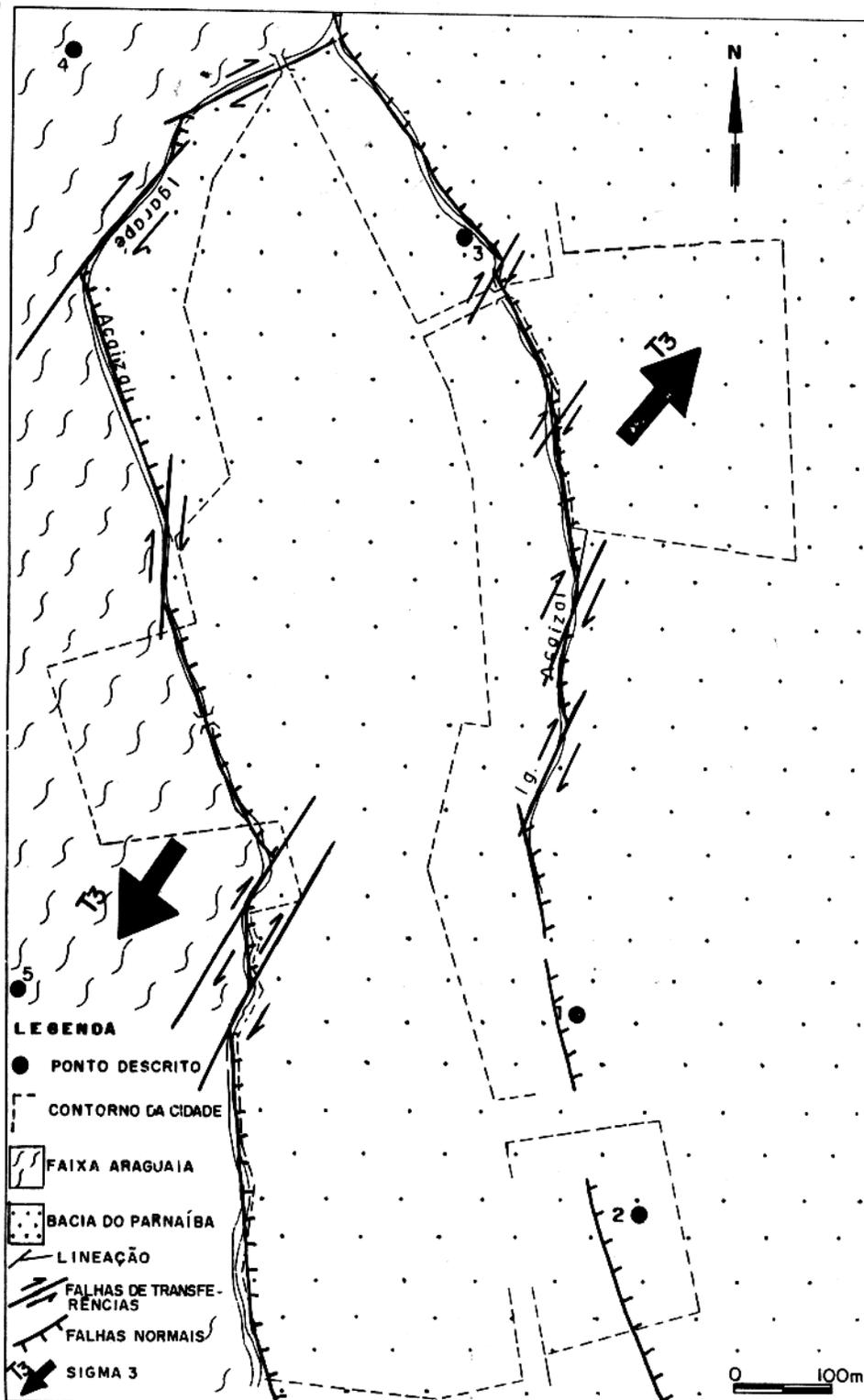


Figura 4.4 - Mapa geológico da cidade de São Domingos do Araguaia. Notar o contato geológico entre a Faixa Araguaia e a borda oeste da Bacia do Parnaíba, definido pelo braço esquerdo do igarapé Açaizal, bem como os padrões de lineações que controlam o leito do referido igarapé.

O mapeamento regional mostra que nesta porção da bacia, predominam sedimentos do Cretáceo Superior, representado pela Formação Itapecuru, descrito por ALMEIDA et al. (no prelo), como uma sequência de arenitos variegados, com intercalações de siltitos e argilitos avermelhados, pouco fossilífero. Os mesmos autores individualizaram dez litofácies nesta formação, agrupadas em duas associações de fácies, para as quais se interpreta como paleoambiente deposicional, um sistema de rios entrelaçados com forte variação de energia e com depósitos eólicos e lacustes associados.



Figura 4.5 - Aspectos texturais e feições de mesoescala dos clorita xistos da Formação Pequiheiro em exposição natural (ponto 05 - Fig. 4.4).

Detalhes mais precisos sobre a sequência estratigráfica da Formação Itapecuru na área de estudo, infelizmente estão restritos às informações de dois afloramentos artificiais, com exposições verticais que não excedem a 6 m.

A sequência estratigráfica mostrada no perfil da Figura 4.7 foi descrita em um barranco de extração de argila, (localização na Figura 4.4 - ponto 01). A sequência, do topo para a base, inicia-se com um lotossolo arenoso pouco espesso, seguida de uma camada areno argilosa de coloração amarelada com espessura de 1,5 m, saturada em água. A camada seguinte corresponde a um horizonte concrecionário formado por concreções arenoferruginosas, de dimensões

centimétricas e decimétricas, envoltos por matriz areno-argilosa com espessura local de 0,7 m, sobreposta a um estrato argiloso de textura mosqueada, com aproximadamente 3,0 m de espessura. Esta argila, de características refratárias, é a matéria prima usada na fabricação de telhas e tijolos pelas olarias da região. A última camada do perfil é composta por areia fina, esbranquiçada, de espessura não definida, também saturada em água correspondendo ao segundo lençol freático. Segundo informações verbais dos moradores, cacimbas construídas junto às áreas de extração são alimentadas por estes lençóis freáticos e permanecem ativos mesmos nos meses mais secos do ano.



Figura 4.6 - Aspecto textural do xisto intemperizado, transformado em material argiloso (ponto 04 - Fig. 4.4).

Perfil semelhante (Figura 4.8) ao descrito acima, foi identificado na escavação de um poço, no bairro Móises (ponto 02 - Figura 4.4), topograficamente acima do ponto anterior. Apresenta a mesma sequência estratigráfica, diferindo apenas nas espessuras das camadas e na inexistência do primeiro lençol freático. Neste caso, é na segunda camada arenosa que se localiza o primeiro lençol freático a uma profundidade média de 5,0 m da superfície, com continuação lateral em vista do fato de outros poços vizinhos terem o nível d'água aproximadamente a mesma profundidade.

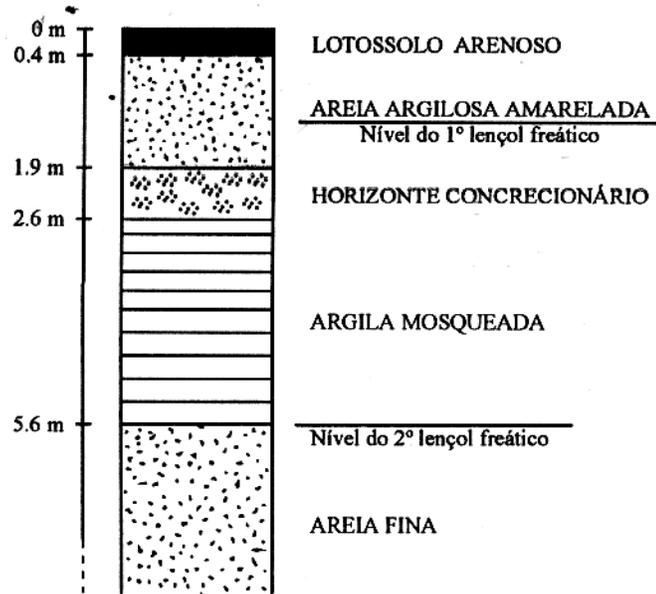


Figura 4.7 - Perfil estratigráfico esquemático mostrando seqüência de estratos horizontais, descrito em um barranco (ponto 01 - Fig. 4.4). Destaque para os dois lençóis freáticos.

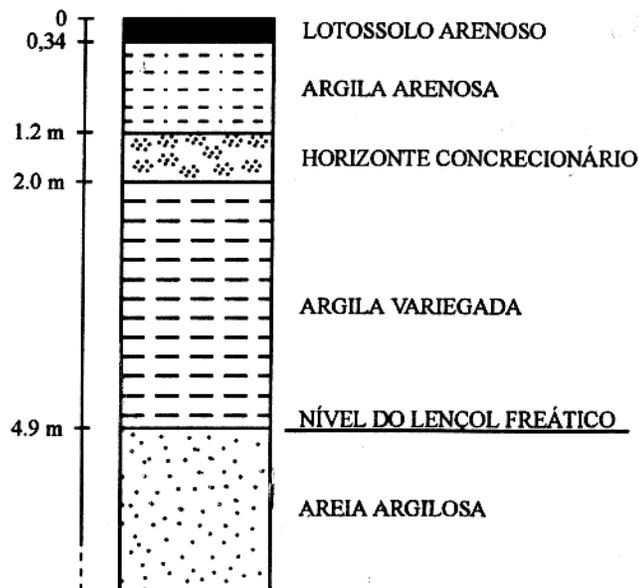


Figura 4.8 - Perfil estratigráfico esquemático, mostrando seqüência de estratos horizontais, descrito em um poço (ponto 02 - Fig. 4.4). Notar a ausência do primeiro lençol freático.

Outra litologia com ocorrência na área, são platôs lateríticos, especificamente às margens do igarapé Açaizal, atrás do hotel São Domingos (ponto 03 - Figura 4.4). A constituição básica desta rocha é areia fina pseudo cimentada por soluções hematíticas, o que dá a ela uma coloração escura e uma textura muito compacta (Figura 4.9). Neste local, a espessura desta camada chega a mais de 3,0 m, chegando a formar uma escarpa retilínea junto às margens do igarapé, com atitude medida de $N10W/75^{\circ}NE$, sugerindo trata-se de uma descontinuidade estrutural, face seu aspecto retilíneo. É provável que represente registros de uma escarpa de linha de falha.



Figura 4.9 - Aspecto textural da horizonte laterítico (ponto 03 - Figura 4.4). Notar a textura escura e compacta da rocha.

O quadro estrutural da cidade de São Domingos do Araguaia é definido apenas em escala regional (ALMEIDA et al., no prelo; BORGES et al., 1994; MARINHO, 1994), pois não há na literatura nenhum trabalho deste cunho em mesoescala, na referida área. Esta análise é ainda dificultada pela inexistência de bons pontos de amostragem e pela impossibilidade de se contar com interpretações de fotografias aéreas. Na caracterização estrutural local da área, basicamente utilizou-se a análise da drenagem, mais especificamente do igarapé Açaizal. O resultado desta análise é identificação de dois conjuntos de alinhamentos, segundo as direções NNE e NE (ver Figura 4.4). Dentro do quadro tectônico regional, estes lineamentos incorporam movimentação normal e transcorrente, respectivamente.

5 - QUADRO HIDROGEOLÓGICO DE SÃO DOMINGOS DO ARAGUAIA

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentaremos os resultados da aplicação da Sondagem Elétrica Vertical na caracterização da geologia de subsuperfície na localidade de São Domingo do Araguaia, cidade sede do município homônimo, localizado no sudeste do Estado do Pará. Os dados de eletroresistividade foram coletados com o uso do arranjo Schlumberger, em pontos localizados dentro dos limites da cidade. O resultado deste estudo, permitiu elaborar um modelo do substrato cristalino e da geometria da camadas que estão sobre o embasamento, útil na definição da estratégia de exploração de água subterrânea na referida localidade.

