

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

TESE DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS ELÉTRICO E
ELETRICOMAGNÉTICO PARA O ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
NO MUNICÍPIO DE ALTAMIRA-PARÁ**

JOÃO JÚNIOR BAPTISTA



BELÉM - PARÁ
1998

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

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS ELÉTRICO E ELETRICOMAGNÉTICO PARA O
ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NO MUNICÍPIO DE ALTAMIRA-PARÁ

TESE APRESENTADA POR

JOÃO JÚNIOR BAPTISTA

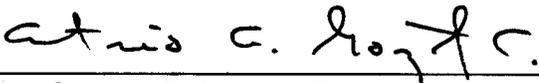
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data da aprovação: 20/11/1998

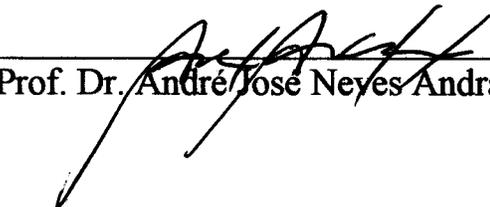
COMITÊ DE TESE:



Prof. Dr. Luiz Rijo (Orientador)



Prof. Dr. Abel González Carrasquilla



Prof. Dr. André José Neyes Andrade

BELÉM

1998

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação dos métodos geofísicos eletroresistivo e eletromagnético no município de Altamira, região central do Estado do Pará, com a finalidade de fazer o mapeamento da espessura das camadas aquíferas, bem como a ocorrência de intrusões de diabásio na área do município, permitindo uma melhor locação de pontos para perfuração com fins de captação à água subterrânea.

Na área estudada, verificam-se afloramentos de rochas cristalinas do embasamento coberto por sedimentos com idade variando desde o Paleozóico ao Quaternário, com esperança de se obter água nos sedimentos do Devoniano Inferior, mais precisamente na formação Maecuru.

Foram executadas 34 sondagens elétricas verticais com arranjo Schlumberger com AB/2 variando de 100 a 500 metros. 108 sondagens eletromagnéticas transientes também foram executadas com arranjo "loop coincidente", com 50 metros de lado.

Por problemas eletrônicos adicionados aos ruídos de fenômenos supraparamagnéticos, os resultados das sondagens eletromagnéticas apresentaram-se muito distorcidos, não tendo sido possível extrair deles informação geológica de relevância. Por isso, foram criados modelos eletromagnéticos sintéticos representando a situação geológica da área.

Os dados obtidos no campo em forma de curvas de resistividade aparente, foram plotados em papel bilogarítmico e interpretados com a ajuda de algoritmos direto e inverso os quais considera modelos de camadas horizontalmente estratificadas, homogêneas e isotrópicas. Os resultados da interpretação permitiram estabelecer modelos geoeletricos aproximados refletindo a situação geológica na subsuperfície.

Os resultados da interpretação das sondagens elétricas, foram confrontados com os resultados da interpretação qualitativa do mapa de isogamas do campo magnético total, permitindo delimitar com maior precisão a zona de incidência de soleiras de diabásio, situada a norte da área. Dos quatro horizontes geoeletricos distinguidos, o terceiro é essencialmente constituído por arenitos, apresentando, por isso, melhores condições para armazenamento de água subterrânea.

As meus queridos Pais

João Baptista

e

Filomena Matemba

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, Professor Dr Luiz Rijo, pelas orientações e ensinamentos que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora Professores Antônio Abel González Carrasquilla e André José Neves Andrade, pelas valorosas sugestões que contribuam para melhorar esta tese.

Ao Governo da República Federativa do Brasil, por intermédio do DCT-MRE, CAPES-MEC e CNPq-MCT, pelo suporte financeiro permitindo a realização deste trabalho.

Ao corpo docente do curso de pós-graduação em geofísica da universidade federal do Pará, mais precisamente aos professores Om Verma, Geraldo, Lúcia Maria, Jorge Leão, Joel Macambira, e Maurício Borges, pelo meu aperfeiçoamento, e ao professor Lourenildo Leite, pelo apoio ao longo do curso.

Aos funcionários do curso de geofísica, pelo apoio e cooperação, em especial a Regina Benildes e, ao Davi, pela dedicação na confecção de figuras desta tese.

Ao professor Geraldo, pela direção e ao técnico Álvaro, pela ajuda na coleta dos dados de campo.

À Prefeitura Municipal de Altamira, pelo apoio prestado durante a etapa dos trabalhos de campo.

Aos trabalhadores da biblioteca do Centro de Geociências, e o Hélio em particular, pela revisão do texto e das normas de editoração.

A todos os meus colegas de curso, em especial ao Alfredo Carrasco, Edson Monteiro, Eduardo, Luís Montes, Ronaldo Rodrigues, Marcos Rocha, Paulo de Carvalho, Cícero e German, pelas contribuições prestadas durante os estudos e durante a elaboração desta tese.

A todos os funcionários do Centro de Geociências, do Curso de Pós-graduação em Geofísica e do Departamento de Geofísica, pela amizade e ajuda durante o período dos meus estudos.

À todos os meus amigos, pela amizade e carinho.

Aos meus familiares e parentes pela compreensão devido à minha longa ausência.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1- INTRODUÇÃO	3
1.1 – MOTIVAÇÃO	3
1.2 – OBJETIVO	4
1.3 - ORGANIZAÇÃO DA TESE	4
2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	6
2.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO	6
2.2 – GEOLÓGIA DA ÁREA	8
2.3 - ESTUDOS ANTERIORES	12
3 – MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS	15
3.1- MÉTODO ELÉTRICO DE RESISTIVIDADE	15
3.1.1 – Introdução	15
3.1.2 – Fundamentos Teóricos	17
3.2 - MÉTODOS ELÉTROMAGNÉTICOS TRANSIENTES	18
3.2.1 – Introdução	18
3.2.2 – Fundamentos Teóricos.....	19
3.2.3 – Profundidade de Penetração	21
4 - INSTRUMENTAÇÃO E MEDIÇÃO NO CAMPO	23
4.1 - PROCEDIMENTOS DE CAMPO	23
4.2 – ANÁLISE DAS SEVs.....	27
4.3 – FAMÍLIA DE CURVAS DE SEV.....	27
4.3.1 - Família tipo I	27
4.3.2 - Família tipo II	28
4.3.3 – Família tipo III	29
4.3.4 – Família tipo IV	31

4.4 - INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA	33
4.4.1 - Método Direto	34
4.4.2 - Método Inverso	35
4.5 - RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO.....	35
4.5.1 - Seções Geométricas	35
4.5.2 - Mapas de Contorno	39
5 - MODELOS ELETROMAGNÉTICOS SINTÉTICOS	43
5.1 - INTRODUÇÃO	43
5.2 - MODELOS.....	43
5.3 - RESPOSTAS TEM RELATIVAS AOS MODELOS	44
5.3.1 - Introdução	44
5.3.2 - Análise das Respostas	45
6 - RESULTADOS	48
6.1 - MÉTODO ELETRORESISTIVO	48
6.2 - MÉTODO ELETROMAGNÉTICO	49
7 - RECOMENDAÇÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS	53
ANEXO I - RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO FINAL DAS SONDAGENS ELÉTRICAS	54
ANEXO II - DADOS DE CAMPO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS	55

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

	p.
Figura 2.1 Mapa de Localização	7
Figura 2.2 Mapa Geológico	9
Figura 2.3 Mapa de Isogamas do Campo Magnético Total	14
Figura 3.1 Linha de Eletrodos Sobre Terreno Homogêneo e Isotrópico	15
Figura 3.2 Sinais Transmitidos e Recebidos por um Sistema SIROTEM Mark 3.....	19
Figura 3.3 Circuito Representando um Sistema TDEM	20
Figura 3.4 Voltagem de Saída do Receptor TEM e Detetor de Saída do Campo Magnético Sobre Bom e Mau Condutores	21
Figura 4.1 Mapa de Localização das SEV traço de Seção Geoelétrica	25
Figura 4.2 Mapa de localização das SEV e Traço de Seção Geoelétrica	26
Figura 4.3 Família de Curvas Tipo I.....	28
Figura 4.4 Família de Curvas Tipo II.....	29
Figura 4.5a Família de Curvas Tipo III.....	30
Figura 4.5b Família de Curvas Tipo III.....	31
Figura 4.6a Família de Curvas Tipo IV.....	32
Figura 4.6b Família de Curvas Tipo IV.....	33
Figura 4.7a Seções Geológicas Obtidas a partir das Seções Geoelétricas	37
Figura 4.7b Seções Geológicas Obtidas a partir das Seções Geoelétricas	38
Figura 4.8 Mapa de Contorno da Espessura da Formação Curuá e Solos	40
Figura 4.9 Mapa de Contorno da Espessura da Sucessão Trombetas, Maecuru e Ererê	41
Figura 4.10 Mapa de Contorno das Isóbatas do Embasamento	42
Figura 5.1 Resposta EM Relativa ao Modelo A.....	46
Figura 5.2 Resposta EM Relativa ao Modelo B	47

TABELA

Tabela 2.1 Coluna Crono-estratigráfica	11
--	----

ABSTRACT

This work due application of the electroresistivity and electromagnetic geophysical methods in the municipal district of Altamira, in the central area of the State of Pará, with the purpose of mapping the thickness of the aquifer layers and occurrence of diabase intrusions for finding a groundwater wells.

In this area are many outcrops of basement crystalline rocks covered with sediments of ages from the Paleozoic to Quaternary. The objective is to obtain water from the sediments of Inferior Devonian, more exactly in the Maecuru Formation.

There were made thirty four vertical electric soundings using the Schlumberger arrangement, the AB/2 distance varying from 100 to 500 meters. Also there were made 108 transient electromagnetic soundings with "coincident loop" arrangement, using an square loop of 50 meters.

Due to electronic problems and supraparamagnetic noises, the results of this electromagnetic soundings became very distorted, impossible to get from them important geologic information. Then, electromagnetic synthetic models were created to represent the geology of the area.

The data were obtained from the field were presented as apparent resistivity curves. They were plotted using a log-log scale and interpreted using the EGSLIB/SEV1D first and then with the EGSLIB/SEV1DIN program. The models used were horizontal, isotropic and homogeneous layers. The interpretation results allowed to determine approximate geoelectrical models which reflects the underground geological situation.

The interpretation results from the electric surveys were confronted with the results of the qualitative interpretation from the isogams map of the total magnetic field, allowing to delimit with more precision the zone of incidence of diabase sills, located at the north of the area. From the four distinguished geoelectric horizons, the third is essentially constituted by sands, therefore it is best for groundwater storage.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O município de Altamira, abrange uma área total de aproximadamente 146887 km². Sua população estimada em 78780 habitantes, tem como atividade econômica de maior significado a agropecuária, seguida pela produção extrativa vegetal, pesca e agricultura.

O regime hídrico é caracterizado por períodos marcadamente chuvosos, entre novembro e maio. No restante período do ano praticamente não chove.

À exceção do rio Xingu, os demais são de pequeno porte, fortemente influenciados pelo regime pluviométrico, reduzindo-se a pequenas dimensões ou chegando a secar, principalmente durante a estiagem.

Atualmente, o abastecimento de água à cidade e às fazendas, situadas na periferia, é feito através de cursos de água superficial existentes ou de lençóis subterrâneos, em poços escavados ou perfurados com profundidade inferior a 30 metros. O aproveitamento da água destes poços tem surtido pouco efeito devido à pouquíssima quantidade de água armazenada no solo. Além disso, a água destes poços é, em muitos casos, de péssima qualidade, apresentando-se fortemente mineralizada com teor de sais dissolvidos, que a torna imprópria para o consumo humano.

Apesar da proximidade e do grande caudal do rio Xingu, a COSAMPA (COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ) abastece menos de um terço da população da cidade com água captada naquele rio. A água do rio Xingu, além de acarretar elevado custo no tratamento, transporte e armazenamento, apresenta a possibilidade de ser contaminada por mercúrio devido a atividade de garimpo existente a montante.

Com o crescimento da cidade e o aumento da sua população, adicionada a implementação de alguns complexos agropecuários no município, a atual disponibilidade de água não tem condições de suprir a demanda, principalmente em épocas críticas. Necessita-se, portanto, de outras fontes complementares de abastecimento de água, que poderia ser feito através de aproveitamento de aquíferos subterrâneos mais profundos.

Geologicamente a área é caracterizada por sedimentos de origem fluvial, com idades que vão desde a pré-cambriana a quaternária, assentando sobre um embasamento cristalino, apresentando em certos pontos ocorrência de intrusões de diabásio de idade jurásico-cretácio.

1.2 OBJETIVO

Para o levantamento geofísico que tem como finalidade orientar os trabalhos de perfuração de poços na cidade de Altamira, foram escolhidos as técnicas geofísicas de prospecção denominadas: Sondagem Elétrica Vertical e Sondagem Eletromagnética Transiente.

As sondagens elétricas e eletromagnéticas foram realizadas em diversos pontos, dentro e fora da sede do município, com a finalidade de estudar e conhecer as estruturas geológicas bem como o seu potencial hidrogeológico.

Os dados de resistividade aparente obtidas no campo foram tratados e processados considerando modelos de camadas planas, horizontais, homogêneas e isotrópicas, permitindo estabelecer modelos geoeletricos aproximados para a configuração da subsuperfície.

A pesquisa foi realizada sob o apoio financeiro do CNPq e CAPES e logístico da Prefeitura Municipal de Altamira, utilizando equipamentos pertencentes ao Departamento de Geofísica do Centro de Geociências da UFPa. O trabalho de campo foi iniciado em 23 de setembro e concluído em 23 de outubro de 1997. Os dados coletados foram tratados nos períodos subsequentes a dos trabalhos de campo, obedecendo etapas previamente estabelecidas.

Os mapas geológico e magnético incluídos neste trabalho, fazem parte do relatório final do Projeto Integração Geológico-Geofísica, confeccionados pelo CPRM-DNPM, em 1979 na escala de 1:500.000. Neste trabalho, estes mapas se encontram comprimidos, não obedecendo por isso a escala original na qual foram elaborados.

Para consulta em trabalhos futuros se anexam em forma de tabelas, os resultados da interpretação final bem como os dados de campo de cada sondagem elétrica realizada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho de tese, está dividido em seis capítulos. A introdução no primeiro capítulo, trata de uma forma geral do trabalho realizado. O segundo capítulo, refere-se a localização e a geologia da área, bem como dos trabalhos já realizados em pesquisas anteriores.

Alguns fundamentos teóricos dos métodos utilizados na pesquisa foram incluídos no terceiro capítulo com objetivo de auxiliar pessoas pouco ligadas a esta área.

O quarto capítulo fala da metodologia de campo, dos equipamentos usados e dos resultados obtidos no campo bem como no laboratório.

O quinto capítulo fala dos resultados obtidos com o método eletromagnético no campo, bem como os resultados dos modelos eletromagnéticos sintéticos.

No sexto e último capítulo se reportam as conclusões a que se chegou nos trabalhos realizados, incluindo algumas recomendações finais.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Altamira está localizado na região central do Estado do Pará. Está limitado ao norte pelo município de Porto de Móz, ao sul pelo Rio Xingu, a oeste pelo município de Brasil Novo e a leste pelo município de Vitória do Xingu.

Fazendo parte da região do Xingu, o município de Altamira tem a sua principal cidade localizada pelas coordenadas geográficas $3^{\circ}12''$ de latitude sul e $52^{\circ}13''$ de longitude oeste. O acesso pode ser feito através de vôos regulares da capital do estado para aquele município. Em vôo direto gasta-se em média uma hora e cinco minutos sem escala.

A principal via de acesso rodoviária é a PA-152, que permite a ligação com a cidade de Marabá donde é possível alcançar a rodovia nacional BR-232. Não é possível chegar à cidade de Altamira pela via fluvial, pois não existe ligação. A ligação fluvial termina em Porto Grande, podendo continuar a viagem pela rodovia Transamazônica até a sede municipal.

A área estudada está limitada ao norte e ao sul pelos paralelos $2^{\circ}50'$ e $3^{\circ}30'$ respectivamente; a leste pelo meridiano $52^{\circ}10'$, a oeste pelo meridiano $52^{\circ}25'$ e pela margem direita do rio Xingu. A Figura 1.1 mostra o mapa de localização do município.

Concernente à hidrografia, a área se caracteriza pela importância do grande caudal do Rio Xingu, com destaque para a Volta Grande, trecho com inúmeras cachoeiras e corredeiras. Possui clima quente e úmido com períodos seco e chuvoso bem marcantes. A temperatura média é de 26°C e precipitação pluviométrica em torno de 2300 mm anuais.

O relevo varia de plano a suavemente ondulado, com presença de serras e colinas. Os solos dominantes possuem de baixa a média fertilidade. A vegetação dominante é representada pela floresta tropical úmida densa e pela floresta aberta mista.

Seus acidentes geográficos mais importantes são as cachoeiras: Alta, Araraquara, Cachimbo e Araras todas no rio Curuá, Anai e Caboca no rio Irirí e Anajás no rio Xingu. Entre as riquezas minerais destacam-se o carvão mineral, cristal de rocha, mica e diamante.

