

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

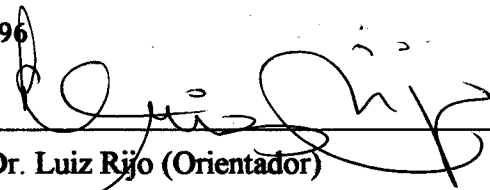
**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS  
VLF E HLEM NA PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA NO  
MUNICÍPIO DE SÃO DOMINGOS DO ARAGUAIA - PA**

**TESE APRESENTADA POR  
VALCIR JOÃO DA CUNHA FARIAS**

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

**Data de Aprovação : 25/04/1996**

**COMITÊ DE TESE:**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luiz Rijo (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Om Prakash Verma

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu

**BELÉM**

**1996**

**FARIAS, Valcir João da Cunha. Aplicação dos métodos eletromagnéticos VLF e HLEM na prospecção hidrogeológica no município de São Domingos do Araguaia-Pará. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1996. 69p.**

**Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1996.**

**1. PROSPECÇÃO. 2. ÁGUA SUBTERRÂNEA. 3. MÉTODO VLF. 4. MÉTODO HLEM. 5. MODELAGEM NUMÉRICA. 6. TILT ANGLE. 7. ELIPSIDADE. 8. INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA. 9. INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA. I. Título.**

*À minha esposa **JUCIARA** que com dificuldades soube suportar minha ausência na trajetória da construção deste trabalho, dando-me carinho.*

*À minha filha **GABRIELA** que mesmo inocentemente deu-me força nos momentos que precisei abdicar dela.*

*Aos meus pais, **VALDECIR E NAIR FARIAS**, que me trouxeram à vida e me mostraram os melhores caminhos para prosseguir nesta com sucesso.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a DEUS, por ter iluminado todo o meu caminho na concretização desse objetivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Rijo, pelas orientações e ensinamentos que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora Profs. Drs. Om Prakash Verma e Francisco de Assis Matos de Abreu, pelas valorosas sugestões que contribuíram para melhorar esta tese.

Agradeço carinhosamente aos meus irmãos por terem me apoiado nos momentos difíceis.

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

Aos amigos Arnaldo, José Antônio e Fernando por termos vencidos juntos os obstáculos.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da universidade Federal do Pará pelo meu aperfeiçoamento.

A Professora Lúcia Maria Costa da Silva pelas discussões técnicas de onde saíram grandes sugestões para este trabalho.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da universidade Federal do Pará pelo meu aperfeiçoamento.

A Prefeitura de São Domingos do Araguaia, na figura do seu prefeito sr. Moisés Soares dos Santos, pelo apoio prestado durante as etapas de campo.

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, Marluci, Silvio e Selene pela amizade.

Ao técnico de campo Afonso Quaresma, pela sua ajuda na coleta dos dados de campo.

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

# SUMÁRIO

	p.
<b>DEDICATÓRIA</b> . . . . .	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> . . . . .	ii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> . . . . .	v
<b>RESUMO</b> . . . . .	1
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	2
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> . . . . .	3
<b>2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA</b> . . . . .	6
2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO . . . . .	6
2.2 FISIOGRAFIA . . . . .	6
2.3 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS . . . . .	7
2.4 GEOLOGIA REGIONAL . . . . .	11
2.5 GEOLOGIA LOCAL . . . . .	14
<b>3 - BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS VLF E HLEM</b> . . . . .	19
3.1 INTRODUÇÃO . . . . .	19
3.2 VLF . . . . .	19
3.2.1 Fundamentos Teóricos . . . . .	19
3.2.2 Filtragem dos Dados VLF . . . . .	22
3.3 HLEM . . . . .	23
3.3.1 Fundamentos Teóricos . . . . .	23
<b>4 - MODELAGEM DE DADOS VLF</b> . . . . .	26
4.1 INTRODUÇÃO . . . . .	26
4.2 MODELOS . . . . .	27
4.2.1 Contato . . . . .	28
4.2.1.1 Vertical . . . . .	28

4.2.1.2	Inclinado . . . . .	28
4.2.2	<b>Influência do Manto de Intemperismo</b> . . . . .	28
4.2.2.1	Efeito do Produto Condutividade x Espessura do Manto de Intemperismo . . . . .	30
4.2.2.2	Efeito da Variação Lateral na Resistividade do Manto de Intemperismo . . . . .	30
4.2.3	<b>Efeito do Contraste de Resistividade entre o Corpo Condutor e o Meio Encaixante</b> . . . . .	31
4.2.4	<b>Disposição Geométrica</b> . . . . .	31
4.2.5	<b>Depressão no Embasamento</b> . . . . .	32
4.2.6	<b>Soerguimento no Embasamento</b> . . . . .	32
4.2.7	<b>Sequência de Soerguimentos e Depressões no Embasamento</b> . . . . .	35
4.2.8	<b>Multicorpos</b> . . . . .	35
5	<b>INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO</b> . . . . .	40
5.1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	40
5.2	<b>OPERAÇÃO DE CAMPO</b> . . . . .	40
5.2.1	<b>Levantamento com o Método VLF</b> . . . . .	40
5.2.2	<b>Levantamento com o Método HLEM</b> . . . . .	42
5.2.3	<b>Critérios Adotados na Seleção das Regiões de Realização dos Perfís</b> . . . . .	42
5.3	<b>INTERPRETAÇÃO DOS DADOS</b> . . . . .	43
5.3.1	<b>Interpretação Qualitativa</b> . . . . .	43
5.3.1.1	Região BNSD . . . . .	43
5.3.1.2	Região BSL . . . . .	50
5.3.1.3	Região BM . . . . .	50
5.3.2	<b>Interpretação Quantitativa de Dados VLF</b> . . . . .	58
6	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES</b> . . . . .	62
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	65

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

## FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de localização da cidade de São Domingos do Araguaia . . . . .	8
Figura 2.2	Mapa estrutural do Folha Marabá. (após ALMEIDA et al., no prelo)	12
Figura 2.3	Mapa Estrutural da Cidade de São Domingos do Araguaia. (após SILVA, 1996) . . . . .	16
Figura 2.4	Clorita Xisto em exposição natural, localizada no ponto A da Figura 2.3. (após SILVA, 1996) . . . . .	17
Figura 2.5	Clorita Xisto transformado em um material argiloso (foto tirada no ponto B da Figura 2.3; após SILVA, 1996). . . . .	17
Figura 2.6	Perfil estratigráfico esquemático mostrando a porção aflorante da Formação Itapecurui, descrito em um barranco localizado no ponto C da Figura 2.3(após SILVA, 1996). . . . .	18
Figura 2.7	Camada laterítica localiza às margens do igarapé Açaizal(ponto D da Figura 2.3). . . . .	18
Figura 3.1	Estação NAA, Cutler, Maine, U.S.A.. Freq. de 24 kHz (Força do sinal considerada boa no contorno de 54 db e considerada limite no contorno de 48 db; após McNEILL & LABSON,1991) . . . . .	20
Figura 3.2	Elipse de polarização na presença de um corpo condutivo. . . . .	21
Figura 3.3	Um típico perfil HLEM . . . . .	25
Figura 4.1	Resposta de um contato vertical: a)caminhando do condutivo para o resistivo; b) caminhando do resistivo para o condutivo . . . . .	29
Figura 4.2	Resposta de um contato inclinado de 45°: a)caminhando do condutivo para o resistivo; b) caminhando do resistivo para o condutivo . . . . .	29
Figura 4.3	Efeito do manto de intemperismo: a) condutância e b) variação lateral de resistividade . . . . .	30
Figura 4.4	Efeito do contraste de resistividade entre o corpo condutor e o meio encaixante . . . . .	31
Figura 4.5	Efeito da disposição geométrica do corpo condutor: a) vertical; b) horizontal e c) inclinado de 45° . . . . .	33

Figura 4.6	a) Depressão no embasamento preenchida com o mesmo material do manto de intemperismo e b) Depressão sob um corpo resistivo . . . . .	34
Figura 4.7	Soerguimento do embasamento, que pode representar uma zona de cisalhamento . . . . .	34
Figura 4.8	Sequência de depressões e soerguimentos na estrutura do embasamento	35
Figura 4.9	Três corpos condutores verticais igualmente espaçados . . . . .	36
Figura 4.10	a) Três corpos condutores verticais espaçados 60 e 30 m e b) dois corpos condutores verticais distantes 100 m um do outro . . . . .	37
Figura 4.11	Três corpos condutores inclinados, sendo o dois primeiros com mergulho no mesmo sentido e encontrando um terceiro mergulhando no sentido oposto . . . . .	38
Figura 4.12	a) Corpo vertical sobre o primeiro corpo inclinado e b) corpo vertical sobre o segundo corpo inclinado . . . . .	39
Figura 5.1	Mapa da cidade, com as demarcações dos locais de realização dos levantamentos . . . . .	41
Figura 5.2	Perfis VLF na região BNSD . . . . .	44
Figura 5.3	Mapa de contorno após aplicação do filtro Fraser nos dados VLF da região BNSD na Figura 5.2. . . . .	45
Figura 5.4	Perfis HLEM na frequência 110 Hz realizados na região BNSD; em-fase —, Quad. - - - - . . . . .	47
Figura 5.5	Perfis HLEM na frequência 440 Hz realizados na região BNSD; em-fase —, Quad. - - - - . . . . .	48
Figura 5.6	Perfis HLEM na frequência 3520 Hz realizados na região BNSD; em-fase —, Quad. - - - - . . . . .	49
Figura 5.7	Perfis VLF realizados na área BSL, nas direções: a) N-S e B) E-W . .	51
Figura 5.8	Mapa de contorno após a aplicação do filtro Fraser nos dados VLF da região BSL na Figura 5.7, com falhas inferidas e locais recomendados para a perfuração de poços . . . . .	52
Figura 5.9	Perfis VLF realizados na área BM, nas direções: a) E-W e B) N-S . .	53
Figura 5.10	Mapa de contorno após aplicação do filtro Fraser nos dados VLF da região BM na Figura 5.9 . . . . .	54
Figura 5.11	Perfis HLEM realizados na região BM; em-fase —, Quad. - - - - . .	55
Figura 5.12	Perfis HLEM realizados na região BM; em-fase —, Quad. - - - - . .	56
Figura 5.13	Perfis HLEM realizados na região BM; em-fase —, Quad. - - - - . .	57
Figura 5.14	a) Parâmetros usados para determinar a profundidade do topo do condutor; b) Diagrama para corpos verticais (após OLSSON,1980) . . . . .	59

Figura 5.15 Modelo de melhor ajuste do perfil 01 da região BSL, com os valores dos parâmetros físicos . . . . .	60
Figura 5.16 Modelo de melhor ajuste do perfil 03 da região BNSD, com os valores dos parâmetros físicos . . . . .	61

## TABELAS

Tabela 1.1 Prospecção Geofísica para Água Subterrânea no Estado do Pará - Convênio UFPA/FNS DE 1989-1995 (Jul) (Fonte: FNS). . . . .	5
--	---

## RESUMO

Inserido no convênio de cooperação firmado 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, este trabalho tem como objetivo o mapeamento geológico com a aplicação dos métodos eletromagnéticos VLF e HLEM, visando o estudo hidrogeológico do Município de São Domingos do Araguaia no Sudeste do Estado do Pará. Também, Estudamos o desempenho quantitativo do método VLF, no que diz respeito a prospecção de água subterrânea.