5.2 PROCEDIMENTO INSTRUMENTAL E DE CAMPO

Durante a etapa de campo foram executadas 39 SEVs em todo o município de São Domingos do Araguaia, incluindo vários povoados como Cuchiú, Vila Nazaré, Vila Açaizal, Vila do 42 e outras. Por motivos de prioridade, iremos utilizar somente 17 SEVs, todas realizadas em locais selecionados dentro da sede do município. Estas SEVs foram executadas com o arranjo Schlumberger, com abertura máxima de AB de 600 m. O equipamento usado foi um resistímetro da marca R 100-A, construído por Geotest Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos. A potência nominal de saída do resistímetro é de 100 W. O intervalo de leitura varia de 0,1 mV a 199,9 mV. O valor máximo de corrente fornecida é de 500 mA.

Quando na execução das SEVs, é necessário tomar alguns cuidados operacionais a fim de minimizar fontes de ruídos que possam contaminar os dados. Neste sentido para evitar a indução eletromagnética no circuito, manteve-se o mais afastado possível os cabos de corrente e de potencial. Outra fonte comum de ruído, são as resistências de contato nos eletrodos de corrente, problema acentuado quando o terreno investigado é capeado por piçarra ou quando se apresenta muito seco. Para minimizá-lo, adotamos o procedimento de enterrar os eletrodos de corrente o máximo possível e por em torno deles água salgada. Teve-se ainda o cuidado de posicionar os eletrodos de potencial em terreno com textura o mais homogêneo possível a fim de se evitar ambiguidades nas leituras das medidas.

Na separação máxima dos eletrodos de corrente, são realizadas quatro mudanças nas posições dos eletrodos de potencial, procedimento conhecido por “embreagem” (ORELLANA, 1972), com superposição de duas medidas. Este procedimento é necessário visando obter melhor sinal nas medidas. Isto permite ainda identificar os efeitos da variação lateral de resistividade nas proximidades do eletrodo de potencial quando por ocasião de mudanças de suas posições.

De modo geral, as condições operacionais não foram ideais, tanto pelo fato de se ter que trabalhar dentro de limites urbanos, onde a presença de ruídos é grande e há forte limitação de espaço para aberturas máximas de AB, quanto pelo fato do resistivímetro usado nas medidas, ser um instrumento de modelo antigo, de potência limitada, principalmente em terrenos resistivos, e com imprecisão de leituras, principalmente nas maiores aberturas de AB.

5.3 RESULTADOS DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS

Os dados geológicos que dispomos da área estudada, apresentados no Capítulo 4, são resultados da descrição de pontos superficiais, feita durante a etapa de campo. Infelizmente não consta na literatura a existência de dados de furos estratigráficos ou qualquer outro informe sobre as características hidrogeológicas de subsuperfície da área em foco ou mesmo nas localidades próximas a ela. Consequentemente, a indisponibilidade de tais informações, não nos permite uma correlação aprimorada entre os horizontes geoeletricos, identificados nas interpretações das SEVs, com as unidades estratigráficas locais.

As posições dos centros das SEVs bem como a profundidade do topo do embasamento, quando foi possível detectá-lo, estão mostradas no mapa na Figura 5.1. Os locais escolhidos para a execução das SEVs, encontram-se sobre terrenos de maior altitude e estão concentradas nas áreas periféricas da cidade onde ainda se encontram ruas que não estão pavimentadas. A direção de abertura das SEVs coincide com a orientação das ruas ou travessas onde foram executadas, uma vez que de fato, as vias públicas são os únicos locais com espaço suficiente para a abertura dos eletrodos de corrente.

Os dados de cada SEV foram interpretados através do emprego de método direto e inverso. No método direto, a interpretação consiste em calcular um modelo teórico a partir de um método numérico que envolve filtros digitais lineares, interagindo através do fornecimento de parâmetros físicos (espessura e resistividade das camadas) e testando visualmente o ajuste com a curva de campo. Na interpretação inversa, usa-se um programa computacional baseado na técnica da regressão múltipla (Ridge Regression), para dados Schlumberger. Neste

programa parte-se de um modelo inicial aproximado, obtido pelo método direto, e a partir dele, iterativamente novos modelos são gerados até atingir certo critério de convergência que minimiza as diferenças entre o modelo e os dados de campo.

Analisando o conjunto de SEVs, percebe-se que a maioria das curvas apresenta uma sequência formada por quatro horizontes geoeletricos. Também notamos que não há uma uniformidade quanto a forma das curvas, mas quase todas elas apresentam um ramo ascendente, próximo a uma assíntota de 45°, nas últimas leituras, indicando a presença do embasamento. Por vezes, há um ramo inicial descendente, devido a presença de um solo seco sobreposto mais úmido e condutor.

A partir da comparação dos resultados das interpretações para cada uma das 17 SEVs estudadas, apresentamos a Tabela 5.1, na qual propomos correlações entre os diferentes horizontes geoeletricos baseado nos valores de resistividade e nas posições relativas entre os mesmos. A atribuição dos parâmetros resistividade e espessura para cada horizonte nas interpretações, são aqueles que consideramos como mais prováveis após o ajuste. No entanto, em várias curvas seria também possível a adoção de outros valores sem que houvesse modificações apreciáveis no resultado do ajuste, dentro da precisão de 5 %. Isto resulta da equivalência elétrica de condutância longitudinal, particularmente quando uma camada condutora encontra-se sobre um estrato resistivo (BHATTACHARYA & PATRA, 1968; ORELLANA, 1972; KOEFOED, 1979).

Tabela 5.1 - Resultado das interpretações das SEVs em São Domingos do Araguaia

CÓDIGO DAS SEVs	ESPESSURA DAS CAMADAS (m)					RESISTIVIDADES DAS CAMADAS (ohm.m)						PROFUNDIDADE DO TOPO DO EMBASAMENTO (m)
	h1	h2	h3	h4	h5	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	
01	.53	4.0		18.0	40.0	4017	4582		567	25	5000	63
02	.43	23.0			75.0	392	1665			21	5000	98
03	.50	21.0			60.0	412	1773			20	5000	82
04	.20	19.0			58.0	1764	1596			19	5000	77
05	.52	2.0	1.5	2.0	40.0	393	2553	89	2373	21	5000	44
06	.85		7.0		99.0	385		72		23	5000	106
07	1.75			5.6	132.0	594			116	48	5000	140
08	1.35			4.7	36.0	526			417	15	5000	42
09	.20			8.0	74.0	115			302	14	5000	82
10	.40	2.0			86.0	1485	5194			64	5000	89
11	1.70			1.7	65.0	1410			557	30	5000	68
12	5.50			15.0	55.0	1060			384	18	5000	76
13	.20			8.0	29.0	283			429	19	5000	36
14	2.29		5.4	36.0		315		39	495	3		> 44
15	.30	2,5	7.6	44.0		353	2255	769	214		5000	54
16	.54	3.0	4.0	34.0		429	1580	292	3002	2		> 57
17	.56	6.0	8.0	15.0	14.0	742	2747	17463	694	4	5000	44

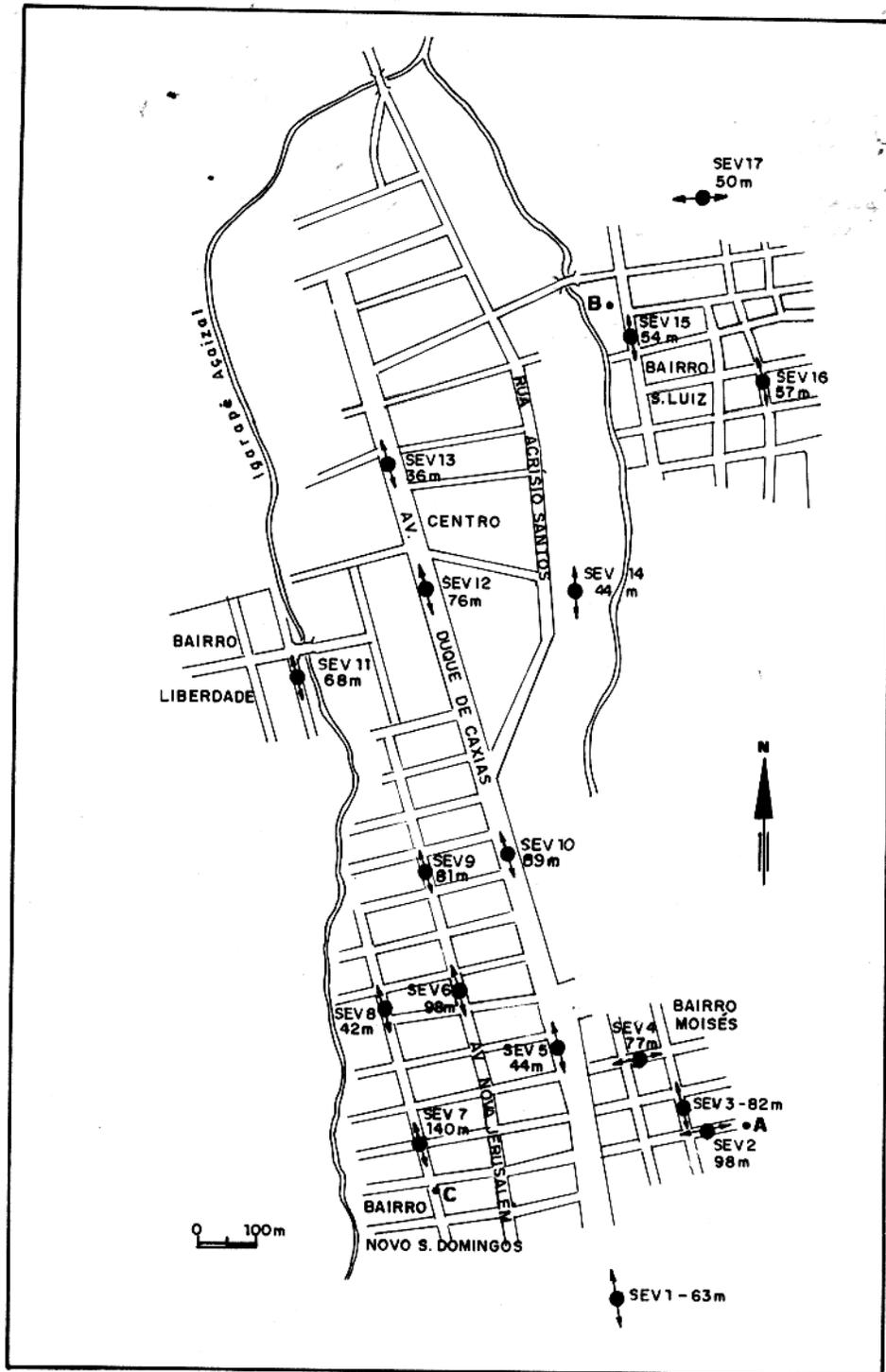


Figura 5.1 - Localização do centro das SEVs. Notar que cada SEV é acompanhada da profundidade do embasamento encontrado para aquele local.

O primeiro horizonte geoeétrico é relacionado ao solo, e como se pode observar, apresenta grande variação nos dados de resistividade, com valores que variam de centenas até alguns milhares de ohm.m. Um dos fatores que justificam os altos valores de resistividades são os capeamentos de piçarras feitos nas ruas e travessas da cidade. O solo também quando desprovido de cobertura vegetal, torna-se extremamente seco, transformando-se numa espécie de "carapaça" de grande rigidez, o que contribui para elevar o valor de resistividade. As baixas resistividades estão associadas, normalmente, a solos de constituição arenosa ou úmidos. A espessura do solo, na maioria dos casos, não excede a 1 m, salvo exceções pode atingir valor máximo de 5.5 m (SEV 12).

A forte heterogeneidade lateral do solo se constitui em uma importante fonte de ambiguidade na interpretação de dados de eletroresistividade, como pode ser comprovado no modelamento numérico visto na Capítulo 3. Neste sentido, tomou-se o cuidado de posicionar os eletrodos de potencial sobre terreno de textura o mais homogêneo possível.

O segundo horizonte geoeétrico, que aparece em 9 da 17 SEVs, apresenta valores de resistividade entre 1550 e 5194 ohm.m, e espessuras que variam entre 2 e 23 m. Estes valores elevados de resistividade são associados a uma camada constituída predominantemente por material arenoso, com intercalação de um nível conglomerático. Esta interpretação é fundamentada nos perfis descritos nos pontos 01 e 02 (Capítulo 4), nos quais se identifica, sobposto ao solo, uma camada arenosa seguida por um nível laterítico, que em parte explicaria os valores elevados nas resistividades. Observações de campo, mostram que esta camada pode conter um lençol freático, como o descrito no ponto 01, quando em níveis topográficos de menores cotas.