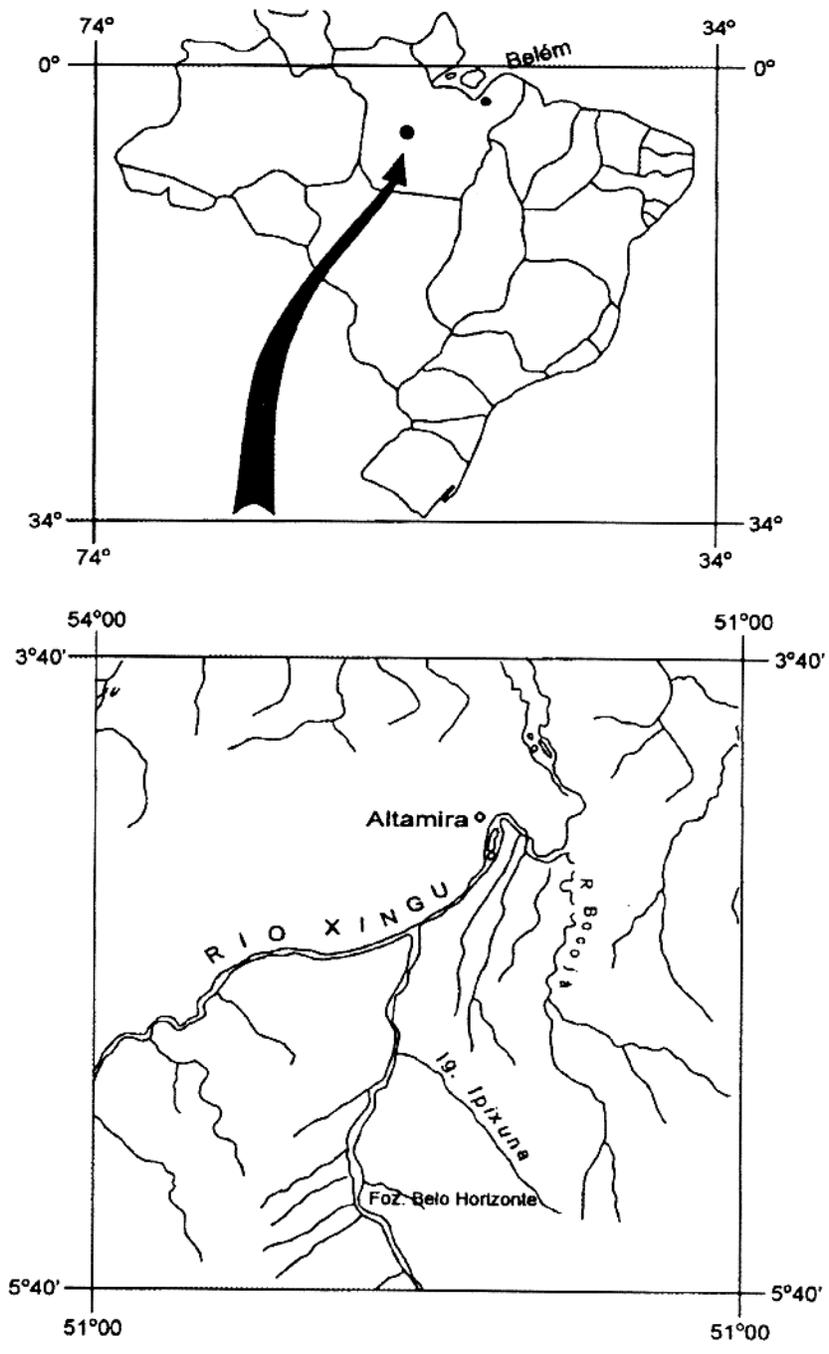


Figura 2.1 Mapa de localização

2.2 GEOLOGIA DA ÁREA

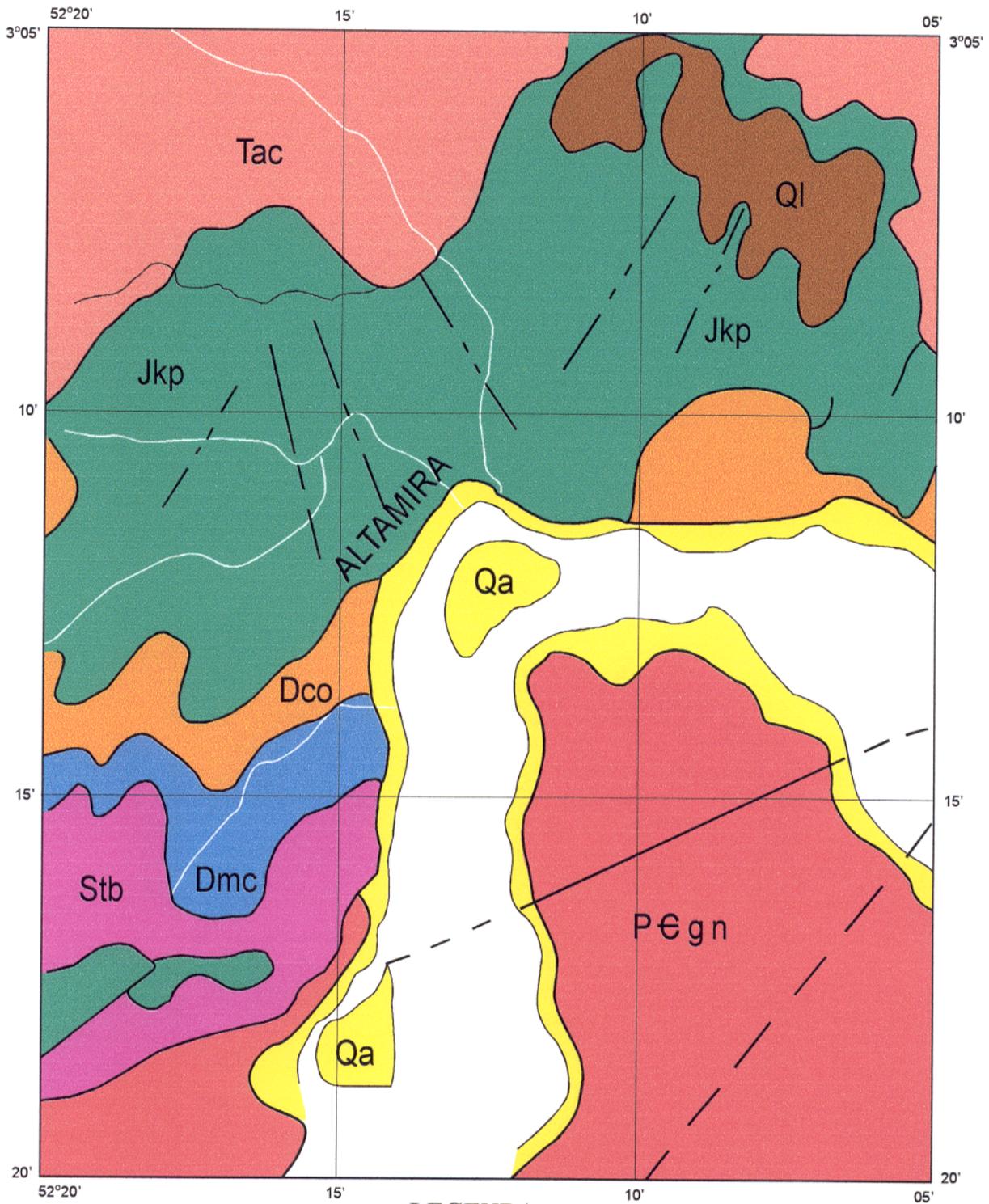
O mapa geológico da área ilustrado na Figura 2.2 está dividido em três subáreas geológicas. Na parte sul observam-se ocorrências de granitos, granodioritos e gnaisses migmatizados com pequenos afloramentos, constituindo o embasamento pré-cambriano ($P \in gn$), recoberto por uma seqüência sedimentar paleozóica.

A presença do Paleozóico na área é marcada pelos litotipos que compõem a Formação Trombetas (Stb) tidos como de idade Siluriana e composto por uma seqüência de arenitos caulínicos, em parte silissificados. Esta formação que aflora na área, recobre o embasamento em alguns pontos. É facilmente identificada, geralmente correspondendo aos folhelhos pretos, posicionando-se estratigraficamente sob a Formação Maecuru (Dmc) e assentando-se, de maneira discordante sobre as rochas do complexo basal.

Em seqüência de deposição, ainda no Paleozóico, mais precisamente no Devoniano Inferior, encontram-se os constituintes litológicos da Formação Maecuru (Dmc) com presença de arenitos finos a conglomeráticos, em alguns locais maciços e com folhelhos subordinados. Esta formação também aflora na área, e seu contato com a Formação Trombetas (Stb) é bem notável. É reconhecida por se tratar do primeiro pacote de arenitos acima do folhelho, com espessura geral superior a 40 metros, supondo atingir 80 metros ou mais. Posiciona-se estratigraficamente entre as formações Trombetas (Stb) e Ererê (Der). O contato superior é em geral, do tipo gradacional.

Os litotipos da Formação Ererê (Der), do Devoniano Médio, são compostos de intercalações rítmicas de siltitos e folhelhos; arenitos finos a grossos com estratificação cruzada e folhelho cinza médio a escuro. Esta formação é de difícil distinção na área, sobrepondo-se à Maecuru (Dmc) e encontrando-se subjacente à Formação Curuá (Dco). Esta unidade caracteriza-se por representar uma lenta transição entre os arenitos claros da Maecuru (Dmc) e os folhelhos pretos da Curuá (Dco) possuindo uma espessura em torno de 40 metros.

Completando a seqüência sedimentar do Paleozóico, mais precisamente no Devoniano Superior, encontram-se os litotipos da Formação Curuá (Dco), posicionado-se estratigraficamente sobre sedimentos da Ererê (Der). Um reflexo no solo da presença desta unidade em subsuperfície, é a constatação de um material argiloso de cor cinza sobre ou disseminado, observando-se também um cascalho placóide constituído de material argilo-limonítico.



LEGENDA

Tac - Formação Alter do Chão
 Jkp - Solo de Diabásio
 Qa - Aluvião

Ql - Concreções Lateríticas
 Dco - Formação Curuá
 Dmc - Formação Maecuru

Stb - Formação Trombetas
 P€gn - Embasamento Cristalino

Figura 2.2 Mapa Geológico

O conjunto litológico desta formação é representado quase que exclusivamente por um conjunto de folhelhos, argilitos (pouco freqüentes) e raríssima e ocasional presença de siltitos.

Recobrando parcialmente as unidades preexistentes, encontra-se a Formação Alter do Chão (Tac), caracterizada por se constituir essencialmente de sedimentos terrígenos. Posiciona-se estratigraficamente acima das diferentes unidades da área. Esta formação é composta essencialmente de argilitos, arenitos (finos a grosseiros) e conglomerados (seixos de quartzo quartzitos e argilitos) mal selecionados de idade cretácica-terceária.

Intrusões de idade mesozóica, constituídas por soleiras básicas são observadas na área. Estas intrusões denominadas de Diabásio Penetecaua (Jkp), tem suas rochas posicionadas estratigraficamente acima do pacote paleozóico e abaixo dos sedimentos que constituem a Formação Alter do Chão (Tac), isto é, no intervalo juro-cretácico. Os corpos mais representativos ocorrem, em geral, acima dos horizontes Ererê (Der) e seu solo (terra roxa) proveniente da sua decomposição é um solo típico, distinguível daqueles oriundos das demais unidades litológicas.

Por fim, sedimentos recentes (Qa) são encontrados depositados de maneira discordante sobre as mais variadas unidades estratigráficas. Ocorrem essencialmente margeando os cursos de água. Os aluviões ao longo do rio Xingu são constituídos essencialmente de areia de granulação média, cores claras, grãos subarredondados e mal selecionados.

A grande espessura e a alta permo-porosidade dos arenitos Maecuru (Dmc) e Ererê (Der) faz com que estas formações se tornem bons reservatórios de água. Além destas unidades, podem-se citar os vários níveis e lentes de arenitos e siltitos que se encontram confinados em pacotes de folhelho.

Deve-se salientar que face ao aumento da espessura da camada de solo em alguns pontos, na sua parte inferior em contato com camadas impermeáveis, acumula-se grandes quantidades de água.

Atualmente, o abastecimento de água a muitas famílias, escolas e agrovilas é feito através de suprimento subterrâneo, em poços perfurados ou escavados. Estes poços com profundidade inferior a 30 metros têm surtido pouco efeito, mesmo os locados sobre a formação Curuá (Dco), dada a sua natureza litológica.

O mapa geológico ilustrado na Figura 2.2 mostra uma faixa verde. Esta faixa indica a presença de um solo roxo, proveniente da decomposição do diabásio (Jkp). Durante os trabalhos de campo ficou provado que esta faixa verde representa somente detritos provenientes da

decomposição do diabásio (Jpk) e não a existência de diabásio como rocha ígnea. A presença do diabásio (Jpk) é assinalada na parte norte do mapa, onde soleiras básicas ocorrem entre as formações Curuá (Dco) e Alter do Chão (Tac).

Ainda neste faixa e fazendo contato com o solo de diabásio, algumas concreções lateríticas (Qi) são visíveis. Nota-se também uma faixa a sul mostrando o afloramento do embasamento (P \in gn) juntamente com as formações Trombetas (Stb), Maecuru (Dmc) e Curuá (Dco). A Ererê (Der) é de difícil distinção, por isso não aparece neste mapa. A parte norte deste mapa é totalmente coberta pela Formação Alter do Chão (Tac). A coluna crono-estratigráfica (CAPUTO & ANDRADE, 1968; MACAMBIRA et al. 1976), está apresentada de forma simplificada, restrita à área, na Tabela 2.1 (CPRM-DNPM, 1987; ALMEIDA, H.G., 1995;).

Tabela 2.1 Coluna crono-estratigráfica

Eratemala	Sistema	Série	Formação	Litologia
Cenozóico	Quaternário	Holoceno	Aluvião	Argilas, siltes, areias e cascalhos
	Terciário	Plioceno à paleoceno	Alter do Chão	Arenitos finos a grosseiros, siltitos e argilitos caulínicos de coloração variegada, mal consolidados, horizontes conglomeráticos
Mesozóico				
	Inferior			
Paleozóico	Devoniano	Superior	Curuá	Arenitos finos e claros, folhelhos pretos micromicáceos; diamictitos. Predominam os folhelhos.
		Médio	Ererê	Predominantemente siltitos maciços a laminados; arenitos claros e níveis de folhelhos e argilitos subordinados
		Inferior	Maecuru	Arenitos finos a conglomeráticos, maciços a estratificados, duros a friáveis; siltitos e folhelhos subordinados
	Siluriano	Inferior	Trombetas	Folhelhos de cinza a pretos, sulfetados. Intercalações de folhelhos, arenitos e siltitos. Diamictitos e conglomerados
Pré Cambriano		Médio a Superior	Complexo Xingu	Granitóides metassomáticos, granulitos e diatexitos com encraves anfíbolíticos; Diques e soleiras de granito óplito associados

2.3 ESTUDOS ANTERIORES

Em 1979 foi executado pela CPRM-DNPM, o projeto denominado Projeto Integração Geológico-Geofísica Sul do Pará, cujo objetivo principal foi a confecção de mapa geológico regional. A área deste projeto, já possuía recobrimento aeromagnético e radiométrico com 50% da superfície de Altamira (CPRM-DNPM, 1987).

O mapa aeromagnético ilustrado na Figura 2.3 foi confeccionado pelo CPRM-DNPM através do projeto citado. Contêm curvas de intensidade magnética de campo total a intervalos de 50 gamas. A intensidade média do campo magnético total, extraída deste mapa é da ordem de 28.150 gamas.

Para a interpretação qualitativa dos dados aeromagnéticos, o mapa de contorno das isogamas foi inicialmente colorido, obedecendo a uma escala de cores preestabelecida. A variação das cores foi a cada 50 gamas e distribuída da seguinte maneira: azul marinho 28000, azul celeste 28050, verde escuro 28100, verde claro 28150, amarelo 28200, laranja 28250 e rosa 28300 gamas.

No setor norte e centro deste mapa existe uma grande faixa (azul claro e azul escuro) cortando-o diagonalmente e passando pelo seu centro, com as isogamas formando feixes de linhas paralelas, preferencialmente orientadas na direção W-E.

Dentro desta faixa observam-se alguns fechamentos anômalos de cor amarela, com relevo magnético apresentando-se suave a levemente agitado. As anomalias apresentam amplitudes de 50 a 200 gamas.

O Diabásio (Jpk) e outras rochas básicas, cujo teor em materiais magnéticos é alto e, em menor proporção, o complexo Xingu (P \in gn), são os responsáveis pelas grandes amplitudes das anomalias magnéticas verificadas nesta faixa.

Devido ao seu menor teor em materiais magnéticos, os arenitos, siltitos, argilitos e folhelho das formações Maecuru (Dmc), Ererê (Der), Curuã (Dco) e Alter do Chão (Tac) são os responsáveis pelas baixas amplitudes das anomalias magnéticas nesta faixa.

A parte sul na margem esquerda do rio Xingu, é caracterizada por um nível de intensidade magnética que apresenta relevo suave e ligeiramente ondulado, cortado por anomalias de amplitude alta, geralmente atingindo no máximo 300 gamas. As anomalias estão dispostas diagonalmente, com orientação NW-NS indo de 200 até 300 gamas.

Também são observados fechamentos anômalos com raríssimas amplitudes ultrapassando 100 gamas. Reflete, pela sua monotonia, feições características de uma área onde as rochas, nele contidas, são portadoras de elevado teor de materiais magnéticos. Baseada nos litotipos individualizados no mapa geológico, ela compreende a maior parte dos granolitos e gnaises do complexo Xingu (P \in gn) e, em menor proporção, os arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos das formações Maecuru (Dmc), Ererê (Der) e Curuã (Dco).

De um modo geral, a norte e a sul, verifica-se um comportamento análogo dos arranjos das isogamas, não obedecendo a uma direção preferencial. Apresentam-se frequentemente recurvadas, indicando desigual distribuição do conteúdo em materiais magnéticos e/ou das unidades geológicas.

Em resumo, no setor norte, o diabásio (Jpk) é responsável pelas fortes anomalias magnéticas apresentadas. Ao sul, as fortes anomalias magnéticas são devidas as unidades geológicas mapeadas correspondentes aos granitos, granodioritos gnaissificados e migmatizados do Complexo Xingu (P \in gn) (ALMEIDA, H.G. 1995).