Primeiramente, analisamos a resposta VLF, através dos parâmetros da elipse de polarização (inclinação e elipsidade), de diferentes situações geológicas possíveis de serem encontradas no local de estudo e voltadas a hidrogeologia. Também, avaliamos a influência que os parâmetro físicos do modelo exercem na anomalia, utilizando para estas finalidades modelagem numérica por elemento finito.

A análise quantitativa foi realizada através de ajuste, por tentativa e erro, com curvas teóricas obtidas da simulação de modelos idealizados na interpretação qualitativa, a qual fizemos com o auxílio da técnica de filtragem de Fraser e com perfís do método HLEM.

Os resultados mostraram a existência de feições estruturais de "trends" N-S e NE-SW, que correlacionadas à geologia regional são falhas normais e de tranferências, respectivamente. Com base nesses resultados, foram selecionados alguns locais com maiores probabilidades de sucesso na captação de água subterrânea através de poços.

## ABSTRACT

This work deals with the geological mapping using the electromagnetic methods VLF and HLEM to hidrogeological study of the county São Domingos do Araguaia in the southeast of the State of Pará. It was carried out within the cooperation agreement between the Fundação Nacional de Saúde and the Universidade Federal do Pará, through the Geophysics Department and the Curso de Pós-Graduação em Geofísica.

Also, we studied the quantitative performance of the VLF method, applied to ground water prospecting.

First, we analysed the VLF response, by means of the parameters (tilt angle and ellipticity) of the ellipse of polarization of various geological situations likely to be found in the local under study, and for hidrogeological studies of other areas as well. Also, we evaluated the influence of different physical parameters of selected models using finite elements method.

The quantitative analyse of the field data was carried out by trial and error using theoretical curves obtained by means of model simulation suggested by the qualitative interpretation using Fraser's filter and profiles of the HLEM method.

The results showed the existence of structural features with trends N-S and NE-SW which correlated with the regional geology are normal and transference faults, respectively. Based on these results, it was selected several sites for drilling of well with maximum probability of sucess.

# 1 - INTRODUÇÃO

O Estado do Pará vem enfrentando sérios problemas com a escassez d'água no abastecimento de suas comunidades, contrastando com a grande rede hidrográfica da região Amazônica, onde o Estado se localiza. A Fundação Nacional de Saúde (FNS) estima que, com uma população de 5,6 milhões de habitantes, distribuídos em 136 municípios, cerca de 3,3 milhões de habitantes não possuem água potável para seu consumo. Se for considerada uma demanda per capita de 200 litros/dia, o déficit no abastecimento seria de 6,6 milhões de litro/dia.

Segundo PONTE (1995), este déficit no abastecimento de água potável, juntamente com a deficiência educacional de saúde e a falta de saneamento básico, provocaram em todo Estado, no ano de 1993, 119.785 casos de morbidades e 560 casos de óbitos, ligados a enteroinfecções.

O sistema de captação de água superficial, normalmente usado em algumas cidades do Estado, é muito oneroso, haja vista que as águas brutas dos rios e lagos não são própria ao consumo humano, nem mesmo para utilização industrial sem um bom tratamento físico-químico e bacteriológico, cujo custo de implantação e manutenção é muito elevado, ficando tal sistema fora da realidade financeira de vários municípios do Estado.

Com o intuito de diminuir o quadro provocado pelas enteroinfecções, cujo principal agente transmissor é a água consumida sem um tratamento adequado, a FNS, já há algum tempo, vem implantando sistemas de captação de água potável para abastecer as comunidades do Estado, usando como fonte principal os mananciais subterrâneas.

Objetivando evitar a perfuração de poços secos e de baixa vazão, que não supram as necessidades das cidades, a FNS em convênio com a Universidade Federal do Pará (UFPA), mais precisamente com o Departamento de Geofísica e o curso de Pós-Graduação em Geofísica do Centro de Geociências, vem usando os métodos geofísicos, mais especificamente levantamentos elétricos, eletromagnéticos e perfilagem elétrica de poços, como estudo prévio e detalhado da subsuperfície nas comunidades em questão, para localizar e se possível mapear os aquíferos subterrâneos ( Tabela 1.1).

Na realização desses estudos, deve-se considerar as características geológicas da região. O Estado possui uma área de 1.248.042  $km^2$ . Em 30% desse total, afloram rochas de formação sedimentar. Esses litotipos são potencialmente os que mais armazenam em seu intertícios,

água. Nos 70 % restante, ocorrem rochas cristalinas (metarmórfica e ígnea), que por serem bem compactas não são boas armazenadoras de água, ficando o armazenamento restrito a zonas de falhas e fraturas ou ao manto de intemperismo, se este for bastante espesso e poroso.

Este trabalho de tese tem como objetivo o mapeamento de feições estruturais (falhas e fraturas), com a aplicação do método VLF (Very Low Frequency) e HLEM (Horizontal Loop Electromagnetic), visando o estudo hidrogeológico do Município de São Domingos do Araguaia. Em adição, será estudado também, quantitativamente o poder de resolução do método VLF na prospecção de água subterrânea, afim de aplicá-lo em outras áreas de geologia semelhante.

Para esta finalidade, empregaremos a modelagem numérica por elemento finito de várias situações geológicas possíveis de serem encontradas na região investigada e voltadas para a hidrogeologia. Essas simulações nos permitirão avaliar a influência que os parâmetros físicos que definem o modelo, exercem na anomalia VLF. A análise quantitativa dos dados de campo, será feita por ajuste com curvas teóricas, geradas pela simulação de modelos idealizados na interpretação qualitativa que será realizada a partir dos dados brutos VLF e com o auxílio da filtragem desse dados, através da aplicação da técnica de Fraser (FRASER, 1969), e com medidas HLEM realizadas no referido Município.

Esta tese está organizada em seis capítulos. O capítulo um consta da introdução que versa sobre as informações gerais e a motivação para a escolha do tema de tese.

O segundo capítulo relata as características da área prospectada, incluindo sua localização e acesso, sua fisiografia e seus aspectos geológicos.

O terceiro capítulo trata da metodologia e princípios físicos dos métodos eletromagnéticos VLF e HLEM.

No quarto capítulo é feito um estudo através de modelagem numérica das respostas VLF em meios fraturados.

A interpretação dos dados de Campo coletados na área prospectada, é apresentada no capítulo cinco.

Finalmente, o capítulo seis trás as conclusões e sugestões finais.

Tabela 1.1 - Prospecção Geofísica para Água Subterrânea no Estado do Pará - Convênio UFPA/FNS DE 1989-1995 (Jul) (Fonte: FNS).

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
Rondon do Pará	Rondon 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	X	X	Instalação do Sistema 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	X	X	Implantação do Sistema de água
Anapu	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Ampliação do Sistema de água
Bom Jardim	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema 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 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

### 2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A sede do Município de São Domingos do Araguaia, localiza-se no Sudeste do Estado do Pará acerca de 588 km da capital e a 48 km de Marabá ( Figura 2.1), com um contexto geológico inserido na folha Marabá (SB.22-X-D). A sede municipal, com altitude de 145 m, possui coordenada geográficas  $5^{\circ}32'12''$  de latitude sul e  $48^{\circ}43'50''$  de longitude oeste WGr.

O acesso ao município pode ser realizado por vias rodoviária, fluvial, aérea e ferroviária. Pela via rodoviária, o acesso é feito, tendo como ponto de partida Belém, através da travessia de balsa até o porto de Arapari, seguindo, então, pela PA-150 até a cidade de Marabá, ou uma outra alternativa para chegar em Marabá, é fazer o percurso Belém-Dom Eliseu, pela rodovia Belém-Brasília (BR-010), daí seguir até Marabá pela BR-222 (PA-332). Desta cidade chega-se a São Domingos do Araguaia percorrendo 48 km pela Transamazônica (BR-230) e mais 5 km ao longo da PA-153.

O acesso fluvial pode ser realizado através dos rios Araguaia e Tocantins até as cidades de Marabá e São João do Araguaia, em qualquer época do ano e podendo ser utilizado barcos de pequeno e médio portes.

O acesso aeroviário só pode ser efetuado, até a cidade de Marabá, haja vista que não existe pista de pouso em São Domingos do Araguaia, através de vôos comerciais e regulares das empresas Brasil Central e Varing. Outras sedes municipais vizinhas, ou algumas fazendas da região dispõem de campo de pouso, possíveis de serem usados por aviões mono e bimotores.

Por via ferroviária, o acesso se dá através da estrada de ferro Ponta da Madeira - Carajás, que liga Marabá à Serra dos Carajás e ao porto de Itaqui na cidade de São Luiz (Estado do Maranhão).

### 2.2 FISIOGRAFIA

O Município de São Domingos do Araguaia possui clima Equatorial superúmido, classificado de acordo com Kopppen na categoria Am, nos limite da transição Aw (LIRA et al., 1993). A temperatura média anual é de  $26.3^{\circ}C$ , apresentando média máxima em torno de

32.10°C e mínima de 22.71°C. A umidade relativa do ar é de 78%.