O terceiro horizonte, é dentre todos o que apresenta maior dificuldade de correlação, pois apresenta pouca continuidade lateral e valores muitos discrepantes de resistividade. Note que nas SEVs 05, 06 e 14 os valores medidos para a resistividade, respectivamente, são de 89, 72 e 39 ohm.m. Considerando a proximidade da SEV 05 com o ponto 01, associamos estes valores de resistividades a uma lente de material argiloso como aquele descrito no referido ponto. Não podemos prescindir sobre a geometria desta lente mas é presumível que ela inicie nas proximades da SEV 06 e se estenda para leste e para norte, na direção da SEV 14, caraterizando um corpo interdigitado com possível forma lobada. Observe na Tabela 5.1, que a espessura desta unidade está entre 2 e 7 m. As SEVs 15 e 16 apresentam, nesta ordem, resistividades de 769 e 292 ohm.m, valores correspondentes a resistividade de material arenoso, provavelmente de maior umidade que aquele associado ao segundo horizonte geoeétrico ou talvez com maior quantidade de material argiloso. Na SEV 17 se detecta um valor anômalo de 17463 ohm.m para a resistividade. Esta SEV foi a única a ser executada

em área de pasto e sua posição é próxima ao ponto 03, onde foi descrito uma camada arenosa fortemente cimentada por soluções hematíticas o que dá a rocha uma textura muito compacta. Partindo-se desse pressuposto, podemos admitir que a anomalia medida seja a indicação da continuidade lateral da camada laterítica que nós reportamos.

O quarto horizonte geoeletrico é identificado em 11 SEVs. Com exceção das SEVs 05 e 16, que apresentam resistividade, respectivamente, de 2373 e 3230 ohm.m, as demais SEVs apresentam valor médio de resistividade de 450 ohm.m e espessuras bastante variáveis, entre 1.7 m até o valor máximo de 44 m. Novamente, tomando como referência os perfis descritos nos pontos 01 e 02 e considerando os valores de resistividades medidos para este horizonte, podemos correlacioná-lo a uma camada arenosa. Os valores destoantes de resistividades das SEVs 05 e 06, podem ser associados a porções mais secas da rocha ou mesmo haver contribuição do nível laterítico descrito para o segundo horizonte, já que em ambos os casos o horizonte se encontra a menos de 9 m da superfície. É nesta camada que se identificou o lençol freático mais importante da área e para qual sugerimos estudos futuros mais detalhados que permitam avaliar sua real potencialidade hidrológica e a qualidade físico-química da água.

O quinto horizonte geoeletrico é o que apresenta maior continuidade lateral e é o mais condutivo, com valores de resistividade que variam entre 4 à 64 ohm.m. Esta unidade é dentre todas as sedimentares, a que apresenta as maiores espessuras que estão entre 14 e 132 m. A espessura foi inclusive um dos critérios usados para distinguir esta unidade da lente de argila descrita no segundo horizonte. No ponto 04 da Figura 4.4, foi descrita uma camada argilosa de textura mosqueada geneticamente associada a alteração da rocha clorita-xisto que compõe o embasamento da área. De posse desta informação e do fato da rocha subjacente a esta unidade ser, na maioria das SEVs, o embasamento, interpretamos o quinto horizonte geoeletrico como constituído de material argiloso, resultante da decomposição do substrato cristalino.

O último horizonte corresponde ao embasamento, conforme mencionado anteriormente é constituído por rochas metamórficas do tipo clorita xisto, fácies xisto-verde, da Formação Pequizeiro, unidade pertencente a estratigrafia da Província Tectônica Faixa Araguaia. O valor de 5000 ohm.m, adotado para o substrato cristalino, deve ser tomado como indicativo de $\rho \rightarrow \infty$, e não como determinação exata da resistividade das rochas cristalinas. A última coluna da Tabela 5.1 mostra a profundidade encontrada para o topo do embasamento nas diferentes SEVs. Somente nas SEVs 14 e 16 não foi possível detectar a presença do embasamento. Note que em ambos os casos os valores de resistividade da camada 05 são muito baixos (3 e 2 ohm.m, respectivamente). Estas baixas resistividades podem estar associadas a presença de água salobra conforme informação verbal de habitantes da região. Com

esta característica, a camada 05 se comporta como uma barreira natural para a passagem das correntes elétricas, concentrando todo o fluxo em si e impedindo a dectção da camada seguinte.

PALACKY et al. (1981), identificaram uma sequência de intemperismo em rochas meta-sedimentares de idade pré-cambrianas, no oeste africano, bastante semelhante com o perfil interpretado para a área em estudo. Esta região da África tem características climáticas parecidas com as da Amazônia. Neste trabalho foi identificado reservatórios no contato da camada argilosa com o xisto, principalmente quando esta rocha encontrava-se fraturada. Esta possibilidade pode também ser considerada para a área em foco.

Com base na descrição dos horizontes geoeletricos, apresentamos a seção geoeletrica mostrada na Tabela 5.2, como a mais representativa para a área estudada, na qual é feita uma descrição suscinta da litologia associada a cada horizonte bem como é apresentado os intervalos de resistividade e espessura interpretados para eles.

Tabela 5.2 - Seção geoeletrica proposta para a subsuperfície da cidade de São Domingos do Araguaia

CAMADA	DESCRIÇÃO	RESISTIVIDADE (ohm.m)	ESPESSURA (m)
01	solo superficial com forte heterogeneidade lateral	$64 \leq \rho_1 \leq 4017$	$.04 \leq e_1 \leq 5.5$
02	material arenoso contendo nível conglomerático	$1596 \leq \rho_2 \leq 4582$	$4.0 \leq e_2 \leq 230.0$
03	lente argilosa ou camada laterítica intercaladas em material arenoso	$72 \leq \rho_3 \leq 17463$	$1.5 \leq e_3 \leq 8.0$
04	material areno-argiloso úmido contendo lentes arenosas secas	$270 \leq \rho_4 \leq 3002$	$2.0 \leq e_4 \leq 44.0$
05	material argiloso produto da decomposição do embasamento	$2 \leq \rho_5 \leq 64$	$14.0 \leq e_5 \leq 132.0$
06	clorita xisto-verde	$\rho_6 = 5000$	$e_6 \rightarrow \infty$

Apesar de podermos distinguir individualmente os horizontes geoeletricos 02, 03 e 04, doravante tomaremos estes horizontes como uma única camada geológica de constiução arenosa, com intercalações de material argiloso, possivelmente em forma de lentes, já que sua ocorrência é localizada além de horizontes concrecionários laterítico. Essa generalização é admissível uma vez que a constituição básica desses horizontes é a areia e as diferenças nos valores de resistividade que se observa entre eles se deva, provavelmente ao conteúdo de argila e/ou de água intersticial.

Tomando como critério a espessura da camada arenosa, podemos distinguir dois grupos de SEVs. O primeiro grupo é constituído pelas SEVs 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 13 e 14

(Figura 5.2), nas quais a espessura da referida camada não excede a 10 m. No segundo grupo, formado pelas SEVs 01, 02, 03, 04, 12, 15, 16 e 17 (Figura 5.3), a espessura da camada arenosa varia entre 19 e 54 m. Este último grupo contém as SEVs com maiores potencialidades de conterem os melhores aquíferos subterrâneos.

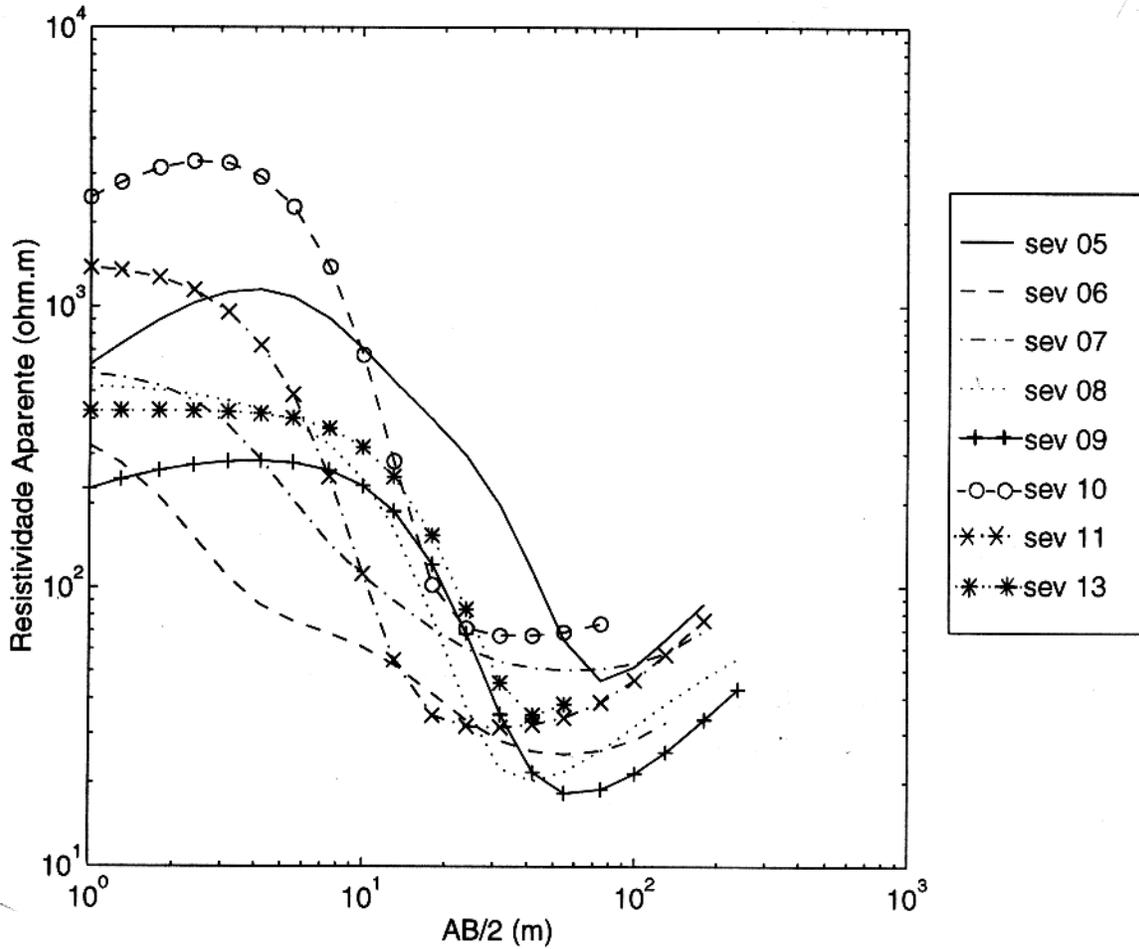


Figura 5.2 - Família de SEVs que apresentam espessura da camada arenosa inferior a 10 m