A inclusão desse mapa aeromagnético nesse trabalho tem como objetivo mostrar que as soleiras de diabásio (Jpk) se estendem sob os sedimentos da Formação Alter do Chão (Tac) em toda a parte norte da área pesquisada. As rochas ígneas e metamórficas, estendem-se na parte sul da área. Este fato é também evidenciado pelas sondagens elétricas verticais como veremos mais adiante.

Além deste trabalho, não existem na área, trabalhos de geofísica em escala de detalhe, sendo este o primeiro trabalho do gênero.

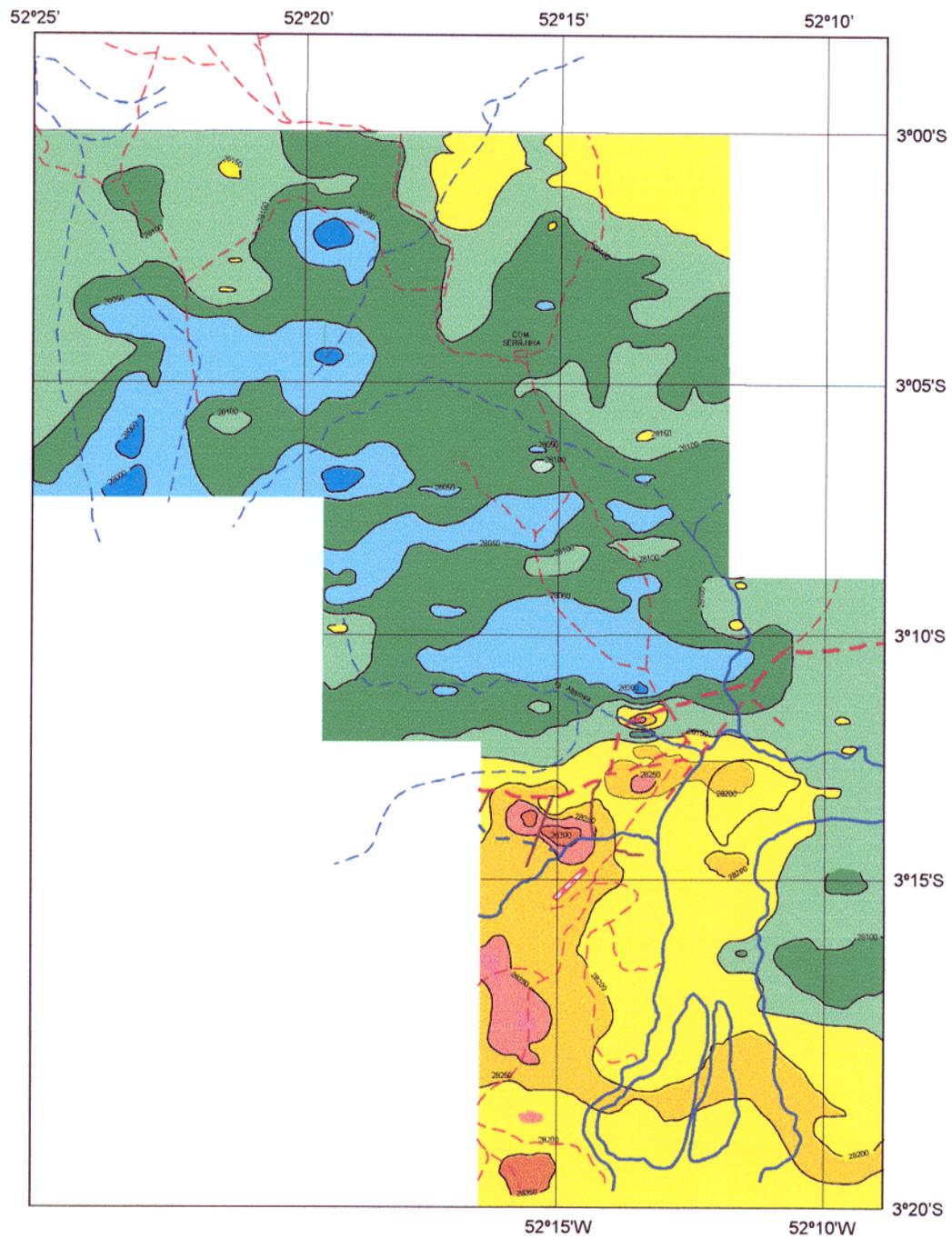


Figura 2.3 Mapa de isogamas do campo magnético total

3 –MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS

3.1 MÉTODO ELÉTRICO DE RESISTIVIDADE

3.1.1 Introdução

O método de eletroresistividade consiste na injeção de uma corrente elétrica contínua ou alternada de baixa frequência no subsolo através de dois eletrodos de corrente denominados de A e B e medir a resposta em forma de diferença de potencial (voltagem), através de outros dois eletrodos de potencial designados de M e N colocados em linha reta dentro dos dois primeiros, como ilustra a Figura 3.1.

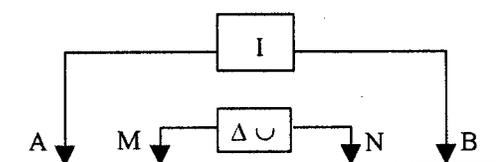


Figura 3.1 Linha de eletrodos sobre terreno homogêneo e isotrópico

O uso de baixa frequência no aparelho, visa minimizar o efeito da polarização espontânea nos eletrodos de corrente e também o efeito de acoplamento eletromagnético entre os circuitos de corrente e de potencial.

Conhecida a corrente aplicada I , e a diferença de potencial medida ΔV calcula-se o parâmetro ρ , denominado “resistividade”, para um meio homogêneo e isotrópico aplicando a fórmula,

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K, \quad (3.1)$$

em que

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2), K é função da disposição dos eletrodos AB e MN sendo por isso denominado de “coeficiente geométrico”. Para um meio homogêneo, a resistividade é a mesma qualquer que seja a posição dos quatro eletrodos A, B, M e N .

Entretanto, o ambiente geológico apresenta uma distribuição de resistividade que pode variar tanto na vertical como lateralmente. Devido a isto, os valores das resistividades obtidos não representam os valores verdadeiros das resistividades dos materiais na subsuperfície, embora estejam qualitativamente relacionados a eles. O que se obtém são valores denominados de resistividade aparente (ρ_a), definida como a resistividade que um meio teria se ele fosse homogêneo, (ORELLANA, 1972).

Como foi dito acima, a determinação da resistividade da subsuperfície requer uma excitação através de uma corrente. Se a corrente flui muito próximo da superfície a resposta medida somente proporcionará o conhecimento da resistividade do material superficial. Para se medir a resposta do material localizado a maiores profundidades é necessário que a corrente seja injetada até essas profundidades.

Um dos fatores que controla a profundidade atingida pela corrente é a separação entre seus pontos de injeção. Quanto maior for a separação dos eletrodos de corrente maior será a profundidade alcançada. Durante a execução de sondagens elétricas verticais Schlumberger, as medidas são tomadas com a distância entre os eletrodos de corrente sendo aumentada gradativamente, para se obter a resposta de profundidades cada vez maiores do meio estratificado. Os eletrodos de corrente são, neste caso, deslocados simetricamente em relação a um ponto central fixo, e os valores de resistividade aparente medidos são considerados representativos da variação da resistividade abaixo deste ponto.

3.1.2 Fundamentos Teóricos

Os fundamentos teóricos do método das sondagens elétricas verticais Schlumberger são bem documentados na literatura de Bahttcharya & Patra, de Orellana e de Koeffoed publicados em 1968, 1972 e 1979 respectivamente. Portanto, neste trabalho nos limitaremos apenas a alguns detalhes.

No tradicional método para o cálculo teórico da resistividade aparente (ρ_a) para o arranjo Schlumberger sobre a superfície de um terreno estratificado, se assume que a separação dos eletrodos de potencial (MN) seja tão pequena em relação a separação dos eletrodos de corrente AB , para que a diferença do potencial dividida por MN represente o campo elétrico no ponto central entre A e B (Orellana, Keller & Frischknecht, Sunde, apud RIJO et al. 1977).

Embora esta hipótese diminua o tempo de computação requerido para os problemas direto e inverso, coloca a usual restrição que $MN < AB/5$ nas medidas de campo. Mesmo com essa exigência há sempre uma pequena descontinuidade ou “embreagem” nos dados de resistividade aparente (Depperman, Kunetz, Zody et al. apud RIJO et al. 1977) introduzida quando MN é mudado durante o levantamento.

Quando fortes variações verticais na resistividade são encontradas, este efeito pode tornar-se completamente proeminente, algumas vezes maior do que o usual “ruído” causado por pequenas heterogeneidades laterais. Assim, para incluir os efeitos de espaçamento finito do MN , é preferível calcular a resistividade aparente teórica a partir de dois potenciais em M e N e não do campo elétrico no seu ponto central.

Embora o problema direto toma duas vezes mais tempo computacional, tem a vantagem de permitir maior versatilidade durante as medidas de campo: MN pode ser estendido mais do que $AB/5$ para tomar a vantagem do aumento dos níveis de voltagem.

O potencial $U(r, \vec{p})$ na distância r de uma fonte pontual de corrente I sobre a superfície de terreno estratificado é dado por,

$$U(r, \vec{p}) = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty R(\lambda, \vec{p}) J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (3.3)$$

em que $J_0(\lambda r)$ é a função de Bessel do primeiro tipo de ordem zero, e $R(\lambda, \vec{p})$ a função Kernel do vetor \vec{p} , constituído pelos parâmetros que descrevem a resistividade e espessura da subsuperfície estratificada. A resistividade aparente Schlumberger pode agora ser expressa como,

$$\rho_a = \frac{k}{I} [U(r_1, \bar{p}) - U(r_2, \bar{p})], \quad (3.4)$$

em que $r_1 = AB/2 - MN/2$, $r_2 = AB/2 + MN/2$.

A Equação (3.4) contém duas integrais, necessitando assim de maior tempo de computação do que a familiar expressão (Stefanesco et al. apud RIJO et al. 1977) para a resistividade Schlumberger,

$$\rho_s = \rho_1 \left[1 + 2L^2 \int_0^\infty \lambda \theta_n(\lambda) J_1(L\lambda) d\lambda \right], \quad (3.5)$$

que não inclui os efeitos do espaçamento finito de MN .

Se substituirmos $e^{-y} = \lambda$ e $e^x = r$ a Equação (3.3) torna-se,

$$U(r, \bar{p}) = \frac{-I}{2\pi r} \int_{-\infty}^{\infty} R(y, \bar{p}) e^{x-y} J_0(e^{x-y}) dy. \quad (3.6)$$

O termo $R(y, \bar{p})$ pode agora ser considerado como uma função entrada e o termo $e^x J_0(e^x)$ como a resposta impulso de um filtro estacionário. Se avaliarmos $R(y, \bar{p})$ somente para n pontos discretos, (3.6) pode ser aproximada por,

$$U(r, \bar{p}) = \frac{I}{2\pi r} \sum_{j=1}^n c_j R(\ln r - \eta_j, \bar{p}), \quad (3.7)$$

em que η_j são as abscissas dos coeficientes do filtro estacionário c_j . Mais detalhes sobre a teoria das sondagens elétricas verticais podem ser encontrados em RIJO et al. (1977)

3.2 MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS TRANSIENTES

3.2.1 Introdução

Nos tradicionais métodos eletromagnéticos no domínio da frequência (FDEM), a terra é energizada pela passagem de uma corrente alternada através de um loop usualmente situado sobre a superfície do terreno. O campo magnético primário criado pela corrente no loop induzirá correntes em todos os condutores presentes na terra. O campo eletromagnético secundário devido aquelas correntes junto com o campo EM primário são registrados nos receptores.

Em geral, o campo secundário que contém toda a informação relativa aos condutores possui um valor muito pequeno quando comparado ao campo primário. Na presença de ruídos, a separação do campo total medido em suas partes primária e secundária torna-se muito difícil. Este fato motivou a idéia do uso das medidas eletromagnéticas no domínio do tempo, simplesmente referidas como técnicas eletromagnéticas transientes (TDEM).

Neste tipo de técnicas, uma forte corrente elétrica contínua é passada através de um loop. No tempo $t = 0$, esta corrente é interrompida. O campo secundário devido às correntes induzidas na terra é medido na ausência do campo primário.

3.2.2 Fundamentos Teóricos

Uma das configurações de corrente mais usadas para efetuar medidas transientes, é ilustrada na Figura 3.2. Um loop é energizado pela passagem de uma forte corrente contínua. Depois de um tempo finito, durante o qual todos transientes da ligação tenham praticamente desaparecido, esta corrente é abruptamente interrompida. De acordo com a lei de indução de FARADAY, uma rápida mudança do campo primário no transmissor induzirá correntes nos condutores próximos. O campo magnético transiente devido a estas correntes, pode ser medido com receptores adequados.

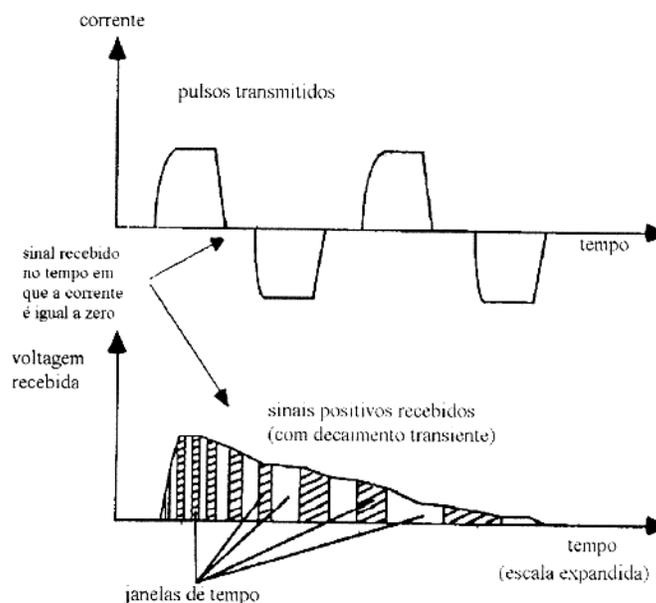


Figura 3.2 Sinais transmitidos e recebidos por um sistema SIROTEM Mark 3
(Adaptado da MINERAL CONTROL INSTRUMENTATION Ltd, 1985)

A física dos efeitos transientes pode ser visualizada por um simples circuito teórico, comparando um sistema TDEM como um transformador de três bobinas acopladas com uma delas simulando o efeito de um horizonte condutivo, Figura 3.3.

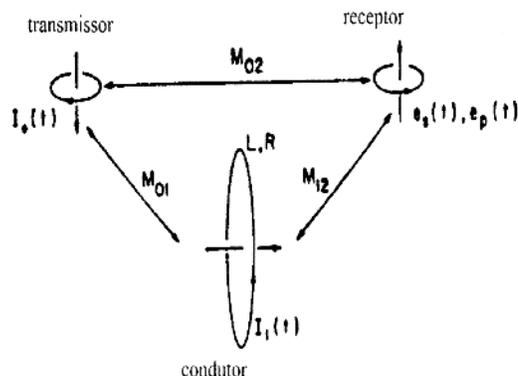


Figura 3.3 Circuito representando um sistema TDEM

Considerando M_{ij} como a indutância mútua entre bobinas i e j e, R e L como a resistência e indutância do condutor, na excitação da bobina transmissora por uma função degrau, é fácil mostrar que a corrente $I(t)$ fluindo na bobina condutora é dada por (Macnae apud NABIGHIAN 1991),

$$I(t) = \frac{M_{01}I_o}{L} e^{-t/\tau}, t \geq 0, \quad (3.8)$$

em que I_o é a corrente do transmissor e $\tau = L/R$, a constante de tempo do circuito na subsuperfície.

Por outras palavras, a forma descontínua da corrente no transmissor criará instantaneamente uma corrente no circuito da subsuperfície que terá um decaimento exponencial com a constante de tempo τ . No tempo $t=0$, a amplitude inicial da corrente depende somente do fluxo do campo primário através de todo o circuito na subsuperfície ($I_o M_{01}$) e da dimensão do condutor L , sendo independente da condutância $1/R$. A constante de tempo τ depende de ambos, condutância e dimensões do condutor.

A voltagem de saída $e_s(t)$ na bobina receptora é proporcional a taxa de variação no tempo do campo magnético secundário com o tempo, sendo escrita como,

$$e_s(t) = M_{12} \frac{\partial I}{\partial t} = I_o \frac{M_{01} M_{12}}{L} \left[\delta(t) - \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \right], t \geq 0, \quad (3.9)$$

em que $\delta(\tau)$ é a unidade de impulso ou função delta.

A expressão (3.9) inclui importantes características dos campos transientes. Para condutores pobres (pequeno τ), voltagens iniciais são grandes, mas o campo decai rapidamente. Para bons condutores (grande τ), voltagens iniciais são pequenas e o decaimento do campo é lento. Temos assim um simples critério para reconhecer e diferenciar os efeitos dos vários condutores, como se ilustra na Figura 3.4.