A região é marcada por dois períodos sazonais, um chuvoso denominado de inverno, notadamente, de novembro a maio, e o outro mais seco, chamado de verão, de junho a outubro, estando o índice pluviométrico em torno de 2000 mm anual e a precipitação média mensal inferior a 60 mm.

Segundo LIRA et al. (1993), os solos do Município de São Domingos do Araguaia são caracterizados pela presença dos Podzólicos Vermelhos Amarelos, Litólicos Distróficos, Cambissolos Distróficos, Gleys, Aluviais e areias Quartizosa Distrófica, existindo, também, a presença de Latossolos Vermelhos Amarelos, associados a Gley pouco húmido.

Os relevos da região, são relativamente movimentados, caracterizados por colinas de topos arredondados, que são relevos típicos de rochas Pré-Cambrianas do Cinturão Araguaia, e por colinas dissecadas de topos suavizados, característicos da Formação Itapecuru da Bacia do Parnaíba.

A vegetação do Município é dominada por floresta Equatorial Latifoliada, formação arbórea, representada pelos subtipos floresta densa submontada, caracterizada por vegetação de grande porte, como a Castanheira, e floresta aberta mista, onde predomina espécies como o Babaçu (VELOSO et al., 1974). Em vários pontos da região, nota-se, também, a existência de clareiras, em grandes extensões, onde a floresta foi removida para cultivo de pastagem e como decorrência, também, da extração da madeira.

No tocante a hidrografia, o Município possui alguns rios, com destaque ao rio dos Veados, afluente da margem esquerda do rio Araguaia, situado cerca de 5 km da sede municipal, e pequenos córregos, destacando-se o do Açaizal, o qual corta a cidade longitudinalmente. Nos meses de seca, os córregos que não secam, são as únicas fontes de água à população.

### 2.3 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

O município de São Domingos do Araguaia foi criado pela Lei 5.706, de 27 de dezembro de 1991, a partir de área desmembrada do Município de São João do Araguaia. Situada na região Sudeste do Estado, tem sua sede municipal localizada a 5 km das margens da rodovia Transamazônica (BR-230), distante 48 km da sede municipal de Marabá. A área territorial do Município é de 1.365,23  $km^2$  e a população, segundo estimativa do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) para o ano de 1995, é de 16500 habitantes, sendo composta basicamente de goianos, mineiros e, predominantemente, de maranhenses (LIRA et al., 1993).

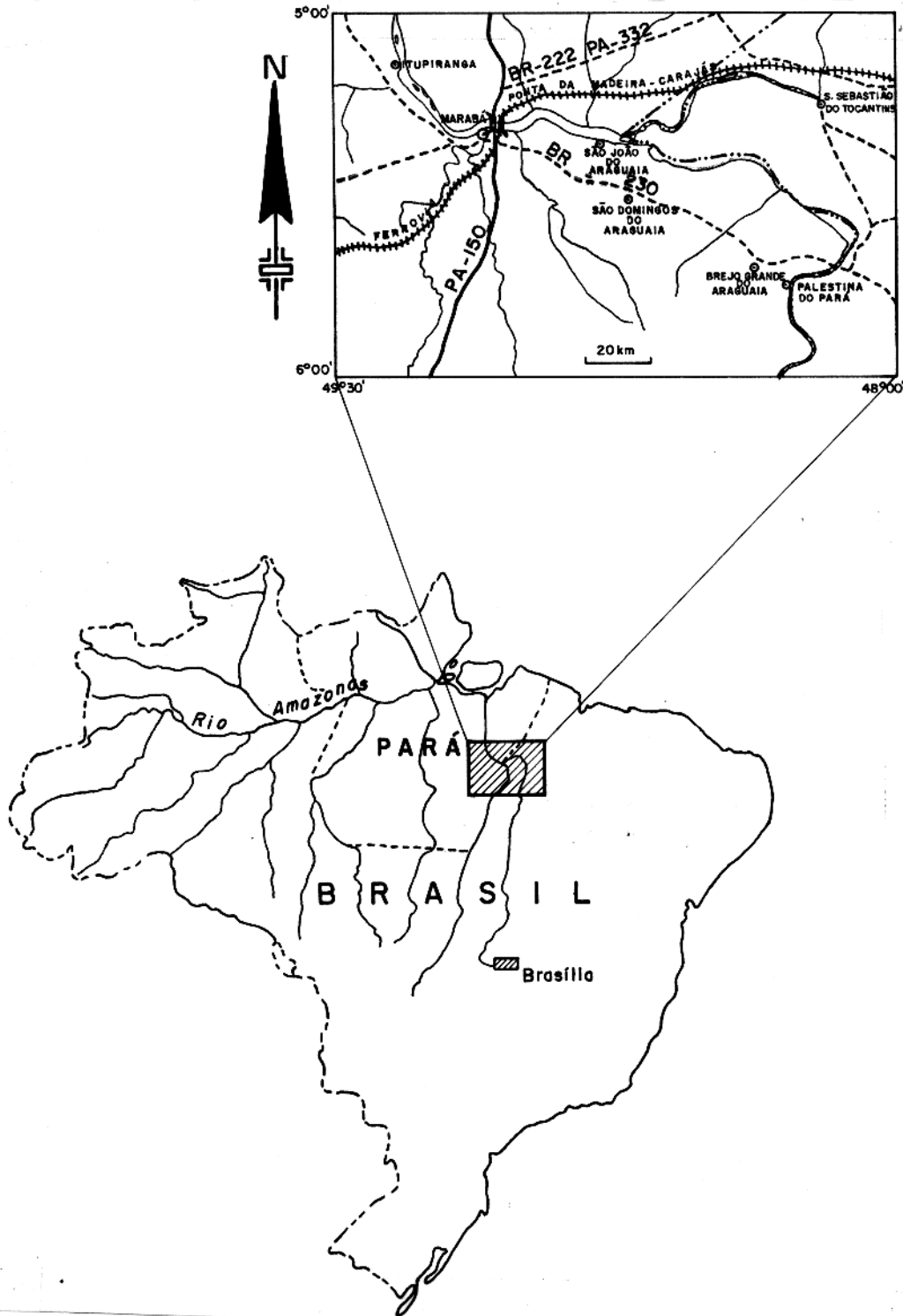


Figura 2.1 - Mapa de localização da cidade de São Domingos do Araguaia

O núcleo urbano de São Domingos do Araguaia é setorizado nos seguintes bairros: Centro da Cidade, Novo São Domingos, Perpétuo Socorro, Liberdade, São Luiz e Moisés, sendo os três últimos criados recentemente. O centro da cidade constitui-se na área mais dinâmica do Município, pois nele estão localizadas as agências dos correios, da TELEPARÁ, da CELPA (Centrais Elétricas do Pará), da EMATER (Empresa da Assistência Técnica e Extensão Rural do Pará), grande parte do setor comercial, a sede da prefeitura municipal e as principais escolas do município. Seus moradores dispõem do fornecimento integral de energia elétrica.

Conforme registro da FNS (Fundação Nacional de Saúde) de julho de 1992 (citado em LIRA et al., 1993), a sede municipal possui 1929 prédios, para uma população de 6.900 habitantes, com as construções feitas de alvenaria, madeira, barro e palha, sendo mais predominante as de alvenaria no Centro da Cidade e as de madeira, barro e palha nos bairros de formação mais recentes, como é o caso dos bairros de São Luiz, Liberdade e Moisés.

O quadro político do Município é constituído pelo prefeito Moisés Soares dos Santos, pelo vice-prefeito Raimundo Souza Cruz Filho e mais nove vereadores eleitos através do voto direto.

Com relação a arrecadação tributária, segundo LIRA et al. (1993), o Município sobrevive precariamente dos recursos do FPM (Fundo de Participação dos Municípios), do ICMS (Imposto sobre Circulação de mercadorias e serviços) e IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano). Recursos esses que são insuficientes para suprir as necessidades infra-estruturais que o Município requer para o seu desenvolvimento.

A principal base econômica do Município é a produção agrícola, voltada exclusivamente a cultura de subsistência: arroz, milho, feijão e mandioca; das quais há predominância da produção do arroz. Não se registra no município produção intensiva de culturas perenes (LIRA et al., 1993).

A pecuária é uma atividade em crescimento, sendo desenvolvida extensivamente por médios e grandes produtores, com o gado destinado exclusivamente para o corte. O extrativismo do babaçu e da castanha-do-Pará, que no início da formação da cidade predominavam, ocorre em menor escala. Hoje o extrativismo está voltado para a extração da madeira. A exploração mineral se resume e extração da argila usada na indústria oleira.

O setor industrial da cidade é muito fraco, sendo formado por apenas três serrarias, três movelarias, duas panificadoras e dezesseis usinas de beneficiamento de arroz. Já o setor comercial tem uma significativa importância, com os estabelecimentos sendo do tipo varejistas, embora alguns sejam considerados, localmente, atacadistas.

No que se refere a prestação de serviços, a cidade conta com cinco hotéis modestos, um

posto de combustível, uma unidade mista de saúde e uma feira coberta, que aos sábados funciona como feira do produtor rural. Não existe serviços bancários, de cartório e nem judicial, sendo necessário o deslocamento da população até a cidade de Marabá.

Com relação aos serviços básicos, a população não conta também com um sistema de esgoto doméstico, de coleta de lixo e nem um sistema de captação e distribuição de água, sendo conseguida por conta de cada morador por meio de poços a céu aberto, tipo "Amazonas". Os moradores com um melhor padrão de vida, utilizam poços tubulares construídos em suas residências, já os moradores que residem próximos as regiões de brejos, consomem água de poços tipo "cacimba". A utilização da água desses tipos de poços sem nenhum tratamento, expõe a população do município a sérios riscos de doenças, devido as facilidades de contaminação dos mesmos.

No que diz respeito a educação, o município possui 54 escolas, onde 20 pertencem a rede estadual de ensino e o restante a rede municipal. Do total, 10 escolas estão localizadas na sede municipal e 44 na zona rural.