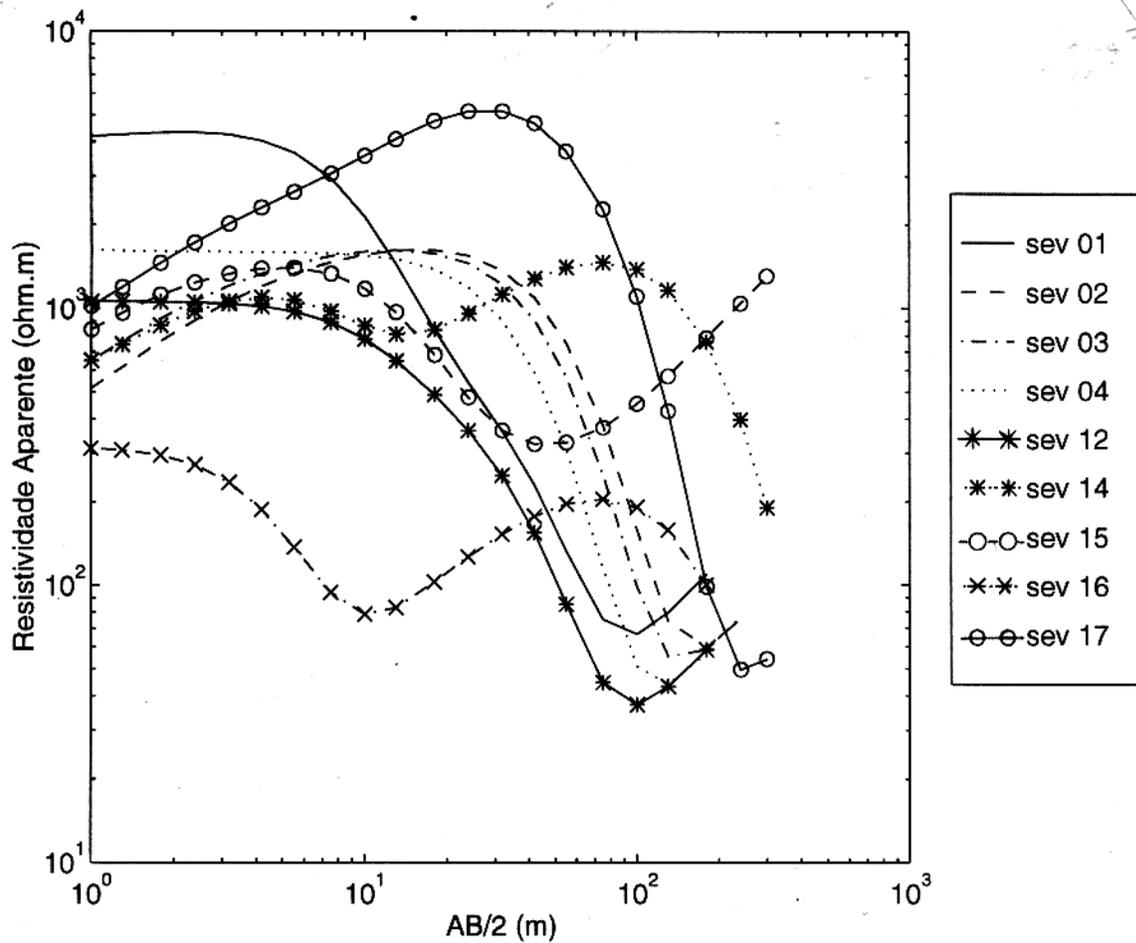


Figura 5.3 - Família de SEVs que apresentam espessura da camada arenosa superior a 19 m.

De posse da localização das SEVs e dos valores das espessuras, foi possível elaborar um mapa de isópacas da camada arenosa, mostrada na Figura 5.4. Observe que na porção nordeste da cidade (bairro São Luiz), encontramos as maiores espessuras para a camada arenosa exatamente nas proximidades do leito do igarapé Açaizal. Note também que a camada arenosa tende a se espessar para sudeste (bairro Moisés). Esta configuração das linhas de isópacas mostram, em linhas gerais, que a proporção que se adentra na direção da bacia, a tendência da camada arenosa é se tornar cada vez mais espessa. Porém existe a necessidade de execução de algumas SEVs, entre os bairros São Luiz e Moisés para melhor caracterização da geometria da camada arenosa.

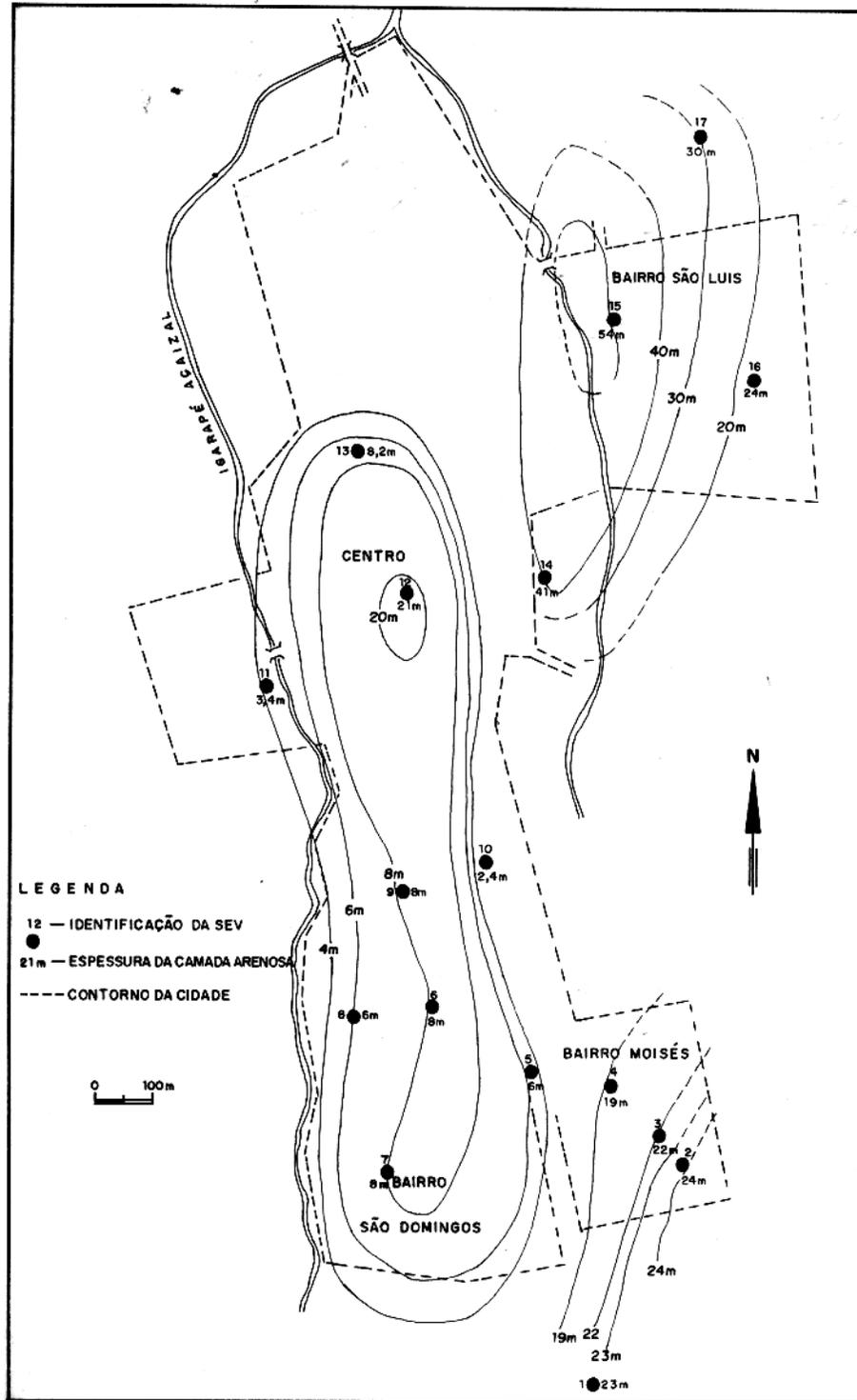


Figura 5.4 - Mapa de isópacas da camada arenosa. As medições dos bairros São Luiz e Moisés são os locais que apresentam as maiores espessuras.

5.4 SECÇÕES GEOELÉTRICAS

Apesar das SEVs representarem, individualmente, uma interpretação unidimensional, quando agrupadas coerentemente em perfis, é possível fazer correlações sobre a bidimensionalidade da subsuperfície, principalmente da geometria e da disposição espacial das unidades estratigráficas; bem como de estruturas tectônicas que afetam o preenchimento sedimentar e o seu embasamento.

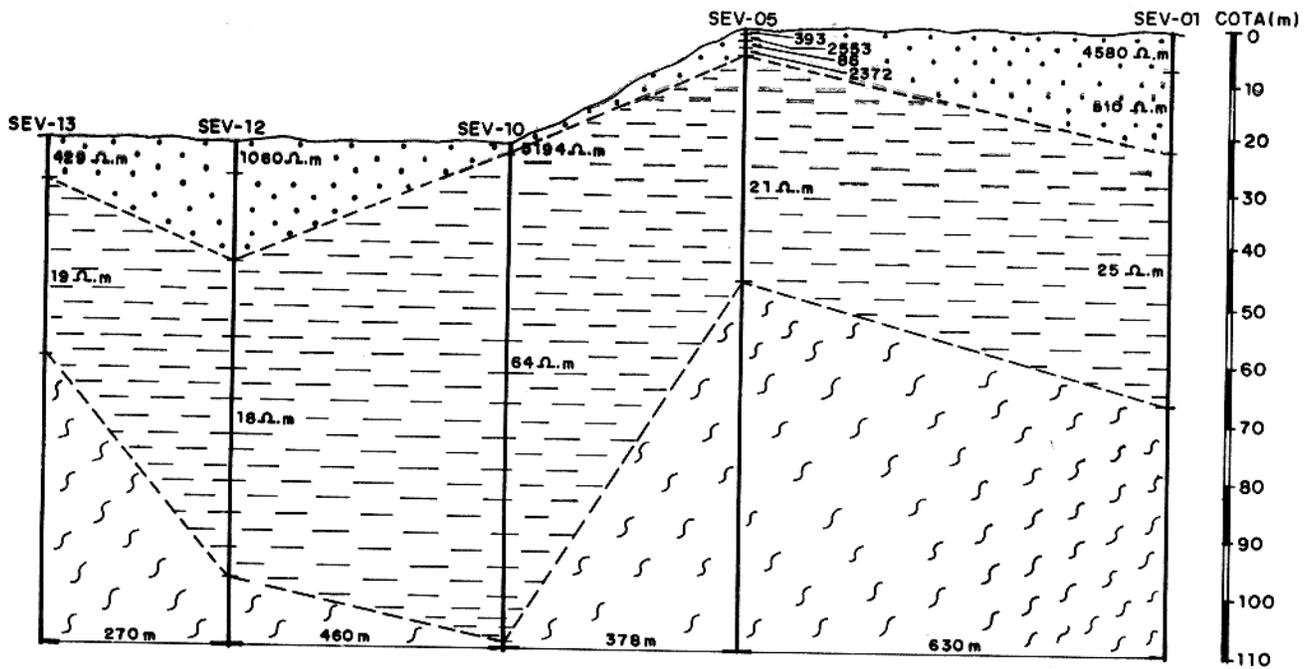
Foi possível compor quatro perfis que serão a seguir descritos. Em todos eles, a razão média entre a escala vertical e a escala horizontal é de 1/10. A topografia superficial nos perfis foi definida segundo dados de altimetria fornecidos pela prefeitura local.

5.4.1 Secção Geométrica 01

Esta secção, mostrada na Figura 5.5, tem direção NW-SE e é constituída pelas SEVs 01, 05, 10, 12 e 13, todas executadas ao longo da Av. Duque de Caxias. Na análise do perfil, nota-se que o embasamento encontra-se fortemente desnivelado resultando na formação de duas depressões separadas por um alto topográfico, posicionado abaixo do centro da SEV 05. A camada argilosa que aparece sobreposta ao embasamento, acompanha ligeiramente a geometria do cristalino, desenvolvendo exatamente nas depressões suas maiores espessuras. A camada arenosa, incluso aí o solo, também mantém a tendência do embasamento com a definição de duas porções de maior espessura situadas nas mediações da SEV 12 e na direção da SEV 01, onde se percebe um gradiente de declividade crescente no sentido sudeste.

5.4.2 Secção Geométrica 02

É mostrado na Figura 5.6 e tem direção aproximada ENE-WSE, sendo composta pelas SEVs 02, 03, 04, 05, 06 e 08. Esta secção intercepta a secção 01 na posição da SEV 05. A exemplo do perfil anterior, o embasamento se apresenta com forte desnivelamento, formando duas depressões separadas por um alto topográfico, exatamente sob a SEV 05. No sentido da SEV 08, o embasamento apresenta forte acentuação vindo aflorar mais adiante conforme observações de campo. É no depocentro das depressões que a camada argilosa se apresenta mais espessa. A camada arenosa mostra tendência de espessamento novamente no sentido SE, chegando a atingir valores superiores à 20 m, enquanto que no sentido oposto há uma tendência de adelgaçamento da mesma.