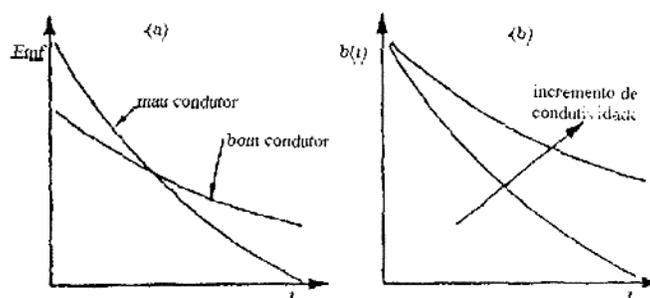


Figura 3.4 Voltagem de saída do receptor TEM (a) e detetor de saída do campo magnético (b) sobre bom e mau condutores

3.2.3 Profundidade de Penetração

É de grande importância em geofísica de prospecção saber-se até que profundidade penetram as ondas eletromagnéticas na subsuperfície. Se o terreno fosse um isolante perfeito, as ondas poderiam alcançar qualquer profundidade. Mas as próprias rochas encaixantes e o manto de intemperismo possuem resistividade finita, portanto a energia da onda incidente é absorvida e a amplitude das ondas decresce segundo a seguinte exponencial, no caso de ondas planas,

$$\frac{H_z}{H_0} = e^{-(\sqrt{\mu\omega\sigma/2})z}, \quad (3.10)$$

em que ω = frequência angular, μ = permeabilidade magnética, σ = condutividade e z igual a profundidade.

Da Equação (3.10) se observa que quando $\omega\mu\sigma$ é pequeno há pouca atenuação e o campo magnético penetra no condutor. A corrente induzida responsável pela atenuação sofrida pelo campo distribui-se pelo condutor e gera um campo magnético secundário de pequena expressão. Quando $\omega\mu\sigma$ é grande, a atenuação é intensa, o campo primário penetra pouco no condutor e as correntes induzidas são superficiais e produzem um intenso campo secundário que pode cancelar o primário.

Obviamente, a partir de uma certa profundidade, o campo magnético é nulo. Como a diminuição da amplitude desse vetor é gradual convencionou-se chamar de “profundidade de penetração” ou skin depth (δ) a profundidade em que a amplitude se encontra atenuada em $(e)^{-1} = 0.368$, ou seja, em aproximadamente 37% de seu valor inicial com rotação de fase em um radiano. A partir da Equação (3.10) podemos escrever,

$$\left(\sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}}\right)\delta = 1. \quad (3.11)$$

Considerando o caso de um condutor não magnético, isto é, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ h/m}$ e $\omega = 2\pi f$ com f igual a frequência de operação do sistema,

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} \text{ metros}, \quad (3.12)$$

mostrando que a profundidade de penetração δ varia inversamente com a frequência. Durante a execução de sondagens eletromagnéticas, as medidas são tomadas sobre um ponto fixo, sendo os parâmetros medidos considerados representativos da estratificação abaixo deste ponto.

Como se disse anteriormente, para energizar o terreno se emite um pulso de corrente. Este pulso é um espectro composto por várias frequências, isto é, contém desde a mais baixa até a mais alta frequência. Desta maneira, a resposta das estruturas profundas é obtida com as baixas frequências e as altas frequências dão resposta das estruturas rasas ou superficiais. Desligando o transmissor, a resposta transiente mostra um decaimento da curva com incremento do tempo, que corresponde a uma resposta de frequência decrescente (GRANT & WEST, 1965; LUIZ & SILVA, 1983; Nabighan & Macnae, apud NABIGHIAN, 1991).

4 - INSTRUMENTAÇÃO E MEDIÇÃO NO CAMPO

4.1 PROCEDIMENTO DE CAMPO

O levantamento se constituiu 34 sondagens elétricas utilizando o arranjo Schlumberger. As sondagens foram distribuídas por toda a área de estudo, sendo 19 dentro da cidade e 15 fora dela. Os vários perfis construídos têm orientação N-S aproximada, perfazendo-se um total 42 km (Figuras 4.1 e 4.2). O maior número de sondagens na cidade é justificado por ser exatamente lá a área de maior interesse na pesquisa hidrogeológica para fins do abastecimento de água.

O equipamento usado foi um resistímetro R-100, fabricado pela Geotest que mede diretamente os valores da diferença do potencial ΔV e corrente I . A potência nominal de saída é de 100 W com um intervalo de leitura de 0,1 a 200 mV. A fonte de corrente contínua usada foi de uma bateria de automóvel, cuja vantagem é a facilidade de transporte durante a execução dos trabalhos de campo.

Para evitar as várias fontes de interferência, foram tomados todos os cuidados operacionais, tais como a não realização de sondagens próximo às linhas de transmissão, o afastamento do circuito fonte ao de medida e o uso de eletrodos não polarizáveis para atenuar os ruídos produzidos pelas várias fontes de potenciais espontâneos. Para diminuir a resistência de contato entre o terreno e os eletrodos de corrente, usou-se água salgada nos pontos de contato dos eletrodos com o terreno como também, enterrá-los o mais fundo possível.

Devido as limitações do aparelho usado no levantamento, o máximo de distância eletródica $AB/2$ alcançada foi de 500 metros e, dependendo das condições do local, esta distância podia variar entre 100 á 500 metros, fazendo uma média de 330 metros.

A hipótese de alcançar o topo do embasamento era dada pela subida assintótica de 45° da parte final da curva de campo que simultaneamente era desenhada no local. A sondagem era terminada quando apresentasse o comportamento assintótico da curva ou quando era impossível continuar as expansões dos eletrodos de corrente.

Para contornar a dificuldade imposta ao método eletroresistivo, relativa a expansão dos eletrodos para realizar uma sondagem elétrica vertical (SEV), necessitando para isso de maior espaço no terreno, foi também usado o método eletromagnético transiente (TEM), que além de rápido e barato, requer de menos espaço no terreno para executar uma sondagem eletromagnética.

Em consequência, foram realizadas 108 sondagens eletromagnéticas transientes em 46 pontos, a maioria executadas sob os pontos das SEV com arranjo "loop coincidente" de 50 metros de lado.

O aparelho utilizado foi um SIROTEM Mark 3 da GEO INSTRUMENTS PTY LTD, que mede diretamente os valores da voltagem e calcula a resistividade aparente. O sistema usa um máximo de 24 volts no loop e uma corrente que varia de 5 a 8 ampères fornecida por baterias.

Tal como no caso das sondagens elétricas verticais, na execução das sondagens eletromagnéticas transientes também foram tomados todos os cuidados operacionais para evitar interferências de fontes externas. Assim, antes de cada medida era processado o sistema para filtrar os distúrbios atmosféricos (sféricos) e também eram ativados os sistemas para filtrar frequências de 50 e 60 Hz relacionadas as linhas de transmissão de corrente elétrica.

No período do dia compreendido entre 11 e 14 horas, a execução de sondagens era evitada por ser o período em que se verificava maior atividade atmosférica (relâmpagos). A execução de sondagens próximo as linhas de transmissão de corrente também era evitada.

Devido a extensa vegetação ou a presença de construções, as sondagens foram efetuadas ao longo de estradas ou ruas, não obedecendo por isso a uma malha regular como é recomendado em trabalhos de prospecção geofísica.

Devido a forma como se apresentaram os dados das sondagens eletromagnéticas (muito distorcidos), sua análise não será descrita, sendo somente descritos os resultados das sondagens elétricas. Mesmo assim, no capítulo 5 será feito uma análise dos problemas encontrados com estas sondagens TEM.

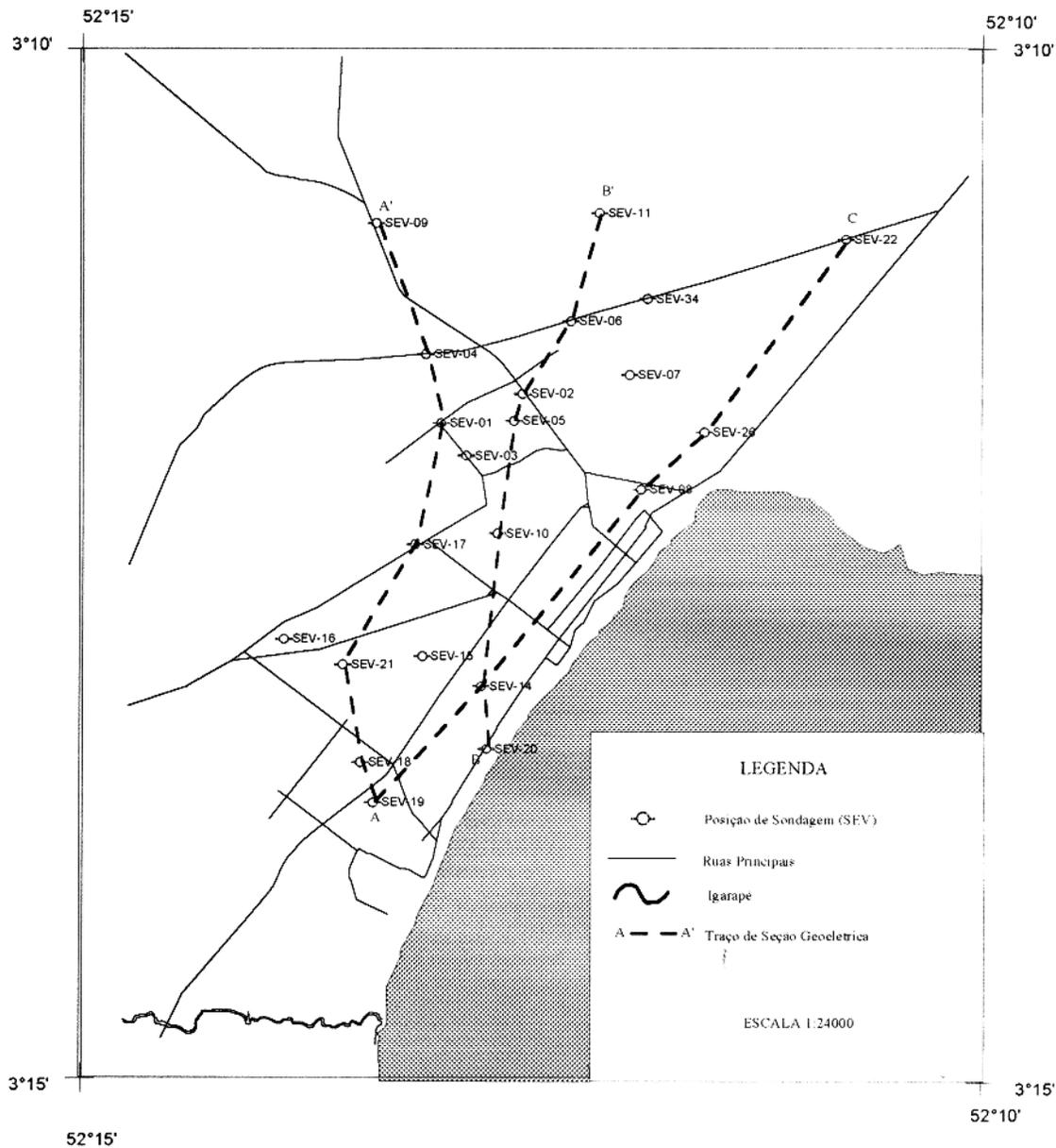


Figura 4.1 Mapa de localização das sondagens e traço de seção geotécnica

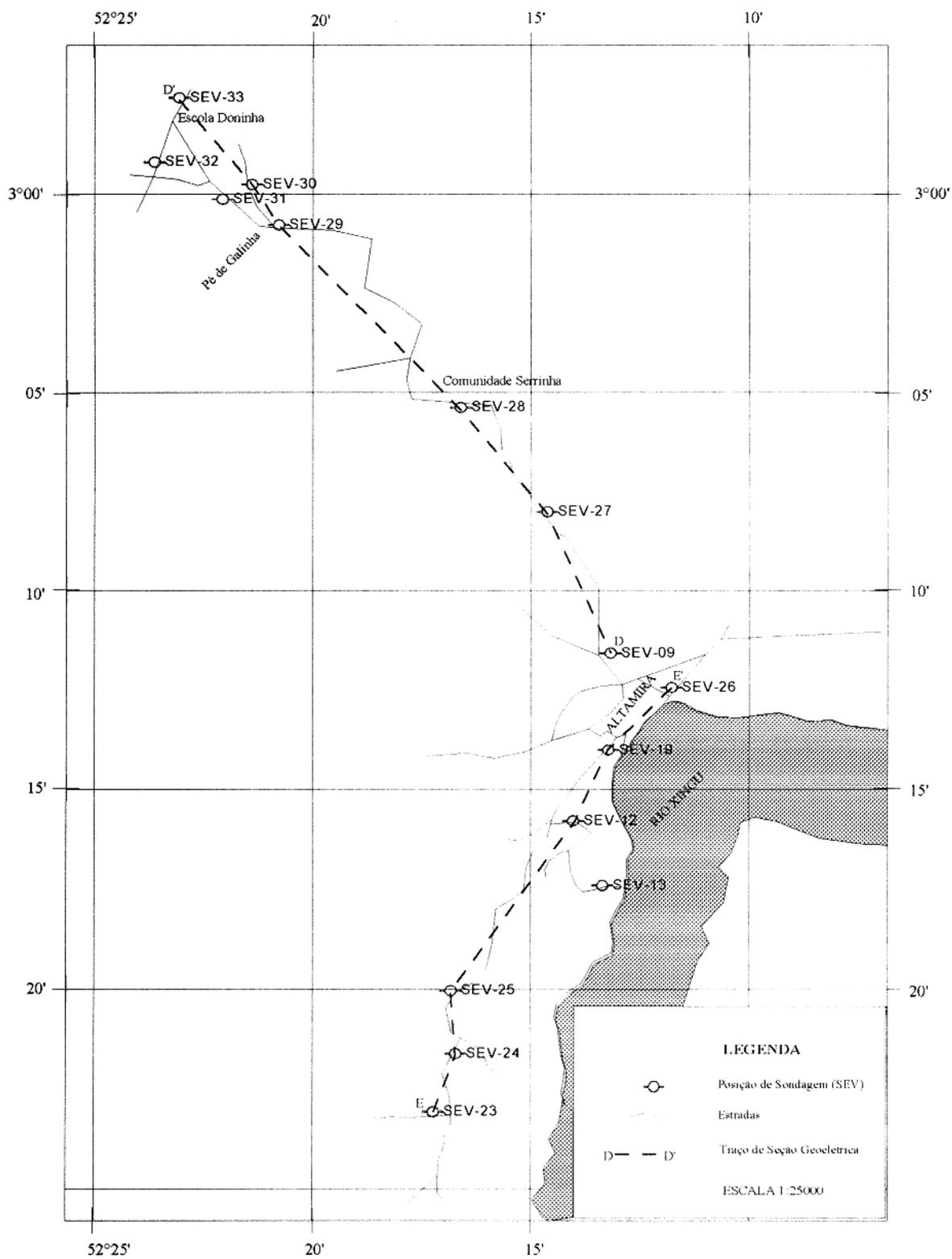


Figura 4.2 Mapa de localização de sondagem e traço de seção geoeletrica

4.2 ANÁLISE DAS SEVs

A análise das 34 SEV, permitiu subdividi-las em quatro tipos distintos de famílias de curvas. Esta divisão, está baseada nas informações da geologia de superfície e de alguns poços rasos existentes.

Assim, as sondagens efetuadas sobre o embasamento ou sobre sedimentos rasos da Formação Trombetas foram designadas de família do tipo I, as efetuadas sobre as formações Maecuru e Ererê foram designadas de família do tipo II, as sondagens efetuadas sobre a Formação Curuá com cobertura do solo de diabásio designadas de família do tipo III e as sondagens realizadas sobre a Formação Alter do Chão como família do tipo IV.

4.3 FAMÍLIA DE CURVAS DE SEV

4.3.1 Família tipo I

Esta família de curvas é composta pelas sondagens realizadas diretamente sobre o embasamento ou sobre sedimentos rasos, típicas da parte sul da área pesquisada. Esta área está recoberta por sedimentos da Formação Trombetas, de idade Paleozóica, cobertos por solo arenoso. Constituído somente por três sondagens (Figura 4.3) as curvas são do tipo *KH* (ORELLANA, 1972), indicando basicamente uma seqüência condutivo-resistivo-condutivo-resistivo. Estas sondagens são caracterizadas por:

- primeiro horizonte com valores de resistividade variando de 500 até 1600 Ω -m e espessuras até 2 metros correspondendo a cobertura, composto por uma mistura variável de solos.
- o segundo horizonte com resistividades variando entre 230 a 5400 Ω -m e espessura entre 2 e 8 metros, correspondendo a camadas arenosas.
- seguida de um horizonte com resistividade entre 60 a 2500 Ω -m e espessura entre 2 a 7 metros, correspondendo camadas arenosas com frações argilosos intercaladas.
- um ramo terminal com um declive de 45°, é observado, devida a presença do embasamento cristalino, cuja resistividade é superior a 2500 Ω -m.

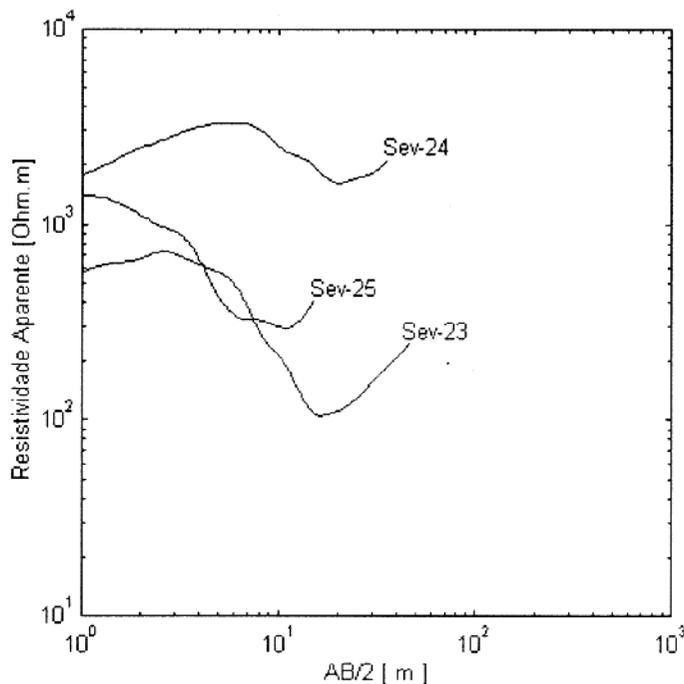


Figura 4.3 Família de curvas tipo I

4.3.2 Família tipo II

Esta família de curvas é composta somente por duas sondagens, realizadas sobre os sedimentos areno-argilosos de idade Devoniano Inferior e Médio pertencentes as formações Maecuru e Ererê respectivamente. Nestas sondagens, o embasamento está já a uma profundidade considerável, aumentando, conseqüentemente, a espessura das camadas sedimentares subjacentes.