A segurança pública de São Domingos do Araguaia conta com uma delegacia com três celas, localizada na sede municipal, um efetivo policial de três soldados militares e a visita periodica de um delegado da Polícia Civil do Estado, vindo da comarca de Marabá.

Não existe na sede municipal linhas de transporte urbano nem carros de aluguel, ocorrendo o traslado das pessoas a pé, em animais de montaria, de bicicleta, motocicleta ou carros particulares. O transporte intermunicipal e interestadual é feito por uma única empresa, a Transbrasiliana, com linhas regulares e diárias em direção a Marabá, Imperatriz, Araguaia, etc.

A população de São Domingos do Araguaia, tem poucas opções de lazer, restringindo-se as festas dançantes nos fins de semana, à base de música mecânica, a banhos de rio, sendo necessário para isso, o deslocamento a localidade de Apinajés, onde ocorre o encontro dos rios Araguaia e Tocantins, e os mais abastados vão a balneários particulares, sendo o mais conhecido a Bica na localidade de Vila Diamante, às margens da rodovia Transamazônica. Uma outra opção, são os festejos religiosos, com o principal a do santo padroeiro do Município, São Domingos de Gusmão, ocorrendo no dia 4 de agosto e é precedida por um arraial que ocorre no período de 26 de julho a 4 de agosto.

## 2.4 GEOLOGIA REGIONAL

A Folha Marabá (SB.22-X-D), está situada no contexto do bloco crustal Araguacema, que se articula com os blocos Belém, Porangatu e Juruena. No âmbito da Folha, destacam-se três entidades geotectônicas, compreendendo os cinturões Itacaiúnas e Araguaia, e a Bacia do Parnaíba (MARINHO, 1994; ALMEIDA et al, no prelo), a Figura 2.2 mostra o mapa estrutural da folha. A área em estudo, localiza-se na transição da Faixa do Araguaia e a Bacia do Parnaíba.

O Cinturão Araguaia é entendido como resultado da atuação de um regime compressivo oblíquo, de baixo ângulo, ocasionando o cavalgamento do bloco crustal Porangatu sobre o bloco Araguacema, criando feixes de zonas de movimentação com direção submeridiana. A movimentação preferencial se deu de SE para NW. Zonas transcorrentes com orientação WNW - ESE são interpretadas como rampas laterais (MARINHO, 1994; HASUI & COSTA, 1990).

Na Folha, este Cinturão é representado pelas formações Xambioá, Pequizeiro e Couto Magalhães, cujas rochas apresentam, entre si, uma gradação progressiva de granulação e composição mineralógica (ALMEIDA et al., no prelo; MARINHO, 1994).

A Formação Xambioá localiza-se no setor centro-leste da folha com 28 km de largura e 40 km de extensão. A relação de contato desta unidade se dá de forma discordante e erosiva, a leste e a norte com os sedimentos da borda oeste da bacia do Parnaíba, pertencentes nas formações Pimenteiras e Itapecuru, respectivamente, e de caráter gradacional com as rochas da Formação Pequizeiro, através de uma faixa de concentração de deformação.

A caracterização litológica e petrográfica, segundo ALMEIDA et al. (no prelo), mostra a Formação Xambioá constituída de um conjunto uniforme de rochas metassedimentares, cuja paragênese mineral é indicativa de metamorfismo na fácies xisto verde médio a alto, constituída, basicamente, de quartzo, biotita, moscovita, granada, epidoto e clorita. É frequente, também, a ocorrência de anfibólio xistos, caracterizados por uma associação de actinolita-tremolita-quartzo-epidoto-clorita, dispostos segundo uma forte anisotropia planar, materializada por uma foliação milonítica. Estes tipos petrográficos, são entendidos como metavulcanitos máficos intercalados no pacote metassedimentar.

A Formação Pequizeiro, ocorre ao longo de uma faixa de aproximadamente 65 km de extensão e 8 km de largura, em disposição submeridiana, localizada na porção centro leste da folha. Essa unidade possui contatos com as Formações Xambioá, Couto Magalhães e Itapecuru, sendo que com as duas primeiras o contato se faz de forma gradacional.

Os xistos da unidade Pequizeiro, são de granulações média a fina, coloração esverdeada e tendo cores de alteração amareladas e/ou avermelhadas, sendo os tipos predominantes clorita xistos, moscovita-clorita xisto, clorita-quartzo xistos, moscovita-biotita-clorita xistos, cujas assembléias minerais apresentam paragênese relacionadas a fácies metamorfica xisto verde médio a baixo, podendo atingir, localmente, graus mais elevados.

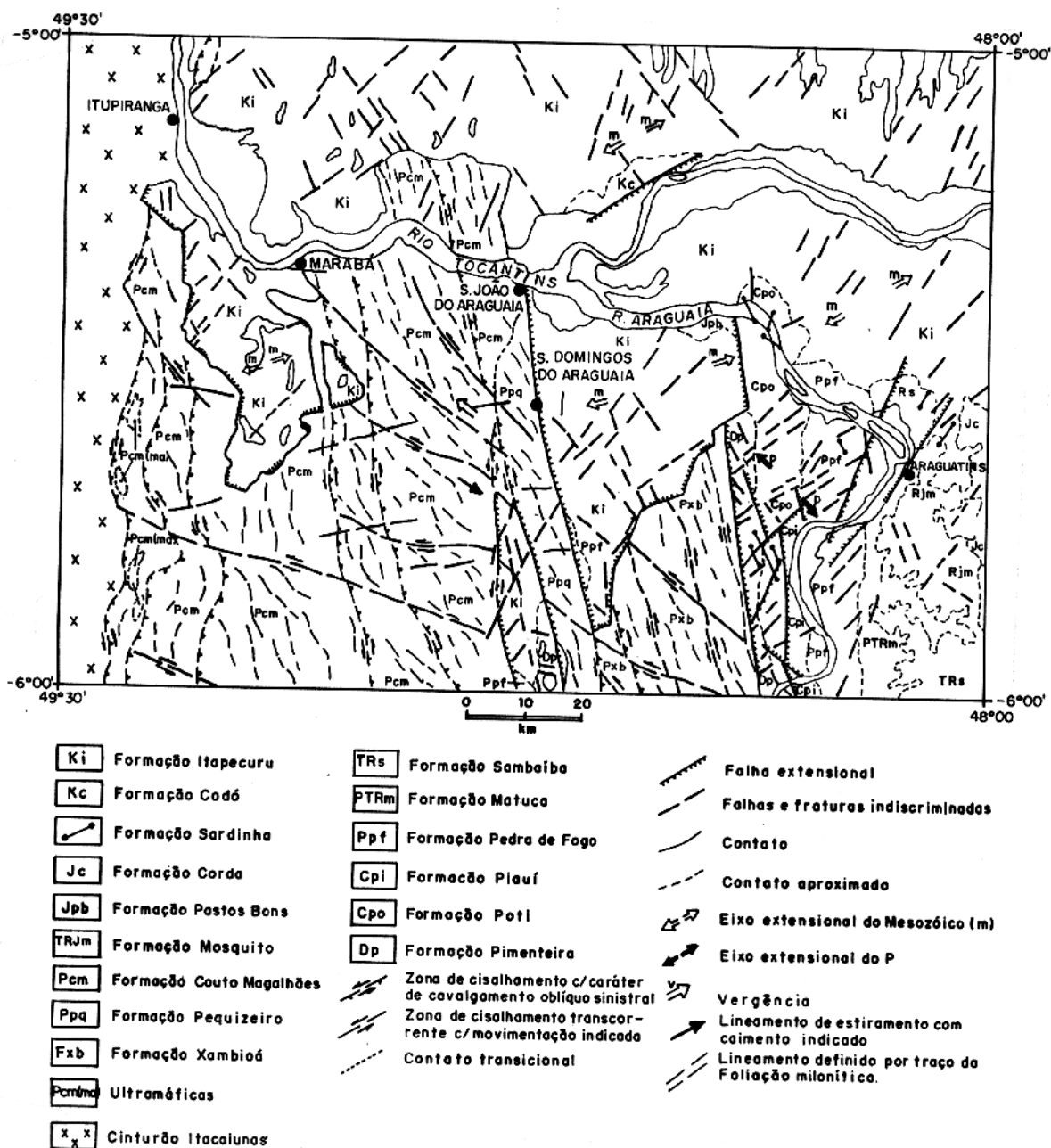


Figura 2.2 - Mapa estrutural do Folha Marabá. (após ALMEIDA et al., no prelo)

A Formação Couto Magalhães, situada na porção centro-oeste da folha, constitui-se na maior unidade da folha com aproximadamente 65 km de largura e 83 km de comprimento. Mantém relação de contato de forma discordante a oeste com as rochas do Cinturão Itacaíunas, a norte e a leste com a Formação Itapecuru, e de caráter gradacional a leste com a Formação Pequizeiro.

Quanto a litologia, a unidade é constituída por filitos, ardósias, xistos (de granulação fina), quartzitos e calcáreos com baixo grau de metamorfismo. A fácies metamórfica situa-se de xisto verde baixo a médio, alcançando o condições de anquimetamorfismo. As espécies rochosas representativas do xisto, possuem características texturais, semelhantes as da Formação Pequizeiro e as espécies pelítica, tem constituição quase mineralica, compreendendo essencialmente sericita com algum quartzo disseminado.

A área estudada tem em sua parte oriental, sedimentos da borda oeste da Bacia do Parnaíba, a qual tem sua evolução cinemática marcada por dois evento tectônicos distintos (COSTA et al., 1991).

No Paleozóico, durante a abertura do oceano Atlântico, ocorreu um esforço distensional na direção NW-SE, induzindo movimento ao longo de falhas normais nas bordas W, E e SE da bacia. A geometria dessas falhas indica terem se formado, essencialmente, por reativação de estruturas Pré-Cambrianas. Na parte oeste, tais estruturas são as zonas de cavalgamento e foliação do Cinturão do Araguaia, de direções submeridianas e mergulhos fortes para ENE (COSTA et al., 1991; BORGES et al., 1994). Este período, é representado na bacia do Parnaíba pelas formações Pimenteiras, Poti, Piauí, Pedra de Fogo e Motuca, caracterizadas por depósitos de frentes deltáica, fluvial a lacustre, e planície de maré.