Índice Litológico

- CAMADA ARENOSA
- CAMADA ARGILOSA
- XISTO

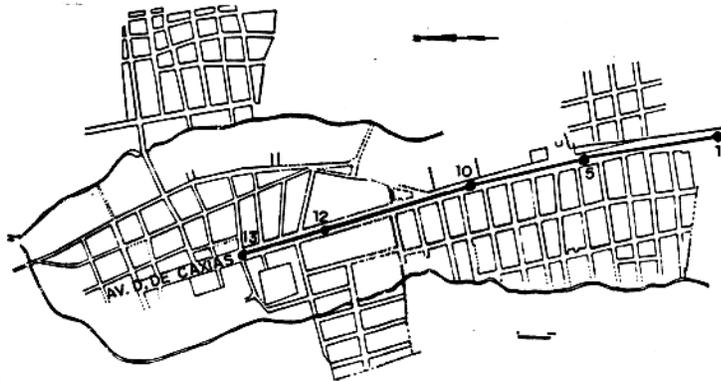


Figura 5.5 - Secção geolétrica 01, baseada na interpretação das SEVs 01, 05, 10, 12 e 13.

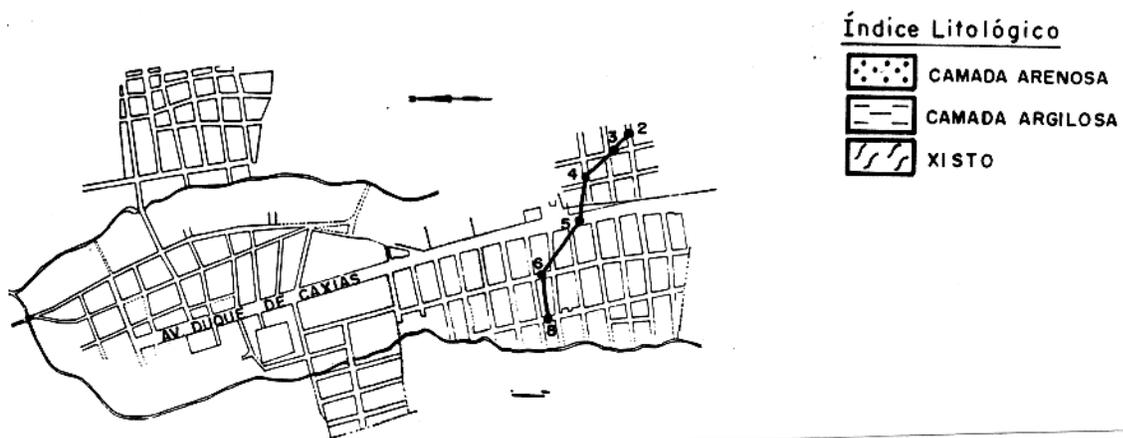
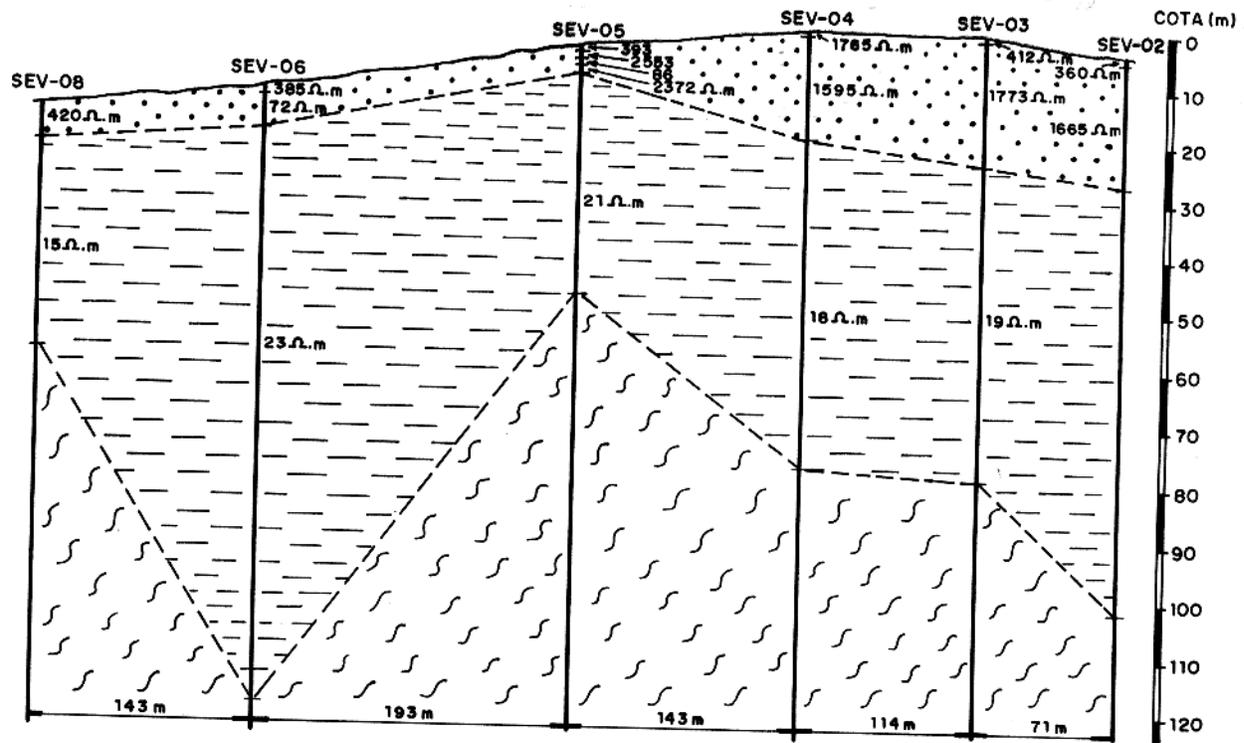


Figura 5.6 - Secção geolétrica 02, baseada na interpretação das SEVs 02, 03, 04, 05, 06 e 08.

5.4.3 Secção Geométrica 03

Esta secção tem extensão aproximada de 1300 m e cruza a cidade de São Domingos do Araguaia diagonalmente com direcção NNE-SSW (Figura 5.7), sendo constituída pelas SEVs 17, 15, 14, 10, 06 e 07. Na posição da SEV 14, não foi possível detectar a profundidade do topo do embasamento, devido, provavelmente, a baixa resistividade da camada argilosa que devido a este fato, a mesma passa a funcionar com uma blindagem à passagem da corrente eléctrica para as camadas subjacentes, e por consequência faz reduzir a profundidade de investigação. Desta maneira não podemos definir a geometria do embasamento ao longo de todo o perfil, porém levando em conta o formato do embasamento nas secções 01 e 02, consideramos plausível admitir a existência de um alto topográfico entre as SEVs 14 e 10 que definiria as duas depressões identificadas nas secções anteriores. Observe que há um forte adelgaçamento da camada argilosa no sentido da SEV 15 em detrimento as grandes espessuras alcançadas nas SEVs 10, 06 e 07. Por sua vez, a camada arenosa acha-se mais espessa sob as posições das SEVs 14, 15 e 16, atingindo espessuras de até 50 m. Note que intercalados nesta camada, aparece um horizonte de resistividade elevada (SEV 17) e outro de resistividade baixa (SEV 14). Conforme interpretação dada no item 5.3, estes horizontes estão associados, respectivamente, a presença de uma camada laterítica bastante compacta e a uma lente de argila.

5.4.4 Secção Geométrica 04

Os dados obtidos na interpretação das SEVs 15, 16 e 17, utilizadas para elaborar esta secção (Figura 5.8), foram todas executada no bairro São Luiz, local que se encontra mais afastado da borda da Faixa Araguaia. É nesta área que encontramos as maiores espessuras da camada arenosa, a despeito de um embasamento relativamente raso quando comparado a outros locais prospectado dentro da cidade. Na SEV 16, a exemplo da SEV 14, não foi possível detectar a profundidade do topo do embasamento, pois novamente aparece um horizonte de resistividade muito baixa, possivelmente depositada acima do embasamento. Nota-se, entretanto uma sútil tendência do embasamento tornar-se mais profundo para Leste.

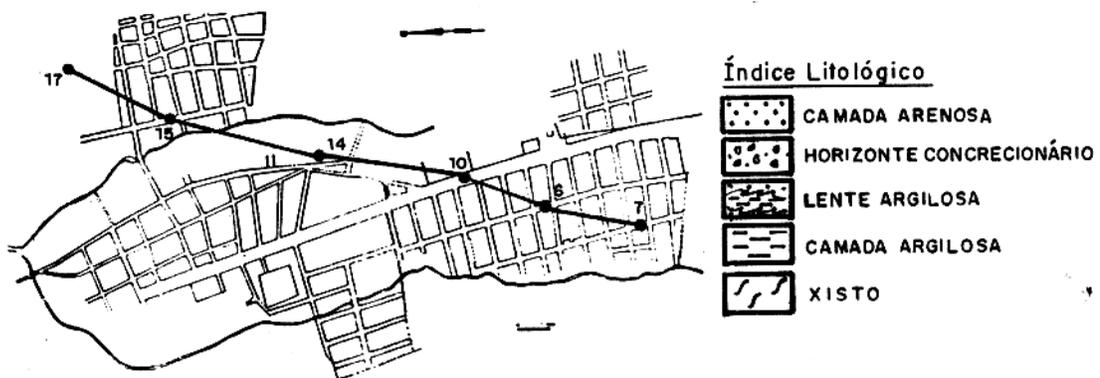
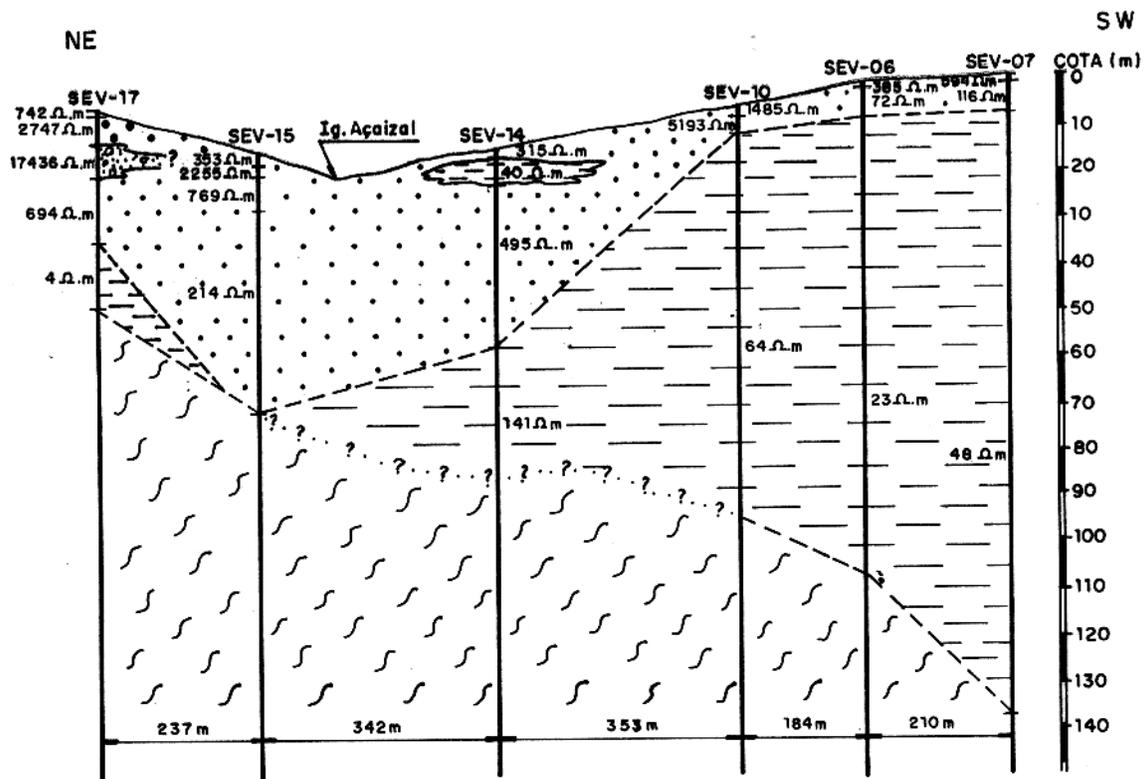


Figura 5.7 - secção geolétrica 03, composta pelas SEVs 17, 15, 14, 10, 06 e 07.