O formato da SEV-13 é diferente da SEV-12, não sendo facilmente correlacionável com as outras sondagens realizadas na área. As curvas de sondagem desta família são apresentadas na Figura 4.4 e se caracterizam por:

- primeiro horizonte com valores de resistividade variando de 65 a 2400 Ω -m e espessura até 1.5 metros correspondendo ao solo de cobertura, composto materiais areno-argilosos.
- seguido de um horizonte com resistividade em torno de 1000 Ω -m e espessura variando entre 9 a 18 metros, correspondendo a camadas arenosas.
- seguido de um horizonte com resistividade variando de 90 a 450 Ω -m e espessura entre 175 e 250 metros, correspondendo aos sedimentos areno-argilosos e arenosos das formações

Trombetas, Maecuru e Ererê. Na SEV-13 nota-se a presença de um horizonte muito resistivo (9000 Ω -m.) que corresponde a um arenito bastante compacto, bem visível nos afloramentos ao longo das margens do rio Xingu.

- seguido do substrato resistivo com resistividade em torno de 1000 Ω -m representando o embasamento cristalino, constituído pelos granitos, granodioritos e gnaises do Complexo Xingu.

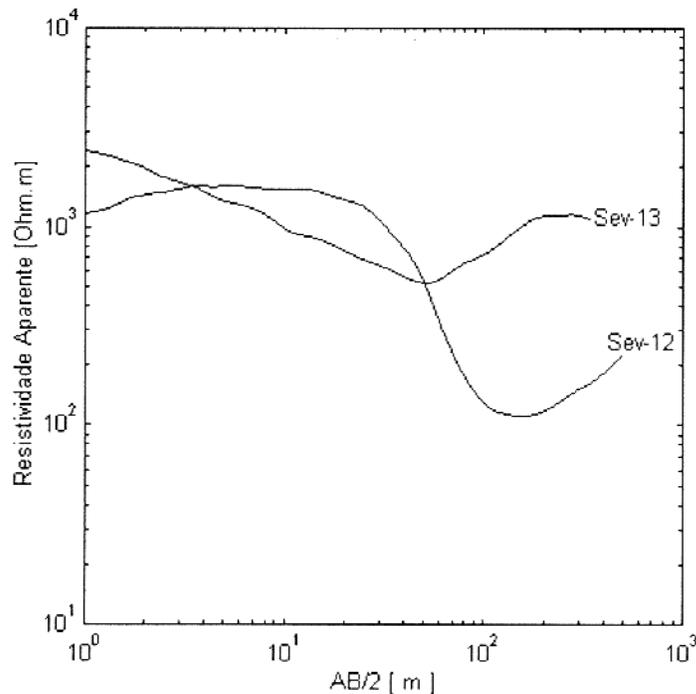


Figura 4.4 Família de curvas tipo II

4.3.3 Família tipo III

A família de curvas do tipo III, representa as sondagens efetuadas na parte central da área estudada, coberta por sedimentos argilo-arenosos de idade Devoniano Superior pertencentes a Formação Curuá, com presença em alguns pontos, de solo de coloração avermelhada produto da intemperização do diabásio.

Estas sondagens representam uma sequência resistiva-condutiva-resistiva ou condutiva-resistiva-condutiva, algumas vezes aparecendo estratos intermediários, chegando a seis camadas. Para sua melhor representação, as curvas de sondagem desta família foram divididas em dois gráficos ilustrados na Figura 4.5. As sondagens desta família estão caracterizadas por:

- horizontes resistivos e condutivos na superfície, constituídos por concreções lateríticas, solo da intemperização das soleiras de diabásio ou de sedimentos arenosos ou areno-argilosos com resistividades variando entre 16 a 1400 Ω -m com 2 metros de espessura.
- seguido por um horizonte com resistividade variando de 230 a 1900 Ω -m e 0.7 a 115 metros de espessura.
- o terceiro horizonte geoeletrico tem resistividade variando de 30 a 3200 Ω -m e 2 a 200 metros de espessura, representando desde camadas areno-argilas muito secas a camadas areno-argilas contendo água nos níveis arenosos.
- seguido por um horizonte geoeletrico de resistividade entre 20 a 1800 Ω -m e 10 a 250 metros de espessura, representando camadas argilo-arenosas a arenosas também contendo água nos níveis arenosos.
- o quinto horizonte geoeletrico, tem resistividade entre 30 a 450 Ω -m e 55 a 130 metros de espessura que representa camadas areno-argilas e lentes arenosas atribuídas a paleocanais.
- seguido de um horizonte resistivo profundo, com >1200 Ω -m, representando o embasamento cristalino constituído pelos granitos, granodioritos e ganisses migmatizados do Complexo Xingu.

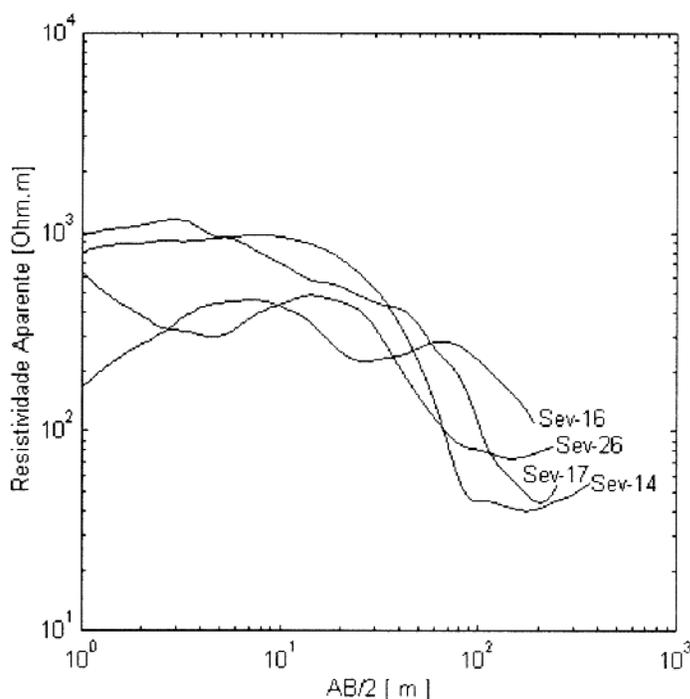


Figura 4.5a Família de curvas tipo III

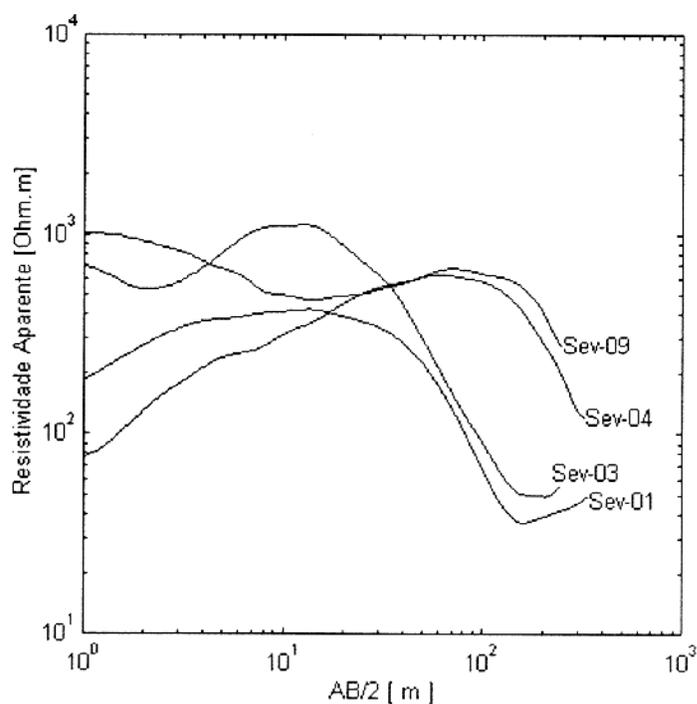


Figura 4.5b Família de curvas tipo III

4.3.4 Família tipo IV

As sondagens pertencentes as curvas da família tipo IV, são típicas da parte norte da área prospectada, recoberta por sedimentos de idade cretácia-terceária pertencentes a Formação Alter do Chão. Representando uma seqüência resistivo-condutivo-resistivo-condutivo, as curvas desta família também foram divididas em dois gráficos para sua melhor apresentação, como se ilustra na Figura 4.6. As sondagens desta família são caracterizadas por cinco horizontes geelétricos assim discriminados:

- o primeiro horizonte geelétrico com resistividades entre 700 e 3600 Ω -m, tem espessuras variando até 16 metros representando camadas de arenitos com níveis de argilas intercalados e solos residuais secos.
- seguido por um horizonte com resistividade variando de 420 a 900 Ω -m e espessura entre 5 a 45 que corresponde a uma camada de arenitos com intercalações argilosas. Este arenito possui um horizonte saturado de água, confirmado pela presença de alguns poços com profundidade variando entre 6 a 20 metros apresentando níveis de água.

- seguido por um horizonte representando as soleiras de diabásio com resistividade variando de 1000 a 6700 Ω -m e espessura entre 70 e 270 metros.
- o quarto horizonte geolétrico apresenta resistividade variando de 30 a 780 Ω -m, correspondendo a uma horizonte areno-argiloso e arenoso.
- por último, o substrato de fundo com resistividade entre 220 a 800 Ω -m, também associado a um arenito.

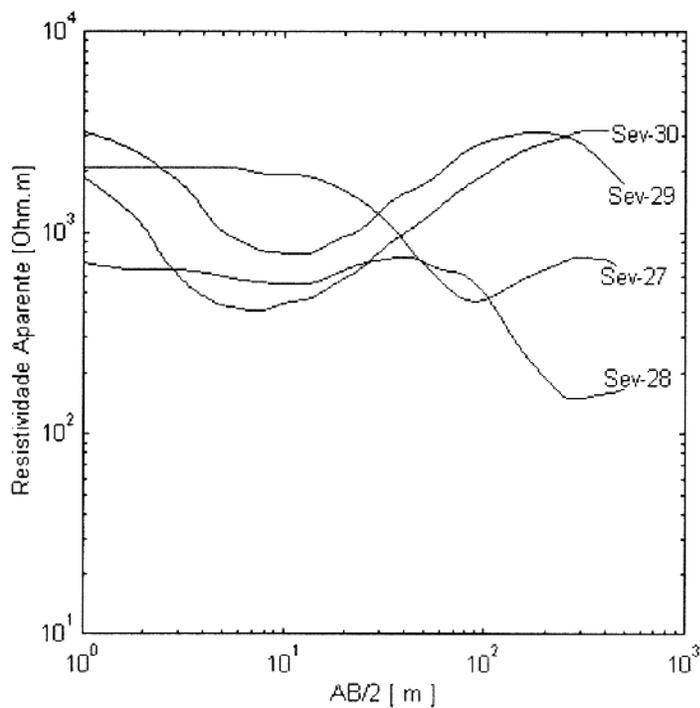


Figura 4.6a Família de curvas tipo IV

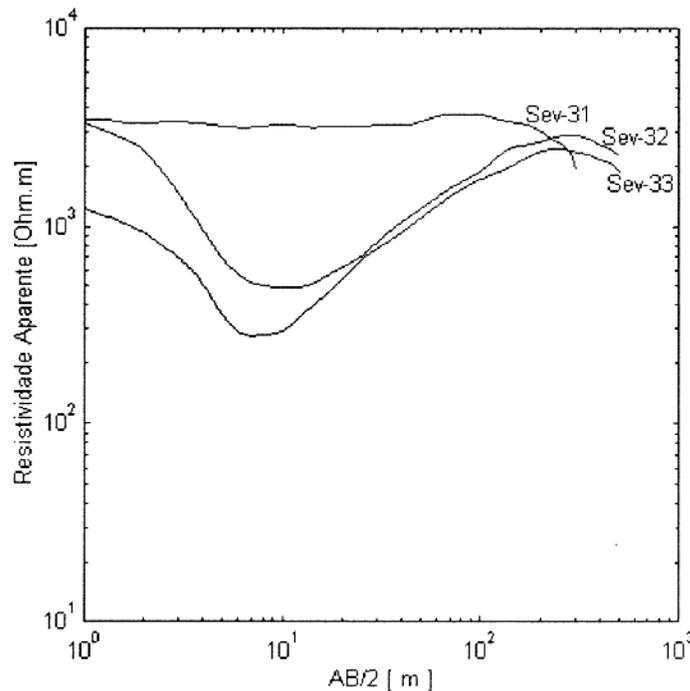


Figura 4.6b Família de curvas tipo IV

4.4 INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA

Após uma análise qualitativa de todos os dados geofísicos obtidos e informações geológicas disponíveis, passou-se a etapa seguinte, que consiste na interpretação quantitativa ou simplesmente interpretação dos dados geofísicos. (Anexo I)

A interpretação dos dados de sondagens elétricas de camadas estratificadas horizontais de diferentes resistividades, geralmente não é muito significativa sem algum controle estratigráfico de confiança ou de alguns dados de resistividade intrínseca em vários pontos dentro da área do levantamento geofísico. Isto é particularmente verdadeiro para camadas profundas que normalmente são mais afetadas pela equivalência e superposição.

Infelizmente, na área estudada quase não existem informações de geologia de poços profundos. Convém então destacar que devido a esta escassez de informações adicionais, nossa interpretação está sujeita à aprimoramentos na medida que surgirem novos dados.

A interpretação foi direcionada na determinação da variação da resistividade com a profundidade, considerando estratos horizontais homogêneos e isotrópicos. Primeiro as

resistividades aparentes obtidas no campo foram plotadas em papel bilogárítico e posteriormente as curvas suavizadas para eliminar as pequenas perturbações introduzidas na curva e corrigir as descontinuidades provenientes da mudança de posição dos eletrodos de potencial durante as embreagens.

Durante a interpretação, o ajuste entre curvas de campo e curvas calculadas foi várias vezes testado usando modelos de 2, 3, 4 e 5 camadas mais um substrato, considerado de espessura infinita. Várias tentativas foram feitas para obter o ajuste final aceitável entre os dados observados e os calculados. O principal critério para aceitar os modelos calculados era a comparação visual na tela do monitor entre os dados observados e os calculados, considerando um erro mínimo de aproximação entre elas.

Os modelos resultantes do ajuste das curvas pelo método direto, foram usados como modelo inicial para o método de inversão. A inversão produziu modelos geoeletricos 1-D, com os quais foram confeccionadas as seções geoeletricas.

4.4.1 Método Direto

Este método calcula a resposta para um modelo escolhido para representar a subsuperfície investigada. Modelos iniciais são estimados, incluindo espessuras e suas respectivas resistividades, que após calculados no computador, suas curvas são comparadas com aquelas dos dados observados no campo.

Sucessivamente, se confronta a curva calculada com aquela observada. Se as duas coincidirem, então a interpretação é matematicamente aceitável. Caso não houver coincidência, se estima um novo modelo e se repete o procedimento, por isso este método é também chamado de "tentativa e erro". Mas o modelo geoeletrico construído no computador, por ser válido do ponto de vista matemático, na maioria das vezes não respeita a situação geológica real. Por isso, durante a interpretação deve ser feito um controle das curvas calculadas utilizando todas as informações de geologia possíveis.

O cálculo dos valores de resistividade aparente para a confecção da curva teórica introduzindo-se valores de resistividade e espessura para os modelos estimados e escolhidos para representar o subsolo sob investigação foi realizado pelo programa computacional EGSLIB/SEVID, (RIJO, 1994a).

4.4.2 Método Inverso

Para determinar as resistividades verdadeiras das várias camadas foi usado um programa 1-D ridge-regression denominado EGSLIB/SEVIDINV, (RIJO, 1994b). Este programa se baseia nas técnicas dos mínimos quadrados amortecidos e requer uma seção geoeétrica inicial estimada, incluindo número de camadas, resistividades e espessura de cada camada.

Os resultados obtidos pelo método direto de ajuste de curvas foram fornecidos ao programa de inversão como modelo inicial. O programa ajusta estes parâmetros de tal maneira que a curva do modelo converge, vindo a ser a melhor adaptação às curvas formadas pelo conjunto das curvas de campo. O programa de inversão não muda o número das camadas dentro do modelo, mas admite pequenas mudanças de resistividade e espessura. Os resultados obtidos com o método inverso estão apresentados no Anexo I.

4.5 RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO

4.5.1 Seções Geoeétricas

Os resultados da interpretação quantitativa das sondagens elétricas em termos de seções geoeétricas são apresentados na Figura 4.7, ilustrando camadas geoeétricas comuns entre as várias sondagens efetuadas.