O outro evento ocorreu a partir do Jurássico, onde a bacia esteve sujeita a um regime distensivo oblíquo, cujo eixo extensional foi na direção NE-SW e transporte para NE. As descontinuidades submeridianas comportaram-se como falhas normais e as falhas NE-SW, como de tranferência. Este evento é responsável pelo desenvolvimento do oceano Atlântico Equatorial. Durante o Cenozóico, houve reativação das falhas mesozóicas, sendo neoformados feixes de falhas.

O evento tectono-sedimentar do Mesozóico possibilitou a deposição das Formações Sambaíba, Mosquito, Pastos Bons, Corda, Sardinha, Codó e Itapecuru. Os sedimentos são de origens continental (fluvial e eólico), marinho (planície de maré) e de magma básico (extrusão e intrusão fissural). O quadro estratigráfico da Bacia da Parnaíba, é completado por sedimentos do Cenozóico, representados pelo Terciário (coberturas detríticas e/ou lateríticas) e o Quaternário (coberturas sedimentares atuais), distribuídos ao longo dos leitos dos rios, lagos, bem como em suas planícies de inundação.

MARTINS (1994), fez um estudo geofísico (gravimétrico, aeromagnetométrico e gamaespectrométrico) da folha Marabá, cujos resultados mostram correlação com as informações geológico-estrutural.

## 2.5 GEOLOGIA LOCAL

A cidade de São Domingos do Araguaia, situa-se na transição de dois ambientes geológicos distintos, um cristalino e o outro sedimentar, que se relacionam através de contatos discordantes. Segundo SILVA (1996), aproximadamente 10% do território da cidade está sobre terreno cristalino e o restante sobre de formação sedimentar, conforme mapa estrutural mostrado na Figura 2.3, elaborado pelo referido autor.

A porção cristalina, representativa da Formação Pequizeiro da Faixa Araguaia, constitui-se de clorita-xisto, de granulação média, coloração cinza esverdeada, apresentando cor de alteração amarelada e foliação bem desenvolvida com atitude média de N-S/18°E, e afloram naturalmente na direção N-S no lado oeste da cidade ( Figura 2.4).

Estudos de afloramentos e de amostras de mão, revelam uma rocha que além da colrita, possui minerais importante em sua composição, como quartzo, moscovita e feldspatos. O intemperismo, em decorrência das condições climáticas da região, é intenso e transforma o clorita-xisto em um material argiloso ( Figura 2.5), de coloração amarelo avermelhada com variação para textura mosqueada.

O terreno sedimentar, na porção centro oriental da cidade, corresponde aos sedimentos da Formação Itapecuru na borda oeste da bacia do Parnaíba. SILVA (1996), através de um afloramento artificial, em exposição vertical, que não excede 6 m ( Figura 2.6), descreveu a sequência estratigráfica da Formação Itapecuru na área em estudo, contendo do topo para a base:

- um latossolo arenoso pouco espesso;
- uma camada areno argilosa, saturada em água, de coloração amarelada e com 1,5 m de espessura;
- uma camada conglomerática de concrenações arenoferruginosas e de dimensões centimétrica e decimétricas, envolta por uma matriz areno argilosa, cuja espessura, no ponto de amostragem, é 70 cm;
- um estrato argiloso de textura mosqueada com aproximadamente 3 m de espessura e

- uma camada de areia fina de espessura não definida e, também, saturada em água, correspondendo ao segundo lençol freático.

Foi encontrado, também, como litotipo da área, a ocorrência de laterita, que sustentam platôs de textura bastante compactado e coloração escura ( Figura 2.7). O ponto de amostra situa-se as margens do igarapé Açaizal, atrás do hotel São Domingos, onde a espessura desta camada é de aproximadamente 3 m.

Não existe na literatura um estudo detalhado que defina, com precisão, o quadro estrutural da cidade de São Domingos do Araguaia, apenas SILVA (1996), que na caracterização da área, através da análise da drenagem, identificou um conjunto de lineamento orientados segundo as direções NNE e NE.

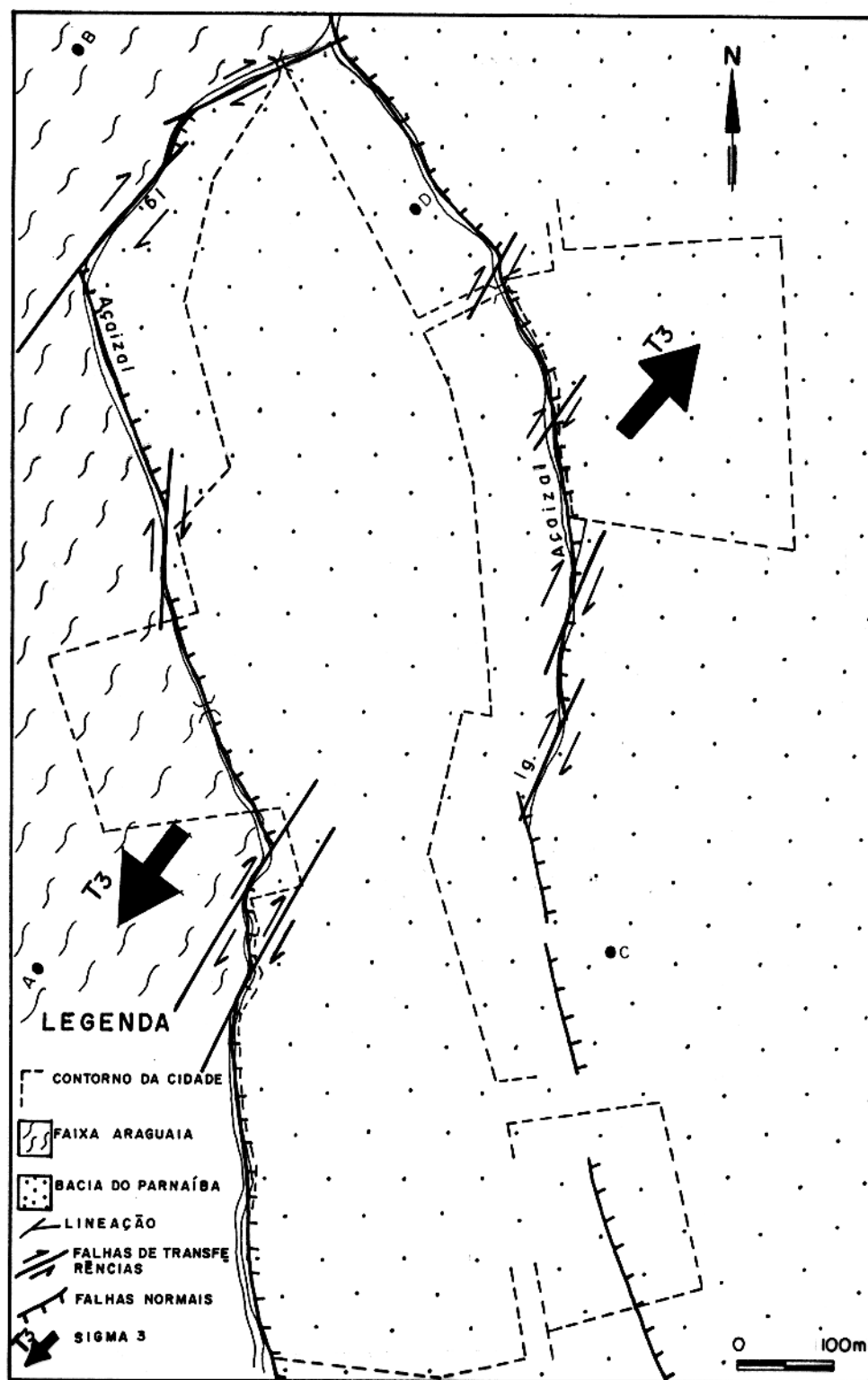


Figura 2.3 - Mapa Estrutural da Cidade de São Domingos do Araguaia. (após SILVA, 1996)

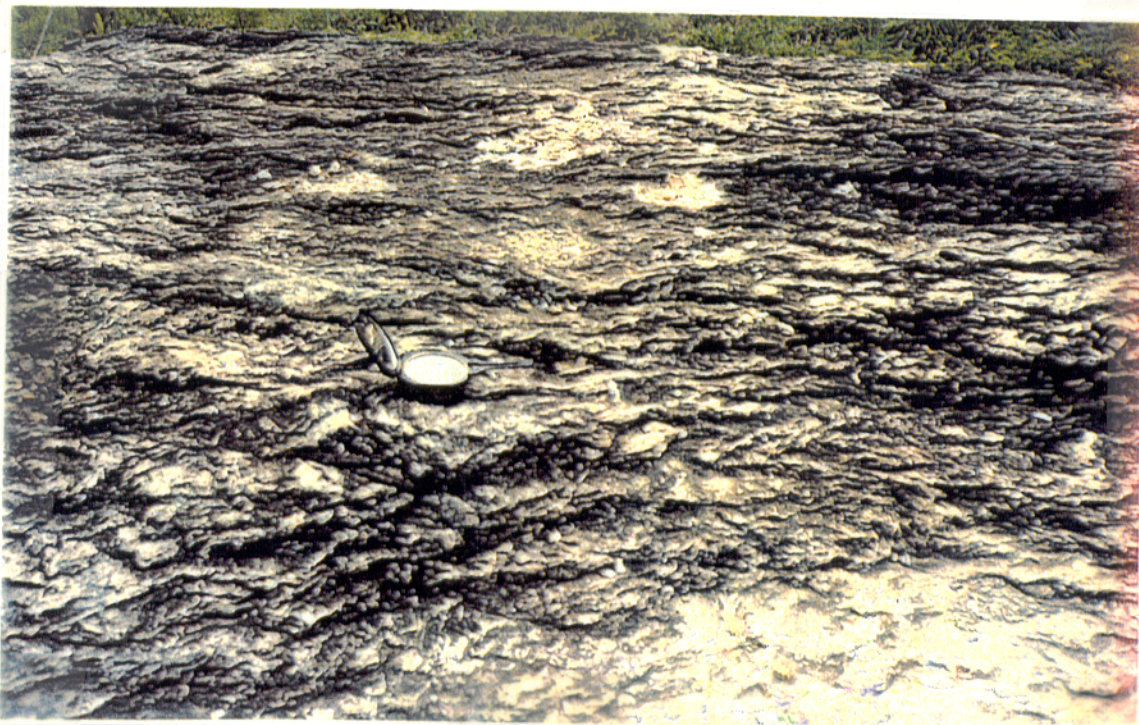


Figura 2.4 - Clorita Xisto em exposição natural, localizada no ponto A da Figura 2.3. (após SILVA, 1996)



Figura 2.5 - Clorita Xisto transformado em um material argiloso (foto tirada no ponto B da Figura 2.3; após SILVA, 1996).