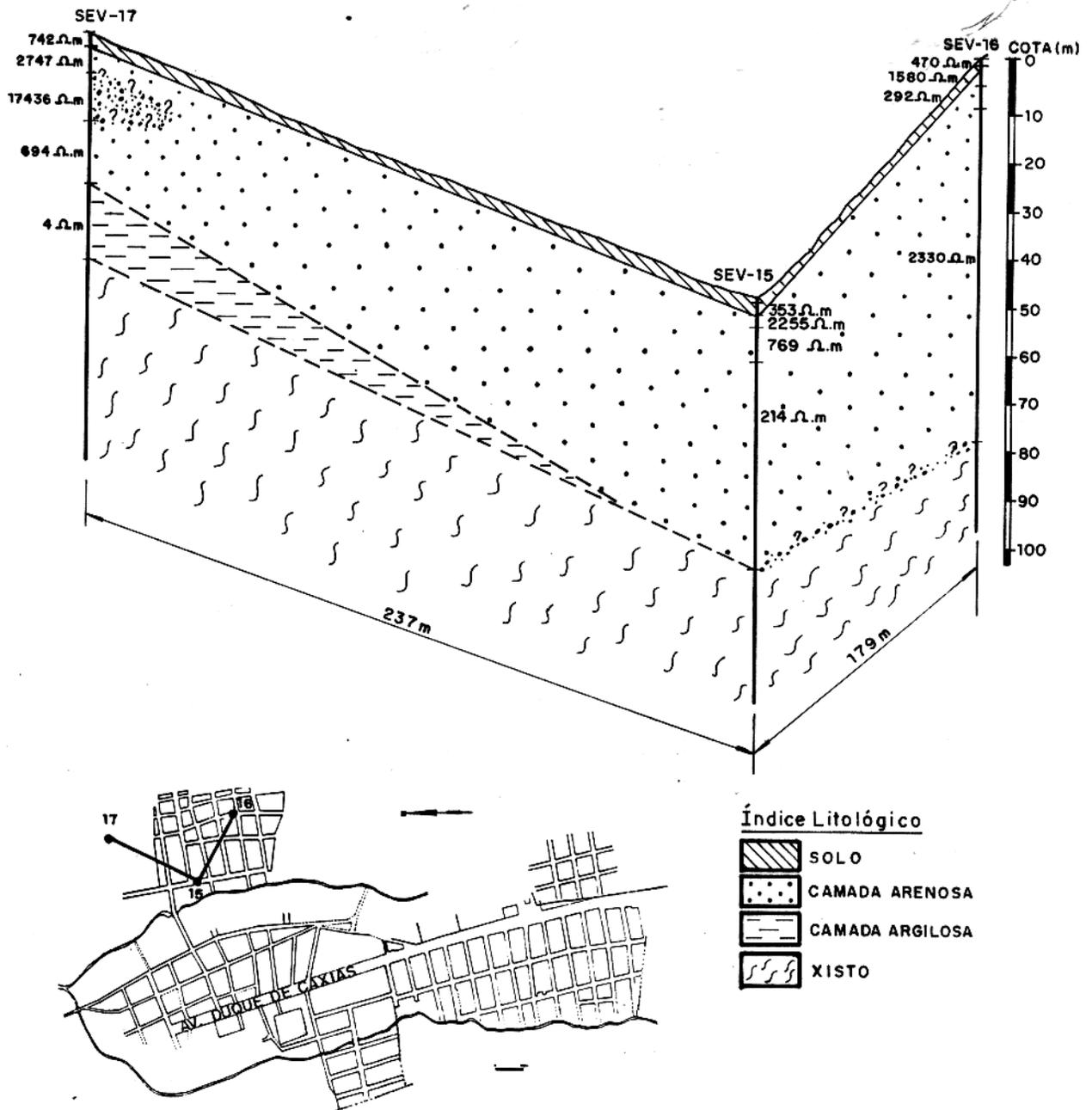


Figura 5.8 - Secção geolétrica 04, composta pelas SEVs 15, 16 e 17.

5.5 MAPEAMENTO 3D DO EMBASAMENTO

Os dados de eletroresistividade podem ser usados no mapeamento da topografia do topo do embasamento. Este resultado é importante na caracterização do quadro geológico da área e por conseguinte, melhora as informações acerca das potencialidades de armazenamento de água subterrânea.

A metodologia empregada neste trabalho, consiste em traçar linhas de isopropfundidades do topo do embasamento. Os valores de profundidade usados como referência são aqueles obtidos para os pontos onde foram executadas as SEVs, mostrada na Figura 5.9. Nas porções NW e SE da área, dispomos de poucos dados de resistividades e por conseguinte são locais que não podemos precisar a verdadeira topografia do embasamento. De posse das linhas de isopropfundidade, traçadas manualmente, foi feita a digitalização das mesmas via CAD. A figura mostra as linhas digitalizadas, com espessamento de 5 m. Após a digitalização, é necessário fazer a conversão do formato CAD para o formato DAT, através de rotina LISP e programas escritos em Q-Basic, desenvolvidos por BORGES et al. (inédito). O próximo passo consiste em gerar malhas via Surfer V.5.0. O resultado deste processo permite a criação de blocos 3D, como os das Figuras 5.10 e 5.11, que mostram a topografia do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia, com vistas respectivamente para NW e SW.

Os modelos gerados, mostram a existência de duas depressões ligeiramente paralelas, separadas por um alto topográfico. A depressão do lado ocidental apresenta maior densidade de linhas e maiores valores de profundidade, revelando uma topografia mais acentuada com forte ângulo de mergulho dos flancos, em detrimento a uma topografia mais suave observada na depressão do lado oriental. Estas depressões apresentam depocentros alongados, com direção submeridiana e com aumento no aprofundamento para Sul e Sudeste, respectivamente.

Dentro do enfoque hidrogeológico, é presumível admitir um fluxo de água acompanhando o gradiente de declividade das depressões, havendo possibilidades reais de se formar reservatórios de água nas partes mais profundas das mesmas. Entretanto as interpretações das SEVs indicam que a camada sobrejacente ao embasamento, tem constituição predominantemente argilosa e é bastante espessa. Isto reduz a probabilidade de bons reservatórios, uma vez que a argila tem menor capacidade de armazenar água além do fato da camada arenosa tender a não acompanhar a geometria do embasamento. Apesar das informações litológicas não serem favoráveis, fatores estruturais combinados podem aumentar a probabilidade de se encontrar água em quantidade de exploração.

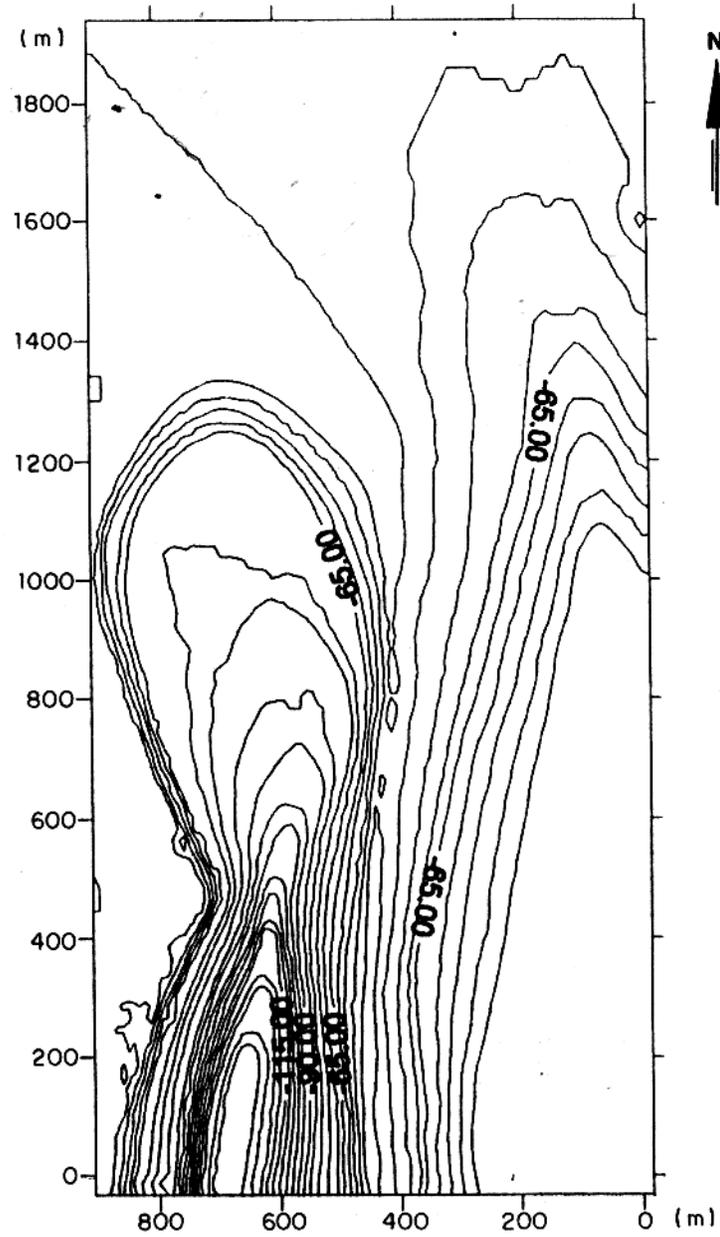


Figura 5.9 - Mapa de contorno estrutural do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia. O intervalo entre as curvas é de 5 m.

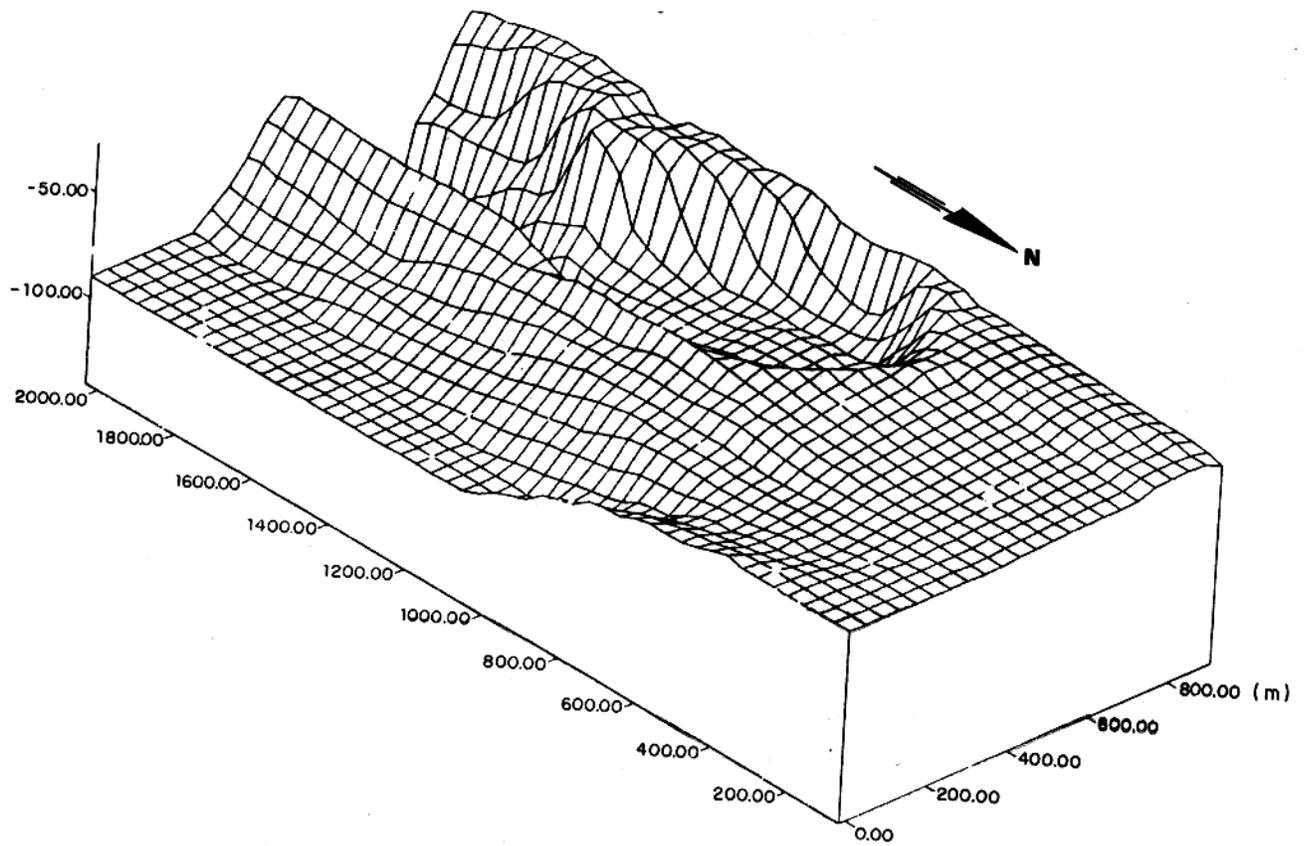


Figura 5.10 - Bloco 3D mostrando o comportamento estrutural do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia. Vista para SW.