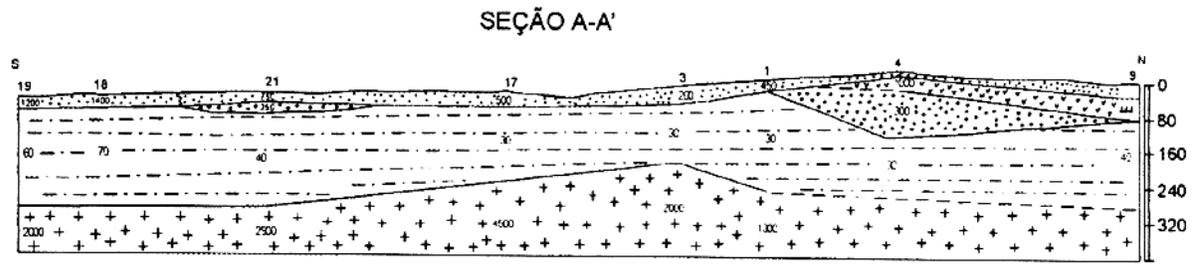
Segundo SOUSA (1996), a interpretação das SEV, quando feita isoladamente, revela, na direção vertical, os diversos horizontes geoeétricos presentes no subsolo do ponto investigado. Quando feita coletivamente, porém, permite visualizar a continuidade lateral e a distribuição espacial dos diferentes pacotes geoeétricos identificados.

Com base nisto, as seções geoeétricas 1-D de algumas posições de sondagens foram reunidas constituindo cinco seções geoeétricas 2-D o que permitiu uma melhor compreensão da continuidade lateral da distribuição espacial dos diferentes estratos geoeétricos, referentes a perfis *S-N*, *SW-NE* e *SE-NW* e relacionados aos cortes das Figuras 4.1 e 4.2.

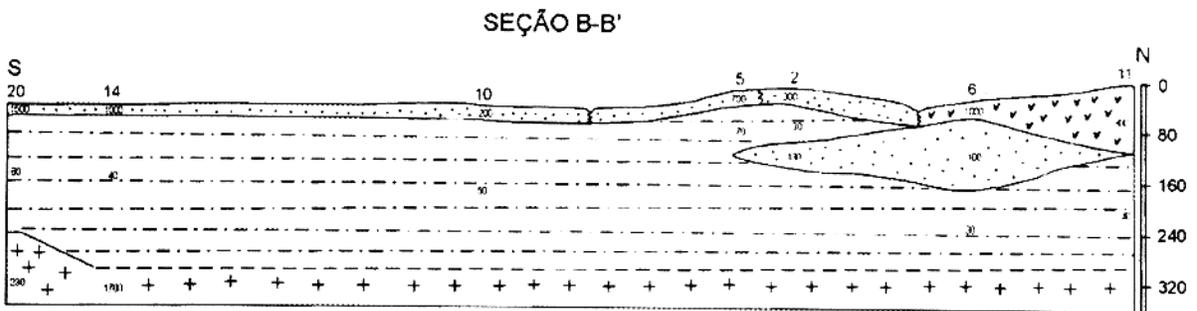
Por não se dispor de dados altimétricos de superfície, tomaram-se valores aproximados de altitude para os diversos pontos de sondagem que compõem as diversas seções geoeétricas,

considerando uma escala vertical de 1:8000. Os resultados da interpretação baseada sobre os modelos acima citados, estão assim esquematizados:

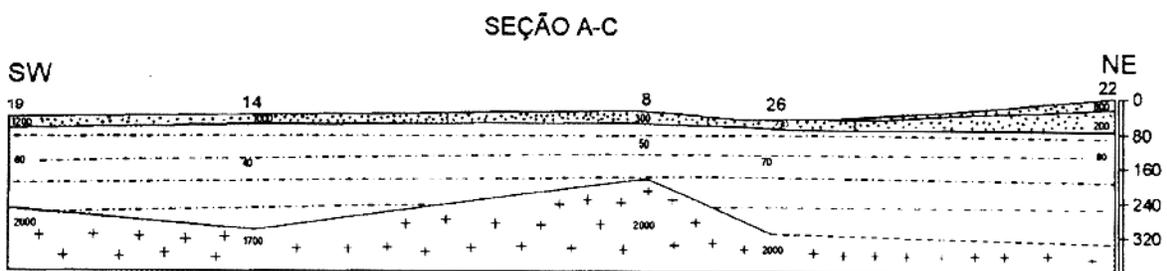
- O estrato geoeétrico que corresponde ao solo, tem valores de resistividade que variam de 16 a 3500 Ω -m e 2 metros de espessura, que por ser muito delgada, não é representável nos perfis geoeétricos.
- O segundo estrato geoeétrico tem resistividade variando de 180 a 1500 Ω -m e espessura de 5 a 120 metros. Nota-se ainda a presença de substratos com resistividade entre 1400 a 6700 e de 40 e 270 metros de espessura, associado a soleiras de diabásio.
- O terceiro estrato geoeétrico tem valores de resistividade entre 20 e 100 Ω -m e de 120 a 300 metros de espessura. Pequenas lentes com resistividade entre 100 a 300 Ω -m e espessura entre 20 a 90 metros são visíveis, representando paleocanais.
- O substrato resistivo de fundo, com resistividades entre 1000 a 6500 Ω -m apresenta relevo irregular, principalmente junto as bordas da bacia.



(a)



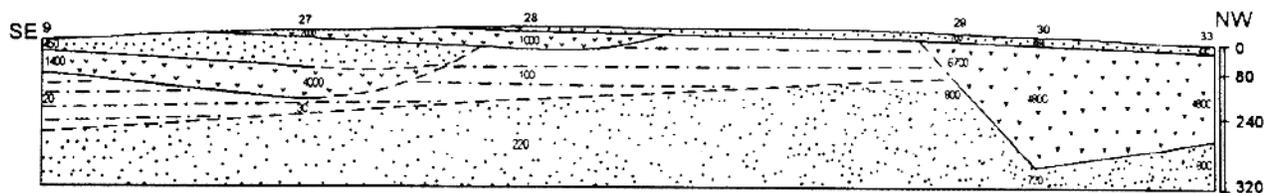
(b)



(c)

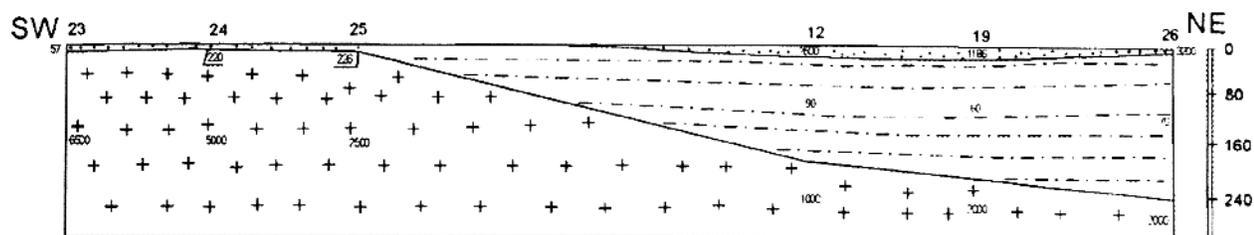
Figura 4.7a Seções geológicas obtidas a partir de seções geolétricas

SEÇÃO D-D'



(d)

SEÇÃO E-E'



(e)

LEGENDA

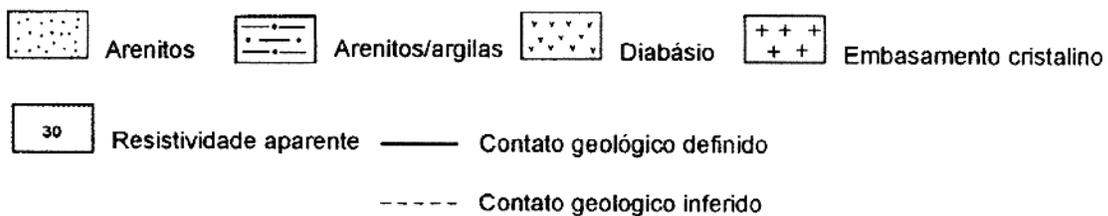


Figura 47b Seções geológicas obtidas a partir de seções geoeletricas

4.5.2 Mapas de Contorno

Com base nos resultados da interpretação das sondagens elétricas verticais, foram elaborados três mapas de contorno. Devido a fraca amostragem de pontos de prospecção, estes mapas não abrangem toda a área de levantamento, sendo construídos somente para a cidade onde a densidade de pontos de pesquisa é maior. Para a confecção destes mapas, foram usadas espessuras calculadas durante a interpretação. Nos pontos de sondagem onde não foi possível alcançar o topo do embasamento, os valores das espessuras das camadas foram inferidos, podendo por isso apresentar uma pequena margem de erro, considerada aceitável.

O mapa de contorno ilustrado na Figura 4.8 mostra a profundidade estimada do topo da Formação Ererê e por conseqüência a espessura da Formação Curuá e solos. O solo inclui silts, concreções lateríticas, argilas e camadas arenosas superficiais sobre a formação Curuá.

A espessura das formações Trombetas, Maecuru e Ererê é ilustrada no mapa de contorno da Figura 4.9. A espessura desta seqüência sedimentar varia de 120 metros nas bordas da bacia, para valores de aproximadamente 300 metros. Os baixos valores de resistividade neste horizonte, são devidos a seqüência de camadas areno-argilosas ou vice-versa, contendo níveis de água desde o topo a base.

As formações Trombetas e Ererê são constituídas essencialmente por folhelho, não sendo por isso, boa fonte de água subterrânea devido a presença abundante de argilas. Em alguns pontos de afloramento destas formações, foram medidos baixos valores de resistividade aparente, que indicam materiais argilosos que restringem a percolação da água para dentro do aquífero. Os altos valores de resistividade aparente no topo, são devidos á camadas alteradas ou secas.

A Formação Maecuru é composta por rochas com capacidade de armazenamento de água, por ser essencialmente constituída por arenitos. Devido a grande espessura destas camadas, elas podem contribuir substancialmente para o potencial hidrogeológico da área.

A Figura 4.10 mostra o mapa de contorno das isóbatas do embasamento, referidas em cota absoluta local. A maior profundidade é evidenciada a norte e nordeste da área. Uma análise deste mapa mostra concavidades no topo do embasamento nas proximidades das SEVs 02 e 11, que favorecem a acumulação de água e geram um aumento local da espessura do horizonte aquífero, representando, portanto, os melhores locais para a perfuração de poços. (RIJO et al, 1977; CARRASQUILLA & RIJO, 1991; PORSANI & RIJO, 1993;).