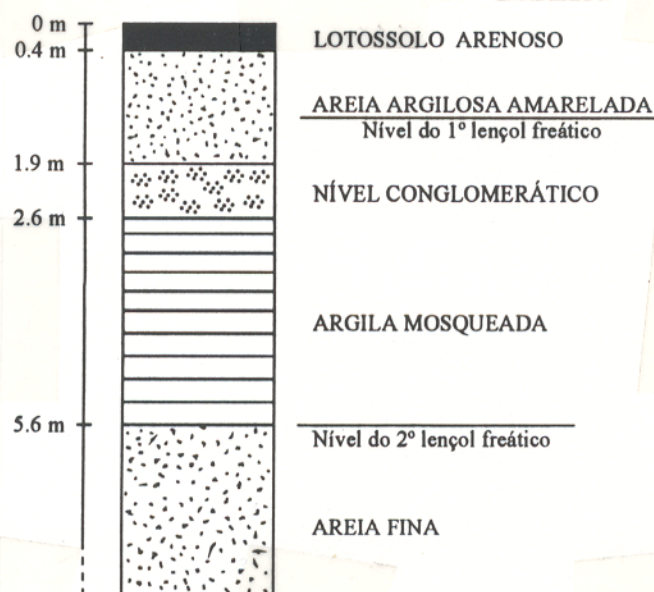


Figura 2.6 - Perfil estratigráfico esquemático mostrando a porção aflorante da Formação Itapecurui, descrito em um barranco localizado no ponto C da Figura 2.3 (após SILVA, 1996).



Figura 2.7 - Camada laterítica localizada às margens do igarapé Açaizal (ponto D da Figura 2.3).

## **3 - BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS VLF E HLEM**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

A técnica geofísica, normalmente, empregada na prospecção de água subterrânea em ambiente sedimentar e de aluvião, é a sondagem elétrica vertical Schlumberger. Porém, esta técnica não tem se mostrado eficaz em região cristalina (SOUZA, 1996). Entretanto, partindo do pressuposto que a água subterrânea nesse tipo de ambiente geológico se localiza em fendas ou fraturas, os métodos eletromagnéticos se constituem em uma boa alternativa para detectar tais estruturas. Como consequência, essas técnicas vem se tornando amplamente aplicadas na prospecção hidrogeológica, com relativo sucesso. (PALACKY et al., 1981; PODDAR & RATHOR, 1983; McNEILL, 1990).

O método VLF (Very Low Frequency), bem como o HLEM (Horizontal Loop Electromagnetic), são as técnicas EM mais empregadas para tal objetivo. Entre sua vantagens, destacam-se: simplicidade de uso e baixo custo operacional. Este capítulo tem por finalidade descrever os fundamentos teóricos dos métodos VLF e HLEM.

### **3.2 VLF**

A prospecção geofísica com o método VLF vem ocorrendo desde dos anos 60, quando PAÁL (1965) observou que as ondas de rádio nessa faixa de frequência, poderiam ser usadas para prospectar corpos condutores em subsuperfície. No início, o método foi empregado, principalmente, para prospectar minérios (PATERSON & RONKA, 1971). Com o passar do tempo, observou-se a aplicabilidade desta técnica no mapeamento geológico, particularmente na localização de zonas de falhas e fraturas (PHILLIPS & RICHARDS, 1975).

#### **3.2.1 Fundamentos Teóricos**

O método VLF utiliza transmissores fixos, de alta potência que operam na faixa de frequência de 15-30 kHz, localizados em várias partes do mundo, de natureza militar, é a comunicação com submarinos. A Figura 3.1 mostra um exemplo de uma estação e seu alcance máximo.

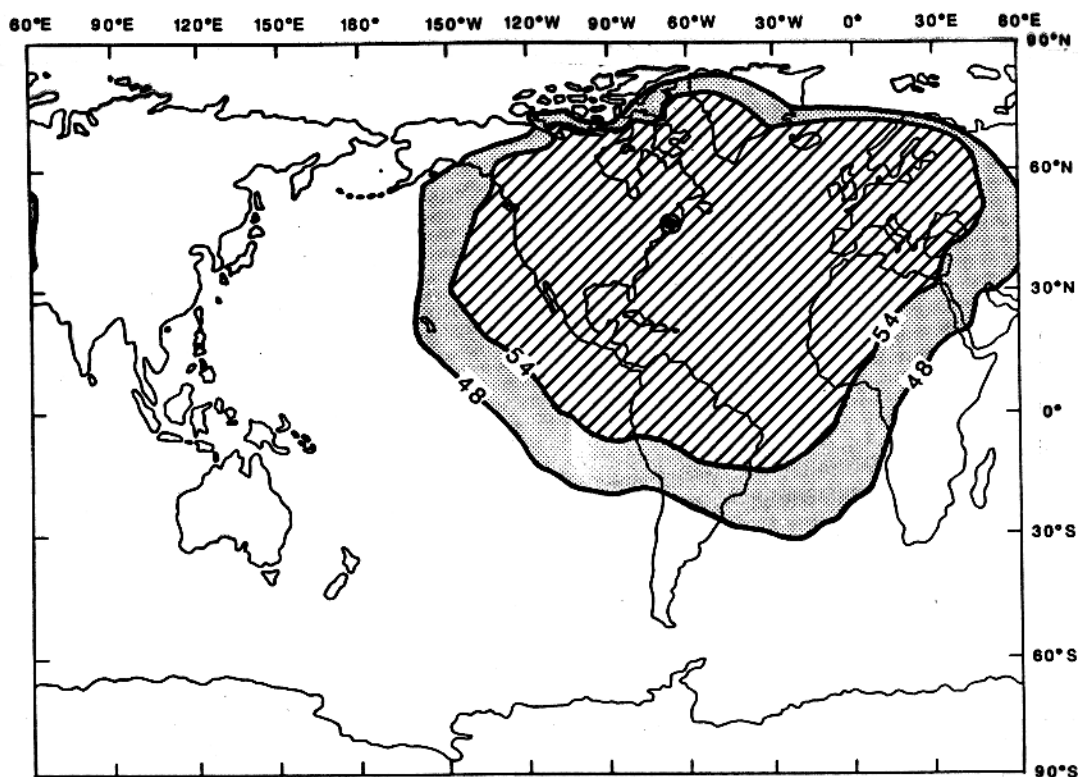


Figura 3.1 - Estação NAA, Cutler, Maine, U.S.A.. Freq. de 24 kHz (Força do sinal considerada boa no contorno de 54 db e considerada limite no contorno de 48 db; após McNEILL & LABSON,1991)

O princípio básico do método consiste na geração de um campo eletromagnético pela antena da estação transmissora, o qual se propaga radialmente nas suas proximidades, mas nas regiões distantes da estação pode ser considerada uma onda plana, cujas componentes são: um campo elétrico vertical  $E_z$ , um campo magnético horizontal  $H_y$ , ambos perpendiculares à direção de propagação e um pequeno campo elétrico horizontal  $E_x$  na direção de propagação, cuja existência foi demonstrada mais recentemente (Wait apud McNEILL & LABSON, 1991).

Até há pouco tempo atrás, acreditava-se que a componente  $H_y$  era a causa principal da maior parte do campo magnético anômalo (campo secundário) nas investigações VLF, pois este campo magnético horizontal induz corrente em corpos condutivos (falhas, fraturas, zonas de cisalhamento, etc.) localizados na subsuperfície. Por isso, procurava-se demarcar as linhas de investigações paralelas ao campo magnético horizontal, formando um ângulo reto com o "strike" da estrutura geológica que se pretendia investigar, ou seja, o transmissor deveria ser localizado na mesma direção.

McNEILL & LABSON (1991), mostraram que o campo elétrico horizontal  $E_x$ , é o principal responsável pela anomalia VLF, a menos que a subsuperfície seja extremamente resistiva (da ordem de 25.000 a 50.000  $\Omega.m$ ). Quando este campo elétrico incide perpendicularmente na interface de dois materiais de resistividades diferentes (polarização H), cargas elétricas são induzidas nesta. Destas cargas elétricas surge um campo elétrico secundário que modifica o campo elétrico original. O campo elétrico resultante e a variação de resistividade geram uma corrente e esta, por sua vez, gera um campo magnético vertical local, o qual é medido nas investigações VLF.

Quando o campo elétrico horizontal incide paralelamente à interface de dois materiais de resistividades diferentes (polarização E), não são induzidas cargas na mesma. porém, sabe-se pela Lei de Biot-Savart, que o campo magnético secundário estará diretamente relacionado ao fluxo de corrente, que é controlado pelo campo elétrico horizontal  $E_x$  através da Lei de Ohm ( $J=\sigma E$ ), e pela resistividade dos materiais. Daí a atribuição da anomalia VLF ao campo elétrico horizontal  $E_x$ .

O campo magnético secundário combina-se com o campo magnético primário, fornecendo um campo magnético resultante, o qual é polarizado elípticamente, como mostra a Figura 3.2.