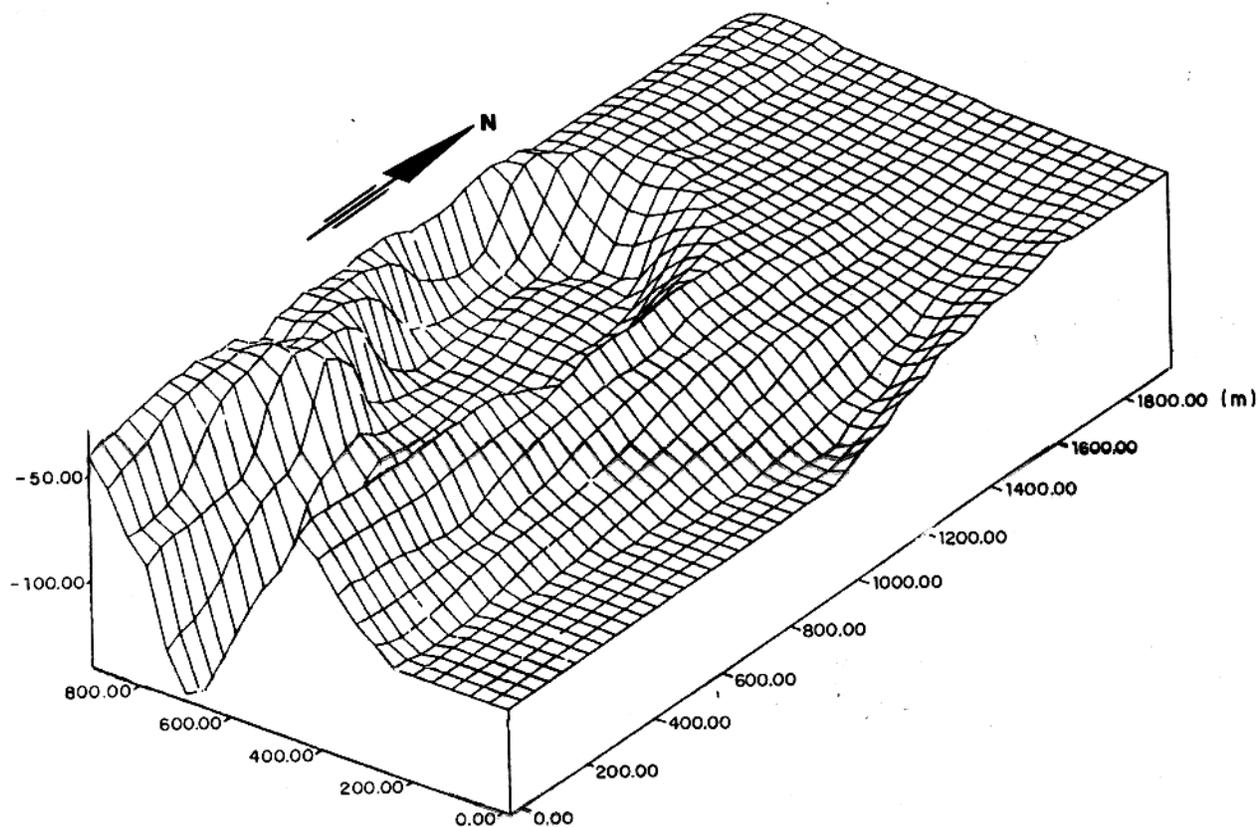


Figura 5.11 - Bloco 3D mostrando o comportamento estrutural do embasamento sob a cidade de São Domingos do Araguaia. Vista para NW.

5.5.1 Interpretação Estrutural

Combinando os dados geológicos com os resultados obtidos na interpretação das SEVs, propomos o modelo estrutural, sintetizado no diagrama mostrado na Figura 5.12, como representativo da área estudada.

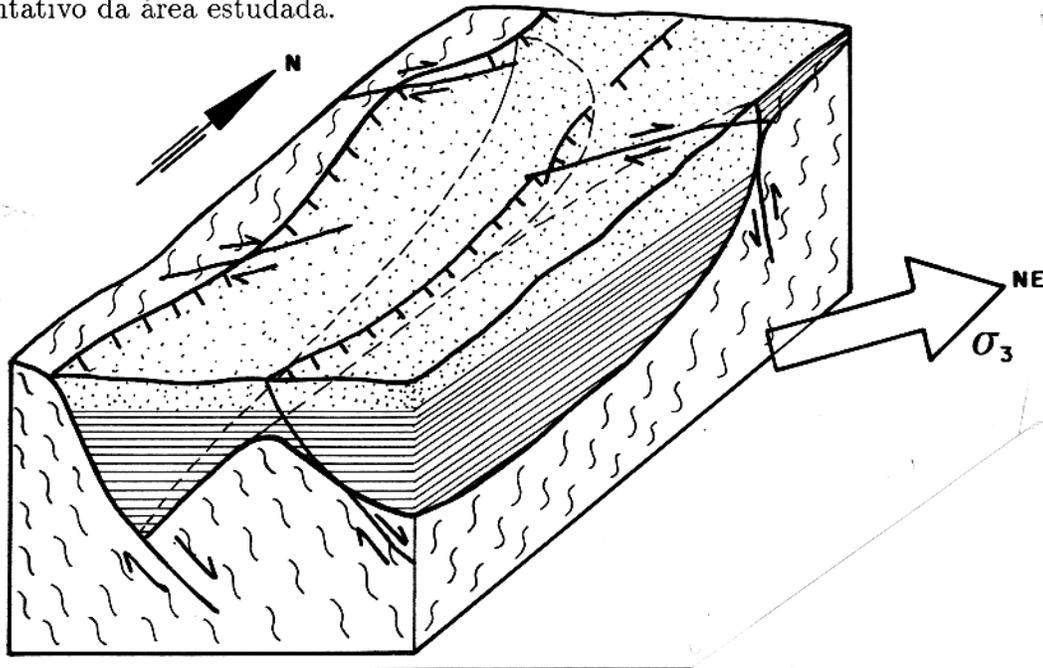


Figura 5.12 - Bloco diagrama sintetizando o quadro estrutural proposto para a área em estudo. A seta indica a posição do eixo distensivo que aponta para NE.

Basicamente trata-se de sequência de falhas normais desenvolvidas a partir do contato com a Faixa Araguaia. Estas falhas estariam geneticamente relacionadas ao arcabouço da Bacia do Parnaíba, que segundo BORGES et al. (1994), foi durante o Mesozóico fortemente influenciado pela abertura do Atlântico Equatorial, período em que atuou um eixo distensivo de direção NE-SW.

A geometria das falhas com os rejeitos aumentando para sul, indicam que a movimentação tectônica, responsável pela geração das falhas, teve caráter oblíquo, provocando uma rotação nos blocos falhados no sentido sinistral, com o polo posicionado na parte norte da área. Como as falhas apresentam atitude submeridiana, então a rotação dos blocos foi devida a atuação do eixo distensivo (σ_3) na direção NE, de acordo com o modelo proposto por BORGES et al. (1994). Esta cinemática, proposta para a origem das falhas normais, também se aplica às falhas direcionais cujos índicios das mesmas na área de estudo, estão nas lineações traçadas no curso do igarapé Açaizal e são orientadas a NE-SW, paralelo ao transporte das massas tectônicas..

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os aspectos condicionantes na acumulação de água subterrânea em terreno cristalino na região amazônica, estão principalmente associados a a existência de mantos de intemperismo com espessuras apreciáveis, desenvolvidos principalmente sobre rochas metassedimentares. Neste tipo de ambiente a pesquisa é feita basicamente com o emprego de SEVs regularmente espaçadas sobre o terreno. Os locais de captação são escolhidos onde estão as maiores espessuras do manto de alteração com maior conteúdo arenoso. No caso do substrato ser constituído de rochas graníticas ou gnaíssicas, a definição de descontinuidades no embasamento passa ter maior importância, uma vez que são tipos litológicos mais resistente aos agentes intempéricos, mesmo sob as condições climáticas da Amazônia. O emprego de perfilagens de superfície em auxílio as SEVs, nestes casos é recomendável.

Uma das questões que envolve o emprego de SEVs na prospecção elétrica, reside na influência que estruturas 2D exercem sobre as curvas e que implicações trazem no uso de modelos 1D, usados normalmente em suas interpretações. Neste sentido, ocupamo-nos no Capítulo 3 com a simulação de algumas estruturas 2D, com geometria que pudessem ser correlacionadas com modelos geológicos. Esta análise se baseou no contraste de resistividade entre a estrutura idealizada e o meio encaixante definido com uma sequência de estratos horizontais.

Uma das conclusões que se chega destas simulações é que a presença de elevações ou depressões, de mesoescala, no embasamento, resultam em pouca ou nenhuma alteração na forma da curva, quando comparada com a forma que a curva teria, sem a presença da estrutura. A bidimensionalidade do meio fica apenas evidenciado quando é possível a realização de perfis ao longo de uma direção, preferencialmente perpendicular ao "strike" da estrutura investigada.

Outro resultado mostra que a presença de falhas sob o centro do arranjo de eletrodos, ou próximo a ele, gera nas curvas distorções muito parecidas com aquelas provocadas por uma simples variação lateral de resistividade no solo. Mesmo quando a falha acha-se recoberta por um solo homogêneo, os resultados não permitem distinguir um caso do outro.

A presença de diques em meio estratificado, que pode representar uma zona de cisalhamento, gera sensíveis mudanças no formato das curvas para casos de diques resistivos e

condutivos. Outro efeito observado, não só no caso de diques mas também nas estruturas do embasamento, é a omissão da presença de camadas estratigráficas que estejam envolvendo estas estruturas. Em alguns casos, estas camadas podem ter mais importância como possíveis reservatório do que as próprias estruturas, particularmente tratando-se de camadas arenosas.

É evidente que os resultados alcançados nas simulações, são para casos bem específicos e não podem ser generalizados, mas servem para confirmar que não há critérios seguros no uso de SEVs individuais, que sirvam como referência para indicar a presença de estruturas 2D em subsuperfície.

A aplicação da eletroresistividade na cidade de São Domingos do Araguaia, resultou na definição de um quadro geológico de subsuperfície com importantes informações sobre a potencialidade hidrogeológica da área. É importante lembrar que devido as poucas informações geológicas disponíveis de subsuperfície, as conclusões apresentadas se baseiam principalmente na interpretação geofísica com pouco controle geológico. Um trabalho mais completo poderia se ter conseguido caso disposessemos de furos estatigráficos, útil no aferimentos dos parâmetros interpretados para os modelos.

A análise das SEVs permitiu definir 6 horizontes geoeletricos:

- O primeiro, corresponde ao solo superficial que mostra forte heterogeneidade lateral e espessuras que ocasionalmente pode alcançar 5 m.
- O segundo tem resistividade correspondente a material arenoso seco. Intercalado neste horizonte encontra-se um horizonte concrecionário que contribui também para elevar os valores de resistividade. Identificou-se neste horizonte o primeiro nível freático, com ocorrência localizada.
- O terceiro é o que apresenta maior discrepância nos valores de resistividades, por isto não se pode associa-lo a uma determinada litologia. Portanto, ora ele pode ser associado a uma lente argilosa (SEVs 05, 06 e 14) ou a presença de um corpo muito resistivo (SEV 17).
- O quarto também é associado a uma camada arenosa, porém com maior umidade. Este horizonte é o que apresenta maior interesse para a prospecção de água uma vez que nele se identificou o principal lençol freático. A espessura desta camada pode atingir até 44 m (SEV 15).
- O quinto é o mais condutivo e o mais espesso, sendo interpretado como um material argiloso. Os dados geológicos permitem afirmar que esta camada é produto da decomposição do embasamento. Há possibilidades de se formar reservatórios de água

no contado desta camada com o substrato a exemplo do que consta no trabalho de PALACKY et al. (1981), que conseguiu identificar bons reservatórios em condições semelhantes às nossas numa região no oeste africano.