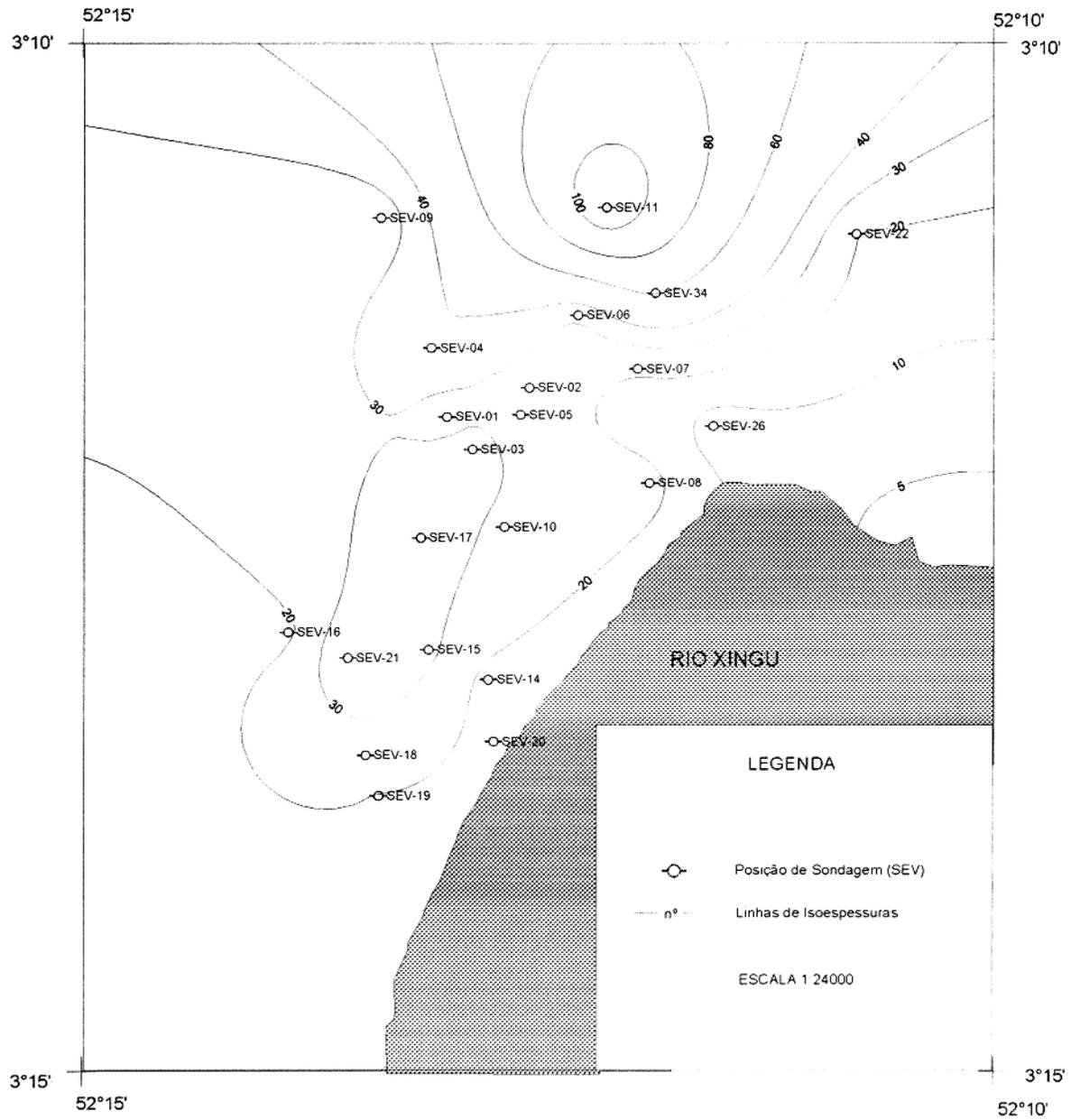


Figura 4.8 Mapa de contorno da espessura da Formação Curuá e solos

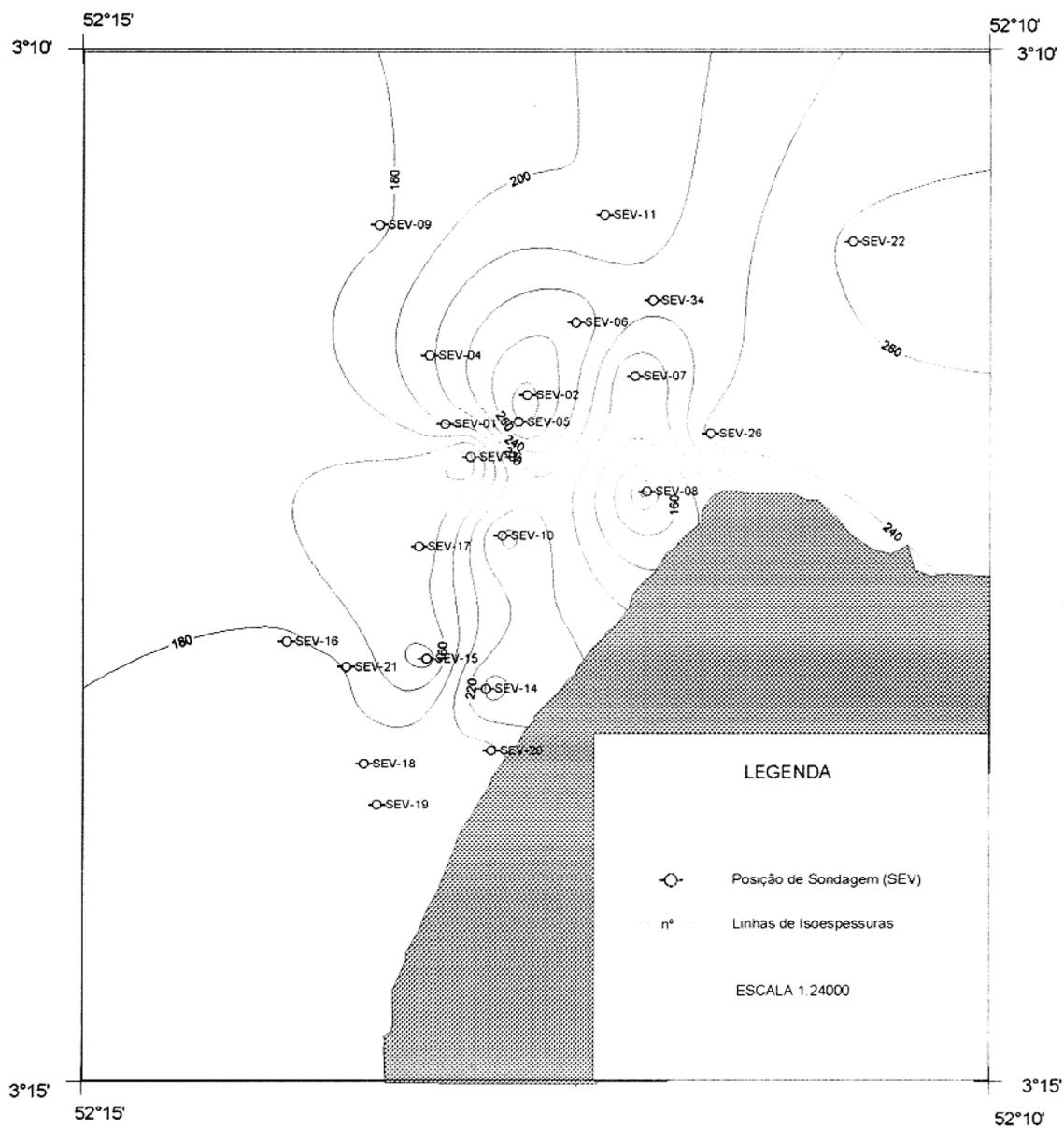


Figura 4.9 Mapa de contorno da espessura da sucessão Trombetas, Maecuru e Ererê

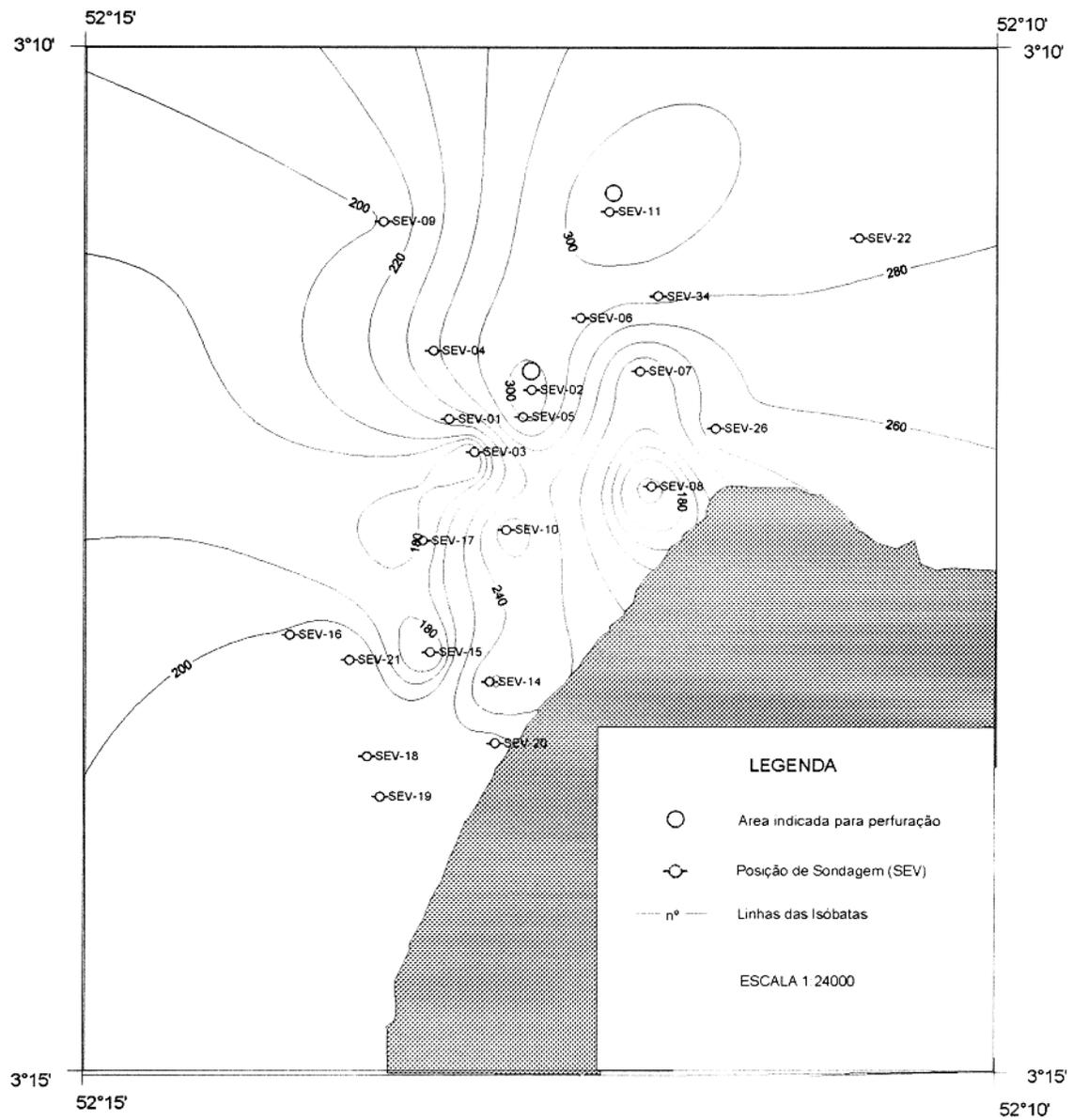


Figura 4.10 Mapa de contorno das isóbatas do embasamento

5 - MODELOS ELETROMAGNÉTICOS SINTÉTICOS

5.1 INTRODUÇÃO

Além das 34 sondagens elétricas, foram também executadas 108 sondagens eletromagnéticas transientes em 46 pontos, cujos resultados seriam correlacionados com aqueles obtidos com método eletroresistivo. Foi usado um SIROTEM Mark 3 que emprega uma corrente de excitação de 5 ampères, na forma de pulsos quadrados. O aparelho mede a voltagem e calcula os valores de resistividade aparente usando a formula assintótica,

$$\rho_a = 6.32 \times 10^{-12} A^{2/3} \times b^{4/3} \times (V/I)^{-2/3} \times t^{5/3},$$

em que: ρ_a = resistividade (ohm-m), A = área efetiva do receptor (m^2), b = lado do loop transmissor (m), V/I = resposta transiente (nanovolts/ampère) e t = tempo necessário para que o campo transiente desapareça (ms). A área efetiva é dada multiplicando o número de espiras pela área do loop.

5.2 MODELOS

Com base nos resultados das SEV foram escolhidos dois modelos para analisar os dados TEM. Estes modelos apresentados a seguir, com suas respectivas curvas de voltagem transiente e resistividade aparente são representativos de situações geológicas encontradas na região estudada, sobre os quais nossas análises serão baseadas.

O primeiro modelo analisado foi denominado "Modelo A" sendo constituído pelos seguintes parâmetros: $\rho_1 = 400\Omega\text{-m}$, $\rho_2 = 1200\Omega\text{-m}$, $\rho_3 = 40\Omega\text{-m}$, $h_1 = 20\text{m}$ $h_2 = 50\text{m}$ mais substrato. O segundo modelo foi denominado "Modelo B", constituído pelos parâmetros: $\rho_1 = 700\Omega\text{-m}$, $\rho_2 = 30\Omega\text{-m}$ $\rho_3 = 4000\Omega\text{-m}$, $h_1 = 34\text{m}$ e $h_2 = 150\text{m}$ mais substrato, onde ρ e h são as resistividades e espessuras dos estratos.

Para gerar as respostas relativas a estes modelos foi usado o EGSLIB/TDCON1D (RIJO, 1994c), no modo "alta resolução", que investiga estruturas rasas e resistivas, estendendo-se desde 8 microsegundos a 92 milisegundos em 53 janelas e loop quadrado de 50 metros de lado.

Os intervalos discretos de tempo em que a resposta transiente é mostrada são chamados janelas ou canais. Cada janela tem uma largura com tempo inicial e final. As medidas são tomadas considerando o centro de cada janela. Por exemplo, a décima janela no modo "alta resolução" do sistema SIROTEM Mark 3 tem início em 0.104 milisegundos e final em 0.122 milisegundos com o centro em 0.113 milisegundos.

5.3 RESPOSTA TEM RELATIVAS AOS MODELOS

5.3.1 Introdução

A execução de sondagens no método TEM usando equipamento SIROTEM Mark 3 oferece muitas vantagens sobre o método eletroresistivo. O método TEM além de ser barato, inclui rapidez e facilidade na execução de sondagens e obtenção das leituras. Não existem efeitos de eletrodos; os efeitos laterais são considerados mínimos ou nulos e possui uma boa capacidade de penetrar grandes profundidades para um determinado arranjo. Estas vantagens e outras, tais como fazer medidas com o transmissor desligado e no mesmo transmissor, cancelamento ou redução de fontes de ruído conhecidas e obtenção de altos níveis de sinal pelo empilhamento em profundidade sem a necessidade de fontes de energia muito fortes são, característica deste método.

Apesar destas vantagens, o método eletromagnético não é aplicável em áreas altamente resistivas. Além disso, este método não detecta camadas altamente resistivas entre sequência de camadas condutivas e é muito sensível aos ruídos geológicos, culturais e a todos os ruídos causados pelas várias fontes eletromagnéticas existentes.

As vantagens descritas, habilitam o SIROTEM a ser usado em várias aplicações, entre elas a execução de sondagens verticais cujos resultados revelam variações de resistividade aparente em profundidade que podem ser interpretados e produzirem resistividades e profundidades verdadeiras de interfaces geoeletricas (HENDERSON & GEO INSTRUMENTS PTY, 1995).

5.3.2 Análise das Respostas

A qualidade dos dados de sondagens eletromagnéticas transientes obtidos no campo, foi quase a mesma em toda a área estudada. Uma análise às curvas de campo, mostra que os dados obtidos apresentam-se inconsistentes nas primeiras janelas. Os valores de resistividade aparente observados nas últimas janelas chegam a miliohm-m, valores considerados muito baixos.

Este problema está relacionado aos fenômenos supraparamagnéticos (spm). A presença de materiais spm, próximo da superfície, pode causar anomalias transientes abaixo de $10 \mu V/A$ (Busseli apud McCracken et al. 1985). Isto é observado normalmente em ambientes intemperizados, especialmente em áreas com cobertura de solo laterítico como é típico na área estudada. Respostas afetadas por efeitos spm, dão a idéia de um terreno mais condutivo do que é realmente e, nas últimas janelas os valores de resistividade aparente são mais baixos do que aqueles esperados.

As figuras deste capítulo ilustram o exemplo de curvas de sondagem obtidas no campo, representadas por linhas contínuas (valores positivos) e linhas descontínuas (valores negativos), estes últimos rebatidos, para sua representação no formato bilogarítimo. As curvas de respostas dos modelos calculados estão representadas por pontos. Em geral, as voltagens transientes calculadas apresentam valores menores do que as voltagens observadas no campo. Estas voltagens apresentam-se muito distorcidos principalmente nas primeiras janelas.

Durante as medidas de campo foram observadas voltagens transientes negativas. Teoricamente, a curva de decaimento obtida sobre terreno com condutividade e permeabilidade magnética independentes da frequência, deve ter uma resposta positiva ao longo de toda a faixa de tempo de medida, como ilustram as Figuras 5.1 e 5.2. Contudo, observaram-se valores negativos numa faixa de tempo nos dados de campo, fenômeno atribuído à existência de materiais supraparamagnéticos.

Nas últimas janelas, as voltagens transientes calculadas caem mais rapidamente para valores assintóticos do que as voltagens medidas no campo que apresentam uma queda mais suave. Nas primeiras janelas, a resistividade aparente observada se aproxima a aquela obtida com os modelos sintéticos mas apresenta grandes distorções na faixa de tempo que vai de 0.1 a 1.0 milisegundos. Esta distorção provoca um salto destes valores desde um máximo de $200 \Omega\text{-m}$ de 1.0 milisegundos para aproximadamente $3 \cdot 10^{-2}$ ou $1.5^{-1} \Omega\text{-m}$ de 92 milisegundos. As resposta dos

modelos “A” e “B” calculados sinteticamente e os observados no campo crescem na direção do valor das voltagens e resistividades do semiespaço. (FERREIRA, 1979; RAICHE et al, 19985; McCracken et al, 1985).

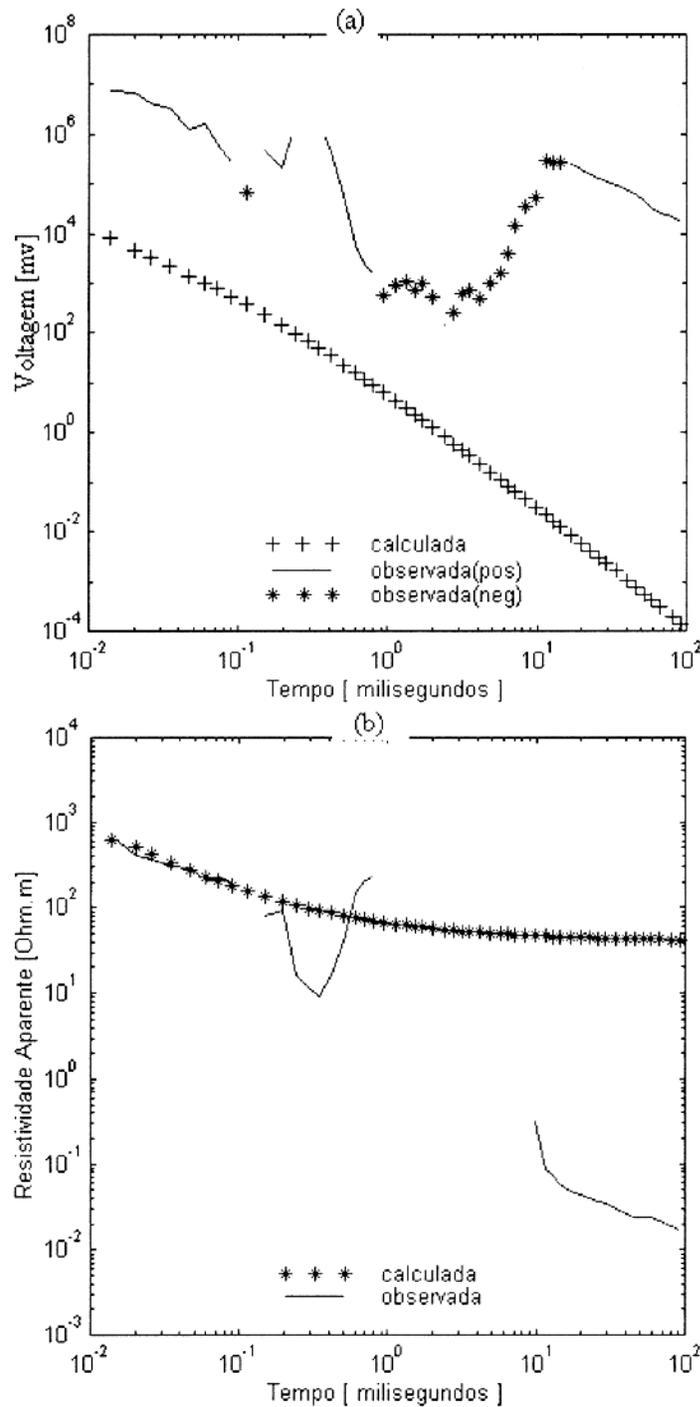


Figura 5.1 Resposta de voltagem transiente (a) e de resistividade aparente (b) relativa ao modelo A

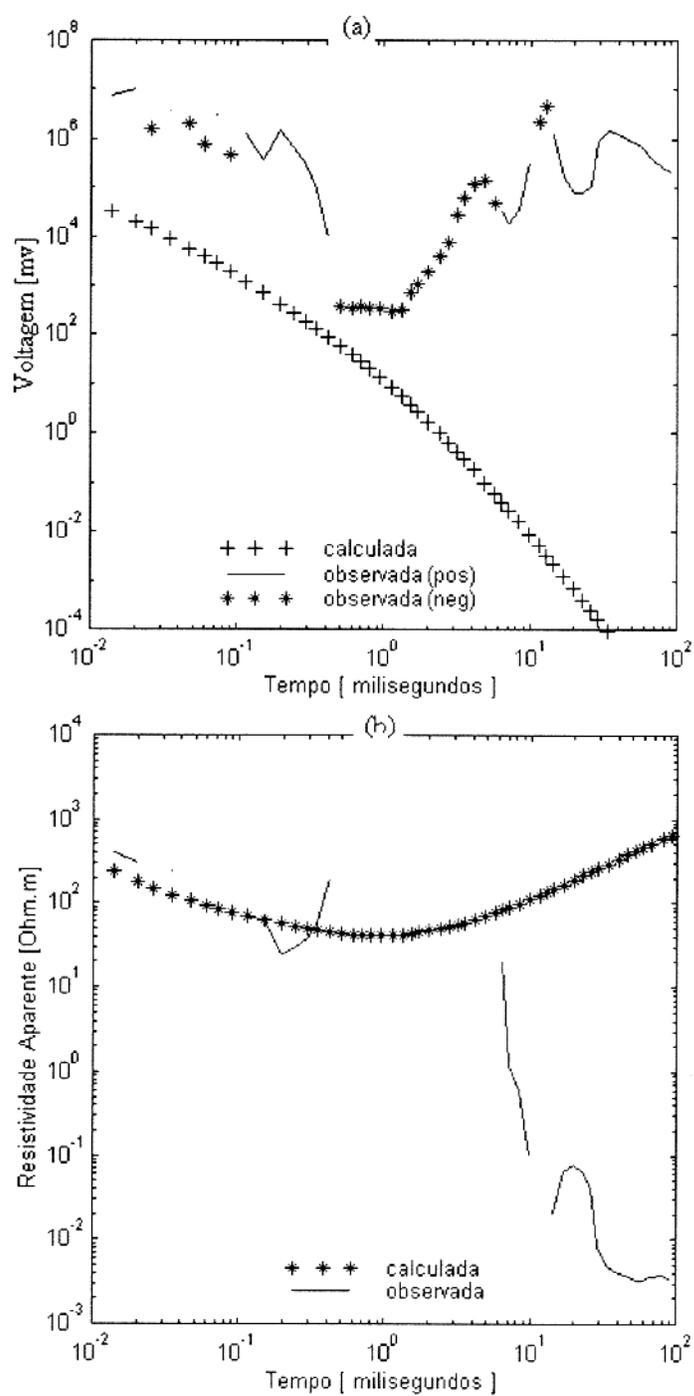


Figura 5.2 Resposta de voltagem transiente (a) e de resistividade aparente (b) relativa ao modelo B

6 - RESULTADOS

6.1 MÉTODO ELETRORESISTIVO

Com os resultados das sondagens elétricas, foi possível determinar a espessura das formações sedimentares sobre o embasamento, permitindo assim conhecer a topografia do embasamento e sua direção de mergulho.

Também foi possível delimitar a área de intrusões de soleiras de diabásio ocorridas no juro-cretácico, situada a norte da área estudada. As curvas de SEV obtidas nesta área, são caracterizadas por altos valores de resistividade aparente no primeiro e segundo horizontes. Estes resultados são correlacionáveis com os resultados obtidos na interpretação qualitativa das isogamas do mapa aeromagnético, confirmando a existência destas estruturas.