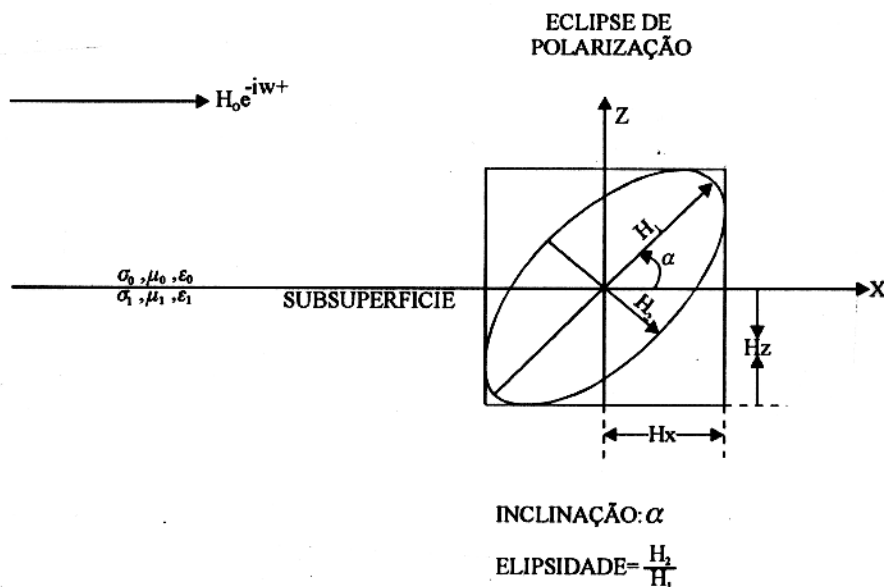


Figura 3.2 - Elipse de polarização na presença de um corpo condutivo.

O ângulo que o eixo maior da elipse de polarização faz com a horizontal é denominado de inclinação (tilt angle), e a razão do eixo menor com o maior é conhecida como elipsidade. A relação da inclinação ( $\alpha$ ) e da elipsidade ( $\epsilon$ ) com os campos magnéticos horizontal e vertical

e com suas fases, dados por SMITH & WARD (1974) é:

$$\alpha = \pm 1/2 \arctan\left[2 \frac{H_z/H_x \cos \Delta\phi}{1 - (H_z/H_x)^2}\right] \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \left|\frac{H_2}{H_1}\right| = \frac{H_z H_x \text{sen } \Delta\phi}{H_1^2} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$\Delta\phi = \phi_z - \phi_x \quad (3.3)$$

Onde  $H_z$  e  $H_x$  são as componentes vertical e horizontal do campo magnético resultante,  $H_1$  e  $H_2$  são os eixos maior e menor da elipse de polarização e  $\phi_z$  e  $\phi_x$  são as fases das componentes dos campos magnéticos vertical e horizontal.

A inclinação e elipsidade são os parâmetros normalmente utilizados para a análise dos dados VLF. Típicos perfis com essas curvas, são mostrados no Capítulo IV.

A carência de transmissores, se constitui uma desvantagem na aplicação do método VLF, haja vista que as estações transmissoras operam em uma única frequência, e para se usar duas ou mais frequências ou seja investigar em diferentes profundidades, seria necessário sintonizar o receptor em mais de uma estação transmissora VLF, o que é muito difícil, principalmente aqui no Brasil, onde existe uma grande distância dos centros transmissores, normalmente situados no hemisfério norte.

### 3.2.2 Filtragem dos Dados VLF

As fontes transmissoras do método VLF operam com frequências relativamente altas (15-30 Hz) comparadas a outras técnicas eletromagnéticas ( $10^{-3}$ - $10^4$  kHz), introduzindo, desta forma, uma grande quantidade de ruído geológico no sinal medido, o que torna a interpretação dos dados muito difícil.

FRASER (1969), para resolver este problema, desenvolveu um filtro numérico simples, o qual transforma o "crossover" da anomalia (ponto onde o gráfico da anomalia intercepta o eixo dos x), em pico, aplicando, para isso, diferenças sucessivas nos dados de inclinação do perfil. Este processo de filtragem, deixa os dados apropriados a confecção de mapas de contorno, delineando, desta maneira, as estruturas geológicas que produzem os sinais anômalos. Fraser desenvolveu este filtro, para satisfazer os seguintes critérios:

1. deslocar os dados de inclinação de 90 graus, para converter "crossover" e inflexão em pico, produzindo quantidades contornáveis;
2. atenuar o grande comprimento de onda, para aumentar a resolução da anomalia local;

3. não aumentar o ruído randômico nos dados e
4. ser de fácil aplicação.

Os dois primeiros critérios são satisfeitos calculando  $M_2 - M_1$ . Onde  $M_1$  e  $M_2$  são duas medidas consecutivas. O terceiro critério, é obedecido com a aplicação de um filtro suavizador passa-baixa sobre o conjunto de três medidas sucessivas, como segue:  $(M_2 - M_1)/4 + (M_3 - M_2)/2 + (M_4 - M_3)/4$ , resultando em  $\frac{1}{4} [(M_3 + M_4) - (M_1 + M_2)]$ . Onde  $M_1, M_2, M_3$  e  $M_4$  são quatro medidas consecutivas. Finalmente, eliminando a constante de multiplicação, tem-se o último critério satisfeito, e um filtro efetivo:  $(M_3 + M_4) - (M_1 + M_2)$ . Onde este ponto é plotado no meio das medidas  $M_2$  e  $M_3$ .

Este filtro é amplamente usado na interpretação de anomalias VLF, embora muitos geofísicos prefiram trabalhar com os dados brutos, pelas seguintes razões:

1. a filtragem pode deslocar o pico da anomalia levemente ao longo do perfil;
2. a resposta de estruturas complexas, pode ser substancialmente alterada no processo de filtragem;
3. a resposta de um contato torna-se semelhante a de um corpo condutor.

Esses são bons argumentos para se utilizar tanto os dados brutos quanto os filtrados no procedimento de interpretação VLF.

### 3.3 HLEM

O método Sligram, um dos mais empregados métodos eletromagnéticos, utiliza pequenos "loops" como antenas transmissora e receptora, que podem ser tratados como dipolos magnéticos, dando um maior controle no transmissor, pois, na operação com o método, pode-se usar várias frequências, o que permite a investigação em diferentes profundidades, e podem ser realizadas com os "loops" dispostos em diferentes configurações, dentre as quais, a mais usada é o arranjo horizontal coplanar. Por este motivo, o método é comumente chamado de método HLEM (Horizontal Loop ElectroMagnetic).

#### 3.3.1 Fundamentos Teóricos

O princípio básico do método, consiste em se fazer circular uma corrente, de frequência pré-determinada, na bobina transmissora, a qual comporta-se como um dipolo magnético

oscilante. Esta corrente, produzirá um campo magnético primário, e este por sua vez induz força eletromotriz e conseqüentemente, fluirá corrente em corpos condutores na subsuperfície, por ventura existentes; esta corrente é denominada de "corrente eddy". Serão induzidas, também, corrente no manto de intemperismo, se este estiver presente, e na rocha encaixante. Dependendo dos parâmetros elétricos do meio, pode-se determinar qual a corrente que foi a principal causadora do campo magnético secundário, o qual é medido no receptor, através de suas componentes em-fase e quadratura, e tendo como referência um sinal enviado da bobina transmissora, por meio de um cabo ou telemetria.

Quando o meio for altamente resistivo e o manto de intemperismo for pouco espesso e bem resistivo, o campo magnético secundário gerado por esses, pode ser desprezado. Assim, somente a corrente induzida no corpo é considerada como a causadora do campo secundário medido.

Se a camada intempérica for relativamente espessa e condutiva, se a rocha encaixante tiver resistividade finita e se o corpo condutor apresentar um bom contato elétrico com o manto e/ou com a encaixante, a corrente galvânica não será mais desprezível, causando modificações importantes na resposta (GAUR et al.,1972; GAUR & VERMA, 1973) . Segundo FRISCHKNECHT et al(1991) essas alterações na anomalia, facilitam a interpretação qualitativa, mas pode complicar a interpretação quantitativa, tornando a determinação dos parâmetros do corpo mais difícil.

Quando o contraste de condutividade entre a feição e a rocha encaixante for pequeno, o fluxo de corrente galvânica no corpo prevalecerá sobre a corrente de "eddy". E no caso do corpo ser mais resistivo que a rocha encaixante, a anomalia é, acima de tudo, devido a deflexão da corrente galvânica nas proximidades do corpo.

O método HLEM tem se mostrado eficaz na localização de corpo condutores de interesse, como os de sulfetos, bem como no mapeamento de estruturas geológicas, como falhas e fraturas (PALACKY & KADEKARU, 1979; PALACKY & SENA, 1979; PALACKY et al., 1981).

Para se obter um melhor acoplamento, ou seja, uma maior resposta, os perfís HLEM devem ser realizados perpendicularmente ao "strike" e/ou a direção presumida para os corpos procurados. Um típico perfil HLEM é mostrado no Figura 3.3.

Um ponto interessante na plotagem dos dados, é que as medidas são influenciadas por uma região nas proximidades do arranjo, mas , por convenção, plota-se no ponto médio entre o transmissor e o receptor.

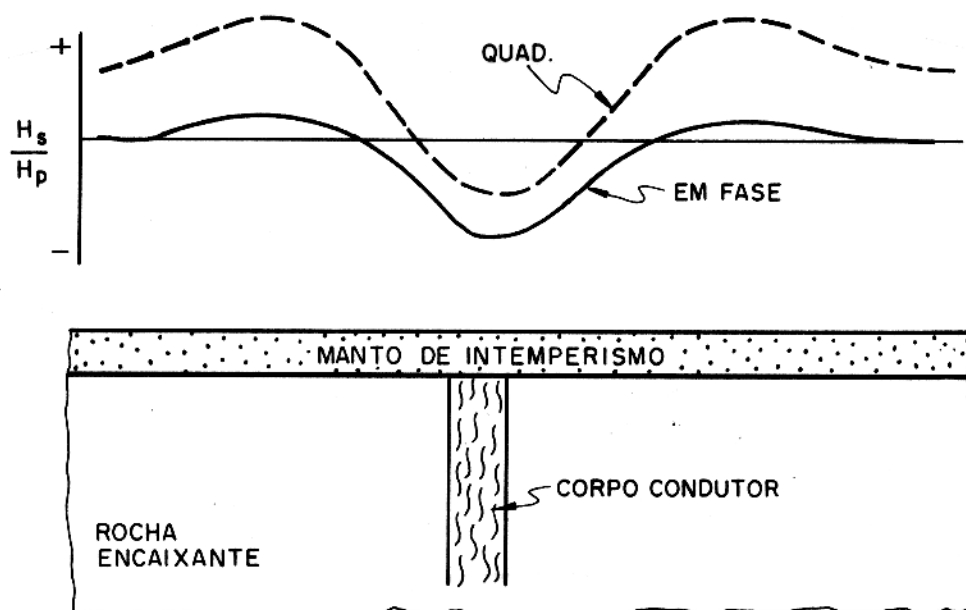


Figura 3.3 - Um típico perfil HLEM

# 1 - MODELAGEM DE DADOS VLF

## 1.1 INTRODUÇÃO

A formulação matemática de problemas geofísicos, em particular nos métodos eletromagnéticos, é de grande complexidade e geralmente de difícil solução, sendo que na maioria dos casos é impossível obter uma solução analítica. Como consequência, as respostas eletromagnéticas (EM) referentes a corpos condutivos em subsuperfície, não eram entendidas por completo, o que dificultava as interpretações dessas anomalias. Com o objetivo de prever os efeitos provocados por diferentes situações geológicas nas investigações EMs e geofísicas em geral, e com isso criar subsídios para uma interpretação mais confiável, os esforços voltaram-se em direção a um tratamento teórico conhecido como modelagem ou simulação, o qual pode ser em escala reduzido ou analógico e numérico ou digital.

Na modelagem analógica, a situação real de campo pode ser simulada em escala reduzida, no laboratório, se o princípio de similitude EM for obedecido, onde uma quantidade adimensional conhecida como parâmetro de resposta ( $\alpha$ ), deve ter o mesmo valor para os dois modelos, o real e o reduzido. No caso:  $\alpha = \mu\omega\sigma t l$ , em que  $\mu$  é a permeabilidade magnética;  $\omega$  é a frequência angular;  $\sigma$  é a condutividade elétrica;  $t$  é a espessura do corpo; e  $l$  é a distância entre o transmissor e o receptor. Vários resultados importantes existem na literatura, obtidos através da aplicação dessa técnica e contribuíram para um melhor entendimento das anomalias EM (LOWRIE & WEST, 1965; GAUR et al., 1972; GAUR & VERMA, 1973; CONEY, 1977; BAKER & MYERS, 1978; SILVA, 1981; VILLEGAS-GARCÍA & WEST, 1983; SILVA & VERMA, 1986; SILVA & GALVÃO, 1991; dentre outros).

Na modelagem digital, os resultados são obtidos a partir de modelos matemáticos, representados normalmente por soluções numéricas aproximadas ou, quando possível, pela solução analítica exata, com as simulações realizadas no computador. Na solução numérica aproximada, é necessário fazer uso de ferramentas matemáticas, desde as mais simples como a integração numérica e convolução, até as mais sofisticadas, como o método das equações diferenciais, através das técnicas dos elementos finitos e diferenças finitas, e o método das equações integrais. Vários resultados importantes surgiram na literatura, nos últimos anos, contribuindo bastante para as interpretações de anomalias EMs (VOZOFF, 1971; LAJOIE & WEST, 1976; RIJO, 1977; KAIKKONEN, 1979 e 1980; OLSSON, 1980 e 1983; SAYDAM,

1981; PODDAR; 1982).

Neste capítulo, utilizam-se simulações numéricas para analisar a resposta VLF em algumas situações geológicas possíveis de serem encontradas em região cristalina, bem como o efeito de alguns fatores que afetam esta anomalia, tais como: efeito do manto de intemperismo, a resistividade do corpo, a resistividade da rocha encaixante, etc e, também, fornecer subsídios para uma interpretação qualitativa e quantitativa dos dados de campo. Para esta finalidade, foi empregado o programa EGSLIB/VLF2D (RIJO, 1994), que na sua resolução aplica o método dos elementos finitos, o qual é uma importante ferramenta para fornecer soluções aproximadas a problemas de contorno, cuja solução analítica é muito complicada ou inexistente.

Na implementação da técnica dos elementos finitos, considera-se uma região da subsuperfície, a qual deseja-se encontrar uma solução aproximada de um determinado modelo, e faz-se uma subdivisão (discretização) desta por um número finito de pequenos subintervalos, denominados de elementos ou células e que podem ser da forma quadrangular, quadrática ou triangular dando uma maior versatilidade na representação do modelo, pois pode-se considerar corpos inclinados. Um fator importante, que deve ser considerado nesta técnica, é o tamanho da região do modelo finito, que representa uma região contínua e infinita, na qual deve ser suficientemente grande para a aproximação não sofrer influência da fronteira, o que levaria a erros nos valores calculados. Maiores detalhes desta técnica podem ser encontradas em: HUEBNER (1975); RIJO (1977); SILVESTER & FERRARI (1983).

## 4.2 MODELOS

Os modelos que serão apresentados a seguir, com suas respectivas curvas dos parâmetros da elipse de polarização sobre as quais serão feitas as análises, são representativos de situações geológicas possíveis de serem encontradas na região sob estudo, úteis na prospecção de água subterrânea e foram simulados considerando uma malha com 10.431 nós, 183 na direção x e 57 na direção z, correspondendo a 10.192 elementos, 182 na direção x e 56 na direção z, sendo os elementos divididos em blocos de valores, com 14 na direção x e 17 na direção z, ou seja, não se considerou uma malha homogênea. A frequência de simulação é igual 24 kHz, em todos os modelos. Para reduzir o tempo computacional, utiliza-se elemento de valores grandes, bem grandes para dar a idéia de infinito, na fronteira (RIJO, inédito)

### 4.2.1 Contato

Nesta simulação, são consideradas duas disposições para uma interface, uma vertical e uma inclinada.

#### 4.2.1.1 Vertical

A Figura 4.1a mostra o modelo representativo de um contato vertical não aflorante, localizado no centro do perfil e com contraste de resistividade igual a 25. Observamos que tanto na curva de "tilt angle" quanto na de elipsidade, a localização do contato está nas proximidades do primeiro ponto de inflexão destas, e existe um maior prolongamento das curvas na direção do lado mais resistivo, significando que o campo magnético vertical está presente em uma maior distância da interface, neste lado. Um outro ponto marcante está na curva de elipsidade na qual percebe-se a variação de resistividade bem antes que na curva de "tilt angle".

Na Figura 4.1b, é mostrado o mesmo contato da figura anterior. Porém, o sentido de caminhamento no perfil é indo do resistivo para o condutivo. Observamos uma inversão de concavidade tanto na curva de "tilt angle" quanto de elipsidade, em relação ao caso anterior, e a localização do contato não se dá mais nas proximidades do primeiro ponto de inflexão, e sim do segundo, nos levando a concluir que o sinal dos parâmetros medidos dependem, também, da direção X tomada em relação ao "strike" geológico. A inversão da anomalia se dá devido ao efeito da polarização elétrica que ocorre na interface.

#### 4.2.1.2 Inclinado

As Figuras 4.2a e b mostram o contato inclinado de 45° com suas respectivas curvas de "tilt angle" e elipsidade, com o caminhamento do perfil indo do condutivo para o resistivo e vice-versa respectivamente. Nota-se nestas figuras que a única mudança perceptível em relação ao contato vertical é o deslocamento da localização do contato nas curvas em direção ao ponto de máximo, no caso da Figura 4.2a, ou de mínimo, no caso da Figura 4.2b.

### 4.2.2 Influência do Manto de Intemperismo

Em regiões tropicais é comum a presença de uma camada condutiva e espessa. No Brasil, em particular no Sudeste do Estado do Pará, é frequente a existência do manto de intemperismo com tais características. A interpretação dos dados EM, sem o conhecimento prévio dos

efeitos que este horizonte provoca na anomalia, pode conduzir a erros (LAJOIE & WEST, 1977; PALACKY & KADEKARU, 1979; PALACKY & SENA, 1979; PALACKY et al., 1981).

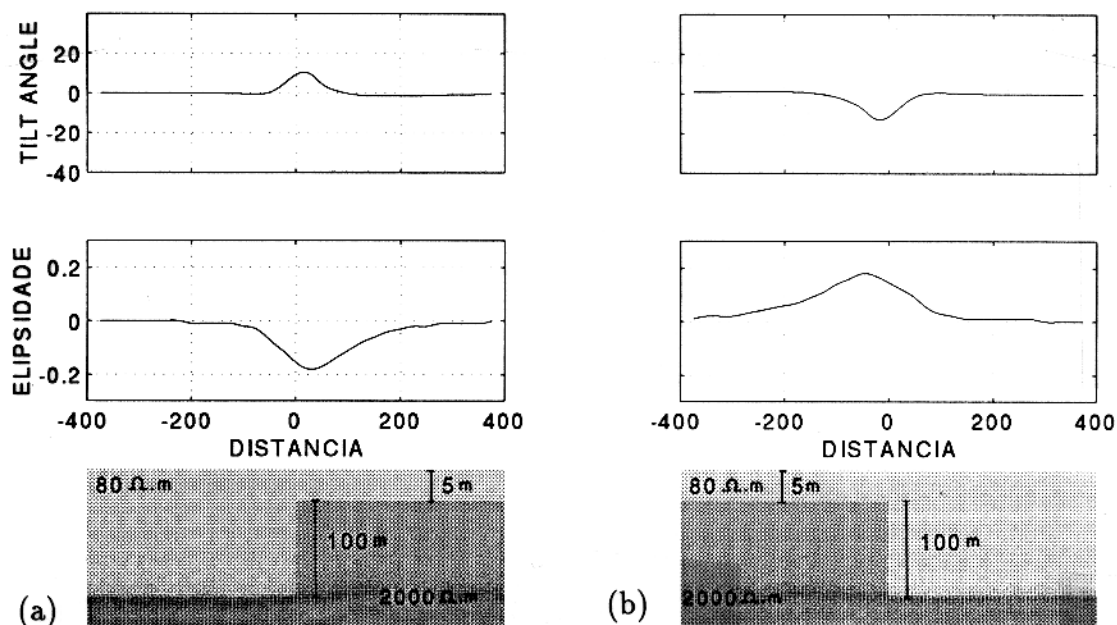


Figura 4.1 - Resposta de um contato vertical: a) caminhando do condutivo para o resistivo; b) caminhando do resistivo para o condutivo