- O último horizonte corresponde ao embasamento e é constituído por um clorita-xisto, rocha metasedimentar pertencente a Formação Pequizeiro, unidade constituinte da Faixa Araguaia.

Em termos estratigráficos, o 2º, 3º e 4º horizontes são interpretados como unidades da Formação Itapecuru, de idade Mesozóica. Com a finalidade de simplificar a referência a estes horizontes e diferenciá-los das outras unidades, optou-se por tomá-los em conjunto designando-o apenas como camada arenosa. Usando como critério a espessura desta camada, pode-se distinguir duas famílias de SEVs: uma composta por SEVs que apresentam espessura de até 10 m e a outra com SEVs com espessura maior que 19 m. A localização das SEVs da segunda família permitiu-nos elaborar um mapa de isópaca da camada arenosa. Conclui-se da análise deste mapa que as áreas mais propícias à locação de poços estão nos bairros Moisés e São Luiz.

Compondo informações das SEVs, pode-se construir 4 secções. Estas secções deram informações quanto a bidimensionalidade de subsuperfície, particularmente da geometria das camadas. Estas informações foram importantes no mapeamento topográfico do embasamento que resultou na geração de blocos 3D. Isto foi possível com o controle da profundidade do topo do embasamento nos diferentes locais de execução das SEVs e com o uso da rotina LISP e programas Q-Basic, desenvolvida por BORGES et al. (inédito). A característica básica da topografia do embasamento é a existência de 2 depressões semi paralelas separadas por um alto topográfico.

De posse dos resultados anteriores, concluímos por definir um quadro estrutural para a área, formado por falhas normais rotacionadas de "trend" submeridiano, com o eixo distensivo tendo direção NE-SW, possivelmente com superposição de falhas transferentes indicados pelas lineações definidas na drenagem e segmentação dos depocentros visualizadas através da integração das SEVs. A gênese desta tectônica estaria, segundo BORGES et al. (1994), associada a cinemática de abertura do Atlântico Equatorial.

Há possibilidades de se formar reservatórios de água nos depocentros das depressões. Esta hipótese poderia se checada em trabalhos futuros.

Ao longo do trabalho concluímos, que muitas indefinições permanecem relacionadas particularmente as limitações teóricas básicas, inerentes ao próprio método de eletroresistividade e aos métodos de interpretação, como por exemplo a impossibilidade de uma definição exata

dos parâmetros geoeletricos nas camadas modeladas, com base apenas nos dados de ρ_a de superfície, dada as possibilidades de equivalência na condutância longitudinal na camadas que apresentam forte contraste de resistividade.

Recomenda-se que trabalhos futuros realizem controle químico da qualidade da água nos aquíferos e ensaios de parâmetros hidrogeológicos que possam fornecer a real potencialidade dos mananciais subterrâneos. Estes resultados são imprescindíveis para a elaboração de qualquer planejamento urbano.

Esta tese é complementada pelo trabalho de FARIAS (1996) que realizou estudos de aplicação de métodos eletromagnéticos na referida área. Estes estudos fornecerão mais informações sobre o quadro estrutural de São Domingos do Araguaia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, H.G.; MARINHO, P.A. da C.; MARTINS, R.C. - Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. Marabá, Folha **SB.22-X-D**. Estado do Pará. Texto DNPM/CPRM. (no prelo).
- BECKER, E.B., CAREY, G.F.; ODEN, J.T. 1981. **Finite Elements; an introduction**. New Jersey, Prentice-Hall. 258 p.(The Texas Finite Element).
- BHATTACHARYA, P.K & PATRA, H.P. 1968.**Direct Current Geoelectric Sounding; principles and interpretation**. Amsterdam, Elsevier Publishing Company. 135 p (Methods in Geochimistry Geophysics, 9).
- BOAVENTURA, R.S. 1974. Geomorfologia da Folha SB 22 (Araguaia) e parte da Folha SC 22 (Tocantins). In: BRASIL. Projeto RADAM BRASIL. **Folha SB 22 Araguaia e parte da Folha SC 22 Tocantins; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro. Cap. 2, p. 3-30 (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- BORGES, M.S.; ALMEIDA, H.G.; ARAUJO, O.J.B. 1994. O Arcabouço Estrutural da Baía do Parnaíba na Folha Marabá Programa Grande Carajás. In: CONG. BRAS. DE GEOL., 38, Camboriú, 1994. **bf Título**. Camboriú, editora. p. 45-46.
- BORGES, M.S.; ALVES, P, ISZODARA, J.S.L. **Filtro DXF Point para conversão de dados CAD e interface com o supersoftware**. (no prelo)
- CARRASQUILLA, A.A. 1984. Estudo geofísico regional sobre águas subterrâneas na Ilha de Marajó, Pará, Brasil. Belém, Universidade federal do Pará. Núcleos de Ciências Geofísicas e Geológicas. 143 p. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, UFPA, 1984.
- CARRASQUILLA, A.A. & RIJO, L. 1991. Análise da utilização da teoria dos meios estratificados na interpretação de SEVs da ilha de Marajó, Pará. **Revista Brasileira de Geofísica**, 9 (2): 187-197.

- COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; IGREJA, H.L.S.; HASUY, Y. 1991. Aspectos da Evolução Tectônica da Bacia do Parnaíba e sua relação com o arcabouço do pré-Cambriano. In: SIMP. NAC. DE EST. TECT., 3. Rio Claro, 1991. *Boletim...* Rio Claro, SBG. p. 96-98.
- DAVIS, S.N. 1969. *Porosity and Permeability of Natural Materials, in Flow through porous media*. New York, Academ. Press.
- FARIAS, V.J.C. 1996. *Levantamento de VLF Aplicado na Prospecção Hidrogeológica em Regiões Cristalinas*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1996.
- GOL'TSMAN, F.M. 1977. Problems of the Statistical Information Theory of the Interpretation of Geophysical Observations. *Izvestya, Physics of the Solid Earth*, 13(12):873-879.
- GHOSH, D.P. 1971. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity soundings measurements. *Geophysics Prospection*, 19: 192-217.
- HASUY, Y. & COSTA, J.B.S. 1990. O Cinturão Araguaia: um novo enfoque estrutural-estratigráfico. In: CONG. BRAS. GEOL. 36., Natal, 1990. *Anais...*Natal, SBG. V 5, p. 2535-2549.
- HOLMES, A & HOLMES, D.L. 1987. *Geología Física*. Barcelona, Ed. Omega. 811 p.
- HUEBNER, K. 1975. *The Finite Elements Method for Engineers*. New York, John Wiley and Sons. 500 p.
- INMAM, J.R. 1975. Resistivity Inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40:789-817.
- INMAM, J.R.; RYU, T.; WARD, S.H. 1973. Resistivity Inversion. *Geophysics*, 38:1088-1108.
- KELLER, G.V. & FRISCHNECHT, F.C. 1970. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Oxford, Pergamon Press. 517 p.
- KOEFOD, O. 1979. *Geosounding Principles 1, Resistivity Sounding Measurements*. Amsterdam, Elsevier. 276 p.
- LIRA, S.R.B.; FIGUEIREDO, M.G.V.; PINHEIRO, T.P. 1993. *São Domingos do Araguaia*. Belém, SEPLAN. 32 p. - (Novos Municípios; 19).

- LUIZ, J.G. & SILVA, L.M. da C. 1995. **Geofísica de Prospecção**. Belém, CEJUP. V. 1, 311 p.
- MARINHO, P.A.C 1994. Cinturões Itacaiúnas e Araguaia na Folha Marabá. In: ~~CONG.~~ BRAS. GEOL., 38., Camboriú, 1994. **Boletim de resumos expandidos**. Camboriú, SBG. p. 214-215.
- MARTINS, R.C. 1994. A Geofísica em auxílio ao mapeamento geológico básico na Folha Marabá. In: CONG. BRAS. GEOL., 38., Camboriú, 1994. **Boletim de resumos expandidos**. Camboriú, SBG. p. 19-20.
- MARTORANO, L.G.; PEREIRA, L.C.; CÉZAR, E.G.M.; PEREIRA, I.C.B. 1993. **Estudos Climáticos do Estado do Pará, Classificação climática (KOPPEN) e deficiência Hídrica (THORNTHWHITE, MATHER)**. Belém, SUDAM/EMBRAPA, SNLCS. 53 p.
- MEDEIROS, W.E. 1987. **Eletro-Resistividade Aplicada à Hidrogeologia do Cristalino: Um Problema de modelamento Bidimensional**. Salvador. 150 p. (Mestrado)
- ORELLANA, E. 1972. **Prospección Geométrica en Corriente Contínua**. Madrid, Paraninfo. 523 p.
- PALACKY, G.J; RITSEMA, I.L.; DE JONG, S.L. 1981. Electromagnetic Prospecting for Groundwater in Precambrian Terrains in the Republic of Upper Volta. **Geophysics Prospecting**, 29: 932-955.
- PETRICK, W.R.; PELTON, W.H.; WARD, S.H. 1977. Ridge Regression Inversion Applied to Crustal Resistivity and Sounding Data from South Africa. **Geophysics**. 42:995-1006.
- PONTE, M.X. 1995. Relatório Diagnóstico - Pesquisas geofísicas realizadas em convênio - FNS/UFPa de 1988 - 1995 (jul) - e déficit da demanda de consumo de água potável no Estado do Pará.
- PORSANI, M.J & RIJO, L 1993. Estudos Geológicos e Geofísicos Aplicados à Prospecção de Água Subterrânea na Região do Lago Arari - Ilha de Marajó. **Revista Brasileira de Geofísica**, 11 (1): 101-123.
- RIJO, L. 1977. **Modelling of Electric and Electromagnetic Data**. PhD Thesis. Salt Lake City, University of Utah. 242 p.

- RIJO, L. 1981. A Fast Finite Element (FFE) Algorithm for two and three - Dimensional IP - Resistivity Data Interpretation. In: SIAM Conference on Mathematical and Computational Methods in the Exploration and Extraction of deep Mineral resources, Tucson, SIAM Conference Abstracts. p. 16-19.
- RIJO, L. 1982. Mathematical Modelling of Applied Geoelectromagnetism. Proceedings of the International Symposium on Applied Geophysics in Tropical Regions, Belém, Brazil, 1-8: 429-471.
- RIJO, L. 1994a. SEV1D - Programa para modelagem de sondagem elétrica vertical unidimensional. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. Belém, DGf/UFPa.
- RIJO, L. 1994b. SEV1DINV - Programa para inversão de sondagem elétrica vertical unidimensional. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. Belém, DGf/UFPa.
- RIJO, L. 1994c. SEV2D - Programa para modelagem de sondagem elétrica vertical bidimensional. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**: Belém, DGf/UFPa.
- RIJO, L.; PELTON, W.H.; FEITOSA, E.C.; WARD, S.H. 1977. Interpretation of Apparent Resistivity Data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brasil. **Geophysics**. 42:811-822.
- ROSS, C.T.F. 1990. **Finite Element Methods in Engineering Science**. New York, Ellis Horwood. 519 p.
- SILVESTER, P.P. & FERRARI, R.L. 1983. **Finite Elements for Electrical Engineers**. Cambridge University. 209 p.
- VELOSO, H.P.; JAPIASSU; A.M.S.; FILHO, L.G; LEITE, P.F. 1974. Vegetação da Folha SB 22 (Araguaia) e parte da Folha SC 22 (Tocantins). In: BRASIL. Projeto RADAM BRASIL. **Folha SB 22 Araguaia e parte da Folha SC 22 Tocantins**; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. Cap. 4, p. 9-119 (Levantamento de recursos Naturais, 4).
- WARD, S.H.; SMITH, B.D.; GLENN, W.E.; RIJO, L.; INMAM, J.R. 1976. Statistical Evaluation of Electrical Sounding Methods. Part II: Applied Electricomagnetic Depth Sounding. **Geophysics**, 41(6a):1222-1235.