O mapa magnético ilustrado na Figura 2.3 mostra uma faixa amarela na sua parte sul com pequenos fechamentos anômalos, que correspondem a rochas ígneas e metamórficas do embasamento. As faixas amarelas observadas na parte norte do mesmo mapa, correspondem as fortes anomalias causadas pelas intrusões de diabásio.

Os resultados da interpretação das SEV serviram para definir quatro horizontes geoeletricos na área. Analisando a resistividade de cada um destes horizontes e adicionando as informações geológicas de superfície e de profundidade disponíveis foram construídas 5 seções geológicas baseadas nas seções geoeletricas, apresentando os seguintes horizontes geológicos:

- a) o primeiro horizonte, cuja espessura alcança valores de até 2 metros, relaciona-se a todos os solos de cobertura. As fortes variações de resistividade estão relacionadas a acumulação ou não de água.
- b) o segundo horizonte geoeletrico, tem espessura variável entre 5 para 120 metros. Pelos valores de resistividade que apresenta foi interpretado como sendo constituído por sedimentos que vão desde pouco argilosos, areno-argilosos a arenosos.
- c) o terceiro horizonte, mais espesso com 120 a 300 metros foi relacionado a três formações: Trombetas, Maecuru e Ererê.
- d) o último horizonte, foi atribuído ao embasamento cristalino, constituído por migmatitos, granitos e granodioritos gnaissificados e migmatizados do complexo Xingu.

Devido aos valores de resistividade que apresenta, supõe-se que o terceiro horizonte (de 120 a 300 metros de espessura) tenha níveis de água desde a base ao topo. Os maiores valores de resistividade neste horizonte, são atribuídos aos arenitos, os baixos valores às argilas e os intermediários a intercalações de argila-areia ou vice-versa.

A Formação Maecuru cuja espessura é superior a 40 metros, é essencialmente constituída por arenitos, podendo ser o mais promissor reservatório de água devido a sua superior transmissividade em relação as formações de folhelho.

Porém, além desta seqüência, pode-se observar a existência de lentes arenosas isoladas representando paleocanais que também armazenam água. O substrato de resistividade intermédia evidenciado no perfil SE-NW é de difícil interpretação. Subjacente a Formação Trombetas, este substrato é interpretado como sendo uma rocha alterada ou arenito seco bastante compacto. Como se pode ver, o embasamento cristalino detectado a sul não é visível a norte desta área. Também, as soleiras de diabásio são bem visíveis entre o primeiro e o segundo horizonte geológico chegando a aflorar em alguns pontos.

6.2 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO

O método eletromagnético, além de ser rápido e barato requer pouco espaço no terreno para a execução de uma sondagem, contornando assim um dos problemas logísticos impostos pelo método de eletroresistivo que consiste na expansão lateral dos eletrodos no terreno, enfrentando assim problemas de acesso principalmente nas cidades, terrenos com densas florestas ou com topografia muito irregular.

Para ultrapassar as dificuldades impostas pelo método de eletroresistivo foram realizadas sondagens TEM. Infelizmente seus resultados apresentaram-se contaminados por ruídos causados por problemas eletrônicos no aparelho utilizado como também por influencia de fenômenos supraparamagnéticos (Busseli apud McCracken et al, 1985). Em consequência, o processamento destes dados não forneceu informação geológica de relevância.

Uma comparação dos resultados dos modelos sintéticos com os observados no campo mostra um desfasamento entre eles, confirmando a existências de ruídos supraparamagnéticos bastante fortes.

7 RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, é o máximo de informação que se pode oferecer no momento, com base em dados geofísicos, para resolver os problemas de pesquisa hidrogeológica na área estudada.

Por falta de informações geológicas de subsuperfície, recomendamos que estes resultados sejam analisados com cautela e futuramente submetidos a uma reavaliação caso surjam mais informações de poços profundos.

É importante que mais SEV sejam executadas, principalmente na área periférica da cidade, permitindo assim o aumento da densidade de pontos de amostragem e facilitar a obtenção de melhores informações geológicas subsuperficiais. Novas sondagens elétricas deverão ser feitas com $AB/2$ igual ou superior 1000 metros, permitindo investigar maiores profundidades, principalmente onde não se detetou o embasamento.

Torna-se também importante em trabalhos futuros refazer os levantamentos eletromagnéticos transientes. Embora os atuais resultados tenham sido pouco úteis neste trabalho devido a forma como os seus dados se apresentaram, a execução de novos levantamentos eletromagnéticos permitirá obter novas informações, comparando sempre com os dados dos métodos elétricos. Para contornar os efeitos supraparamagnéticos recomenda-se o uso dos métodos eletromagnéticos nos dois domínios; tempo e frequência.

Recomenda-se que os poços sejam perfurados nas imediações das SEVs 02 e 11. Estes locais apresentam concavidades no topo do embasamento cristalino representando áreas de acumulação de água. Além disso estes locais estão muito próximos ao bairro Brasília, que é a área de interesse no abastecimento de água.

Nos locais onde lentes de areia foram localizadas, se constituem em outras possibilidades para perfuração de poços tendo em conta que estes locais possuem grandes quantidades de água acumulada.

Recomenda-se ainda que a perfuração de poços naquele município seja acompanhada com a finalidade de se obter informações da geologia de subsuperfície para que possam ser úteis em trabalhos futuros de geofísica bem como para determinação de parâmetros hidrogeológicos visando avaliar as potencialidades dos aquíferos na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALMEIDA, H. G., 1995. *Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil. Folha SB. 22.X-D. Escala 1:250.00 Estado do Pará, Paraniba, e Tocantins*. Brasília CPRM. 144p.
- CAPUTO, M. V. & ANDRADE, F. G. 1968 *Geologia em Semidetalhe do Flanco Sul da Bacia Amazônica, entre os rios Cupari e Abacaxis*. 149p. PETROBRAS (Relatório Interno nº 589). Belém.
- 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: 187-197p.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS-CPRM, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. 1987. *Projeto Integração Geológico-Geofísico do Sul do Pará*. 714p. (Relatório Técnico)
- FERREIRA, J. B. 1979 *Métodos Geofísicos Aplicados ao Mapeamento Geológico numa Área da Região Bragantina-PA*. Belém, UFPa. 78p. (Tese de Mestrado).
- GRANT, F. S.; WEST, G.F. 1965 *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw-Hill. Nueva Yorque. 583p.
- HENDERSON R. J. & GEO ISTR. PTY. 1995. New Applications with the SIROTEM Mark 3 Transiente Eletromagnetic System. *Geophysics*, 12: 429-433p.
- LUIZ, J. G. & SILVA, L. M. DA C., 1983. *Curso de geofísica de prospeção*. Belém, UFPa. Centro de Geociências. 263p.
- MACAMBIRA E.M.B. et al. 1976 *Projeto Sulfetos da Altamira-Itaituba*. Convênio DNPM-CPRM. (Relatório Final, 3 vol)
- McCRACKEN, K. G.; G BUSELLI; H. RUTTER, 1985. *Manual for SIROTEM field procedures and data interpretation, North Ryde*, 238p.
- MINERAL CONTROL INSTRUMENTATION Ltd, 1985. *SIROTEM 3 Operator's Manual, Version 21 April 1985, Geo Instruments Pty. Ltd* 88p.
- NABIGHIAN, M. N., 1991. *Eletromagnetic Methods in Applied Geophysics. Vol 2. Part A and B*. Society of Exploration Geophysicists, 972p. (Investigations in geophysics, 3).
- ORELLANA, E. 1972. *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Madrid, Paraninfo. 523p.

- PORSANI, M. J. & RIJO, L. 1993. Estudos Geológicos e Geofísicos aplicados à prospeção de água subterrânea na região do lago Arari – Ilha de Marajó. *Revista Brasileira de geofísica*, 11:101-123p.
- RAICHE, A. P. et al, 1985. The Joint use of Coincident Loop Transient Electromagnetic and Schlumberger Sounding to Resolve Layered Structures. *Geophysics*, 10:1618-1627p.
- 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. TDCON1D – *Programa para Modelagem de Sondagem Eletromagnética Unidimensional*. EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library). Belém, DGf/UFPa.
- RIJO, L. et al 1977. Interpretation of Apparent Resistivity Data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brasil. *Geophysics*, 42: 811-812p.
- SOUSA, J. A. Ferreira, 1996. *Eletroresistividade na prospeção hidrogeológica no município de Ourilândia do Norte-PA*. Curso de Pos-Graduação em geofísica; Centro de Geociências, UFPa. 86p. (Tese de Mestrado).

ANEXOS

**ANEXO I- RESULTADO DA INTERPRETAÇÃO FINAL DAS SONDAgens ELÉTRICAS
REALIZADAS**

ANEXO II - DADOS DE CAMPO DAS SONDAgens ELÉTRICAS REALIZADAS

ANEXO I

Tabela 4.1 Modelos Resultantes da Interpretação Final das SEVs Realizadas

NÚMERO DA SEV	ESPESSURA DAS CAMADAS (m)					RESISTIVIDADE APARENTE ($\Omega \cdot m$)					
	h1	h2	h3	h4	h5	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6
1	0.4	24.8	202			16	435	29.5	1263		
2	0.7	25.4	58			87.3	286	28.9	126.9		
3	0.7	0.7	4	31.4	118.5	869.7	178.9	3201	251	28.3	2036
4	0.6	0.8	4.9	34.3	91.8	44.8	959.8	272.4	1003	307.5	30
5	1.6	19.2				74	668	76.7			
6	1.8	28.6	114.6			352	991.9	100.9	33.4		
7	0.3	20.5				317.3	753.4	143.8			
8	0.7	22.7	124			41.4	381.7	48.7	1946		
9	1.9	21.3	50.4			1011	444	1237	37.5		
10	1.9	25.5				141.7	176	53			
11	0.8	114.8				1430	765.9	30			
12	0.7	18.6	175.2			65.4	1660	93.3	1018		
13	1.4	9.3	250.2	30.6		2392	1053	403	9261	447	
14	0.6	16.3	3.5			751	975	36.4	1679		
15	0.7	0.7	2.4	27.7	129.2	383.3	1490	81	511	89.5	2646
16	0.4	4.3		9.4		78.2	773.3	38.3	1831	27.3	
17	0.7	0.8	192.3	30.1	144.6	875.6	1852	806	506	29	4439
18	1.0	24.9	192.6			322	1357	70.3			
19	0.6	19.9	24.0			419	1186	59.5	1984		
20	0.8	15.9	3.6			600	1506	64.2	2218		
21	0.4	14.5	10.6	181.9		343	742.5	252	34.7	2855	
22	1.0	0.3	2.3	15.2	54.4	460.5	3275	326	825	208	81
23	0.7	2.1				495.5	1003	56.7	6479		
24	0.9	3.5	2.0			1566	5367	219.9	5082		
25	1.6	8.7	70.1			1453	226	2537			
26	0.7	3.1	36.5	249.9		771	229.3	2323	70	1961	
27	15.7	67.6	85.2			2075	329.8	3931	30		
28	3.2	4.1	272.3	112.3		674.4	361	999	97	215	
29	1.3	14.2	55.4			3250	689	6711	767		
30	0.8	12.3	195.5			2350	384.3	4791	715		
31	1.2	44.8	198.6			3475	3210	6762	531.3		
32	1.5	5.1	29	76.5		1238	159	3736	409		
33	1.2	13.5				3557	427	4792	189		
34	0.4	11.9	29	76.5		315	494	198	22	1921	

ANEXO II

Tabela 4.2 Dados de Campo Referentes a Resistividade Aparente das Sondagens Elétricas
(continua)

AB	SEV																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	RESISTIVIDADE APARENTE																
1	185.9	106.8	693.9	76.6	76.6	361.7	520	57.6	1004	143.2	1287	1163	2403	800	452	165.8	971.8
1.3	216	123.2	627.8	89.2	80.1	357.7	584	69	1000	140.2	1200	1250	2300	85.5	489.4	208.2	1029
1.8	261.3	140.7	541.6	118.1	93.8	386.8	590	88.9	950.9	142.5	1058	1420	2056	880	537.5	260.6	1072
2.4	305.7	160	535.6	152	108.6	427	636.9	108.2	875.7	152	970	1492	1800	907.2	550	304	1138
3.2	345.5	190	600	185	127.9	478.8	746.3	135.6	810	150	882.2	1587	1645	906	540.5	373.2	1155
4.2	370	210	709.4	221.7	165.4	532	764.8	164.7	710.8	155.5	823.5	1599	1454	925.6	487.2	429	1006
5.5	380	225	874.4	247.1	189.6	591.2	760.3	183.7	651.3	154.4	800	1606	1321	950	418.2	448.2	940
7.5	400	250	1060	265.1	235.6	671.5	724.6	223.8	535.3	165.6	760	1570	1200	972	360	458.2	816.6
10	410	260	1094	314.2	276.5	722.6	691.2	251.5	495	170.2	763	1550	985.8	955	331.4	427.6	706.2
13	420	270	1115	350	319	796.4	690.2	276.5	471.9	170	749	1550	900	903.3	354.5	378.2	604.8
18	400	260	960.8	420	376.7	855	700	300	484.7	165.3	750.6	1420	803.9	798	391.5	280.2	555.2
24	370	246.2	758	494.9	411	868.6	650	294.9	500	160	775.6	1300	700	650	403.7	229.8	496.2
32	333.3	225	587	550	437	840.2	550	285	536.2	156.6	776.5	1000	625.9	480	404	231.6	440
42	271.5	191.3	400	581.9	400	756.5	460	260	575	140	762.7	725.7	550.2	313.9	369.5	244	409
55	194.9	155	247.2	622.8	318	598.3	320	211.4	639.7	117.4	750	413.2	525.4	176	354	274	295.1
75	11.7	98.2	141	612.5	241.1	411.6	240	130.5	670.5	90.7	736.3	196.4	631	68	270.9	277.7	204.3
100	66	65.5	90	580	158	272.3	180	95.8	633.6	75	690.4	129.4	725	45	200	230	108
130	41.4	56	59	504	114	168.9		79	603.3	65	603.6	114	875	43	166	179.6	65
180	37	58.2	50	335.9	87.6	102		74.3	479	62.2	480	113	1100	40	140	120.3	47
240	41		55.3	210.2	75.6	78.8		93	284.4		310.2	129.3	1150	44	162	69.5	50.4
300	45		70	127.8	73.4	63.2		110	196.2		176.7	150	1150	48	190	47.4	60
350	50								115.7			163	1103	53			
400	56.6								82.4			180.5	1128	59.5			
450	63.6								66.9			200	1104	65			
500									58.4			221	1030				

ANEXO II

Tabela 4.2 Dados de Campo Referentes a Resistividade Aparente das Sondagens Elétricas
(conclusão)

AB	SEV																
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
2	RESISTIVIDADE APARENTE																
1	363	530	648.6	428.8	500	566.7	1801	1389	631	2100	700	3147	1906	3462	1247	3322	320
1.3	399.3	602	767.7	533.1	528.4	623	2000	1360	500	2100	670	2900	1550	3475	1120	3000	340
1.8	468.3	707	841.5	575	574	651.5	2360	1181	407.2	2100	650	2538	1196	3330	983.1	2608	360
2.4	514.9	780	962.1	629.7	608.6	723.8	2624	1000	340	2100	652	2100	800	3400	654.1	1972	380
3.2	592	850.7	1098	675	618.5	684.8	2945	879.3	321.7	2100	643.4	1685	563	3400	465.7	1335	396
4.2	709.4	980.4	1196	692.8	598.5	609.6	3200	591.2	300	2100	621.5	1198	461.5	3300	314	882.5	417.9
5.5	912.3	993	1259	693.8	560.5	538.5	3300	371.9	315.4	2100	588.3	950.4	423.2	3203	275	616.7	440.1
7.5	1075	1097	1304	743.1	522.3	324.7	3181	325	386.8	1973	563.1	819.3	405.5	3200	289.8	506.7	462.3
10	1169	1100	1300	717.3	515.1	213.1	2513	300	436	1958	550	785.4	442.2	3300	360	488.8	480.9
13	1168	1115	1353	675	533.1	135.1	2200	325	478.9	1900	550	777	462.6	3200	480	494.8	462.4
18	1154	1010	1272	629.9	565.2	107.2	1700	455.7	465	1700	615.7	906.1	550	3231	652.2	584.3	440
24	1126	930.2	1098	571.4	576.4	123.4	1700		420	1450	690	1029	650	3200	799.9	683.9	410.9
32	1099	809.8	787	465	553.3	170	1900		300	1150	730.2	1347	843.4	3300	966.1	877.4	357.4
42	839.3	589	519.5	360	495.3	220	2250		192.8	831.3	750	1600	1023	3267	1188	1089	310
55	589.2	345.6	288.9	260	412.6	271.7			129.5	620	675	1850	1247	3529	1479	1316	250
75	347.5	189.3	143.3	150	3114				90.9	480	625	2400	1610	3725	1731	1622	184
100	236.3	97	85.5	90.9	233				81.3	460	490	2810	1933	3695	1927	1901	128.4
130	139.5	75.8	72.9	60	179.9				74.8	525	329.2	3013	2300	3464	1927	2365	93.2
180	72.3	72.7	75.9	48	133.8				75.8	620.5	212.4	3168	2700	3239	2290	2619	50.5
240		81.7	90.2	50.1	108.1				83.7	700	158.9	3046	2945	2720	2476	2840	39
300		94	100	58.6	96.3				95	754.2	150	2797	3183	1956	2399	2917	33
350										740.5	155	2467	2467		2326	2799	37
400										730.4	158.6	2177	3223		2206	2614	41
450										688.7	161.4	1915	3120		2113	2479	44.2
500										675	168.5	1726	3073		1876	2299	46.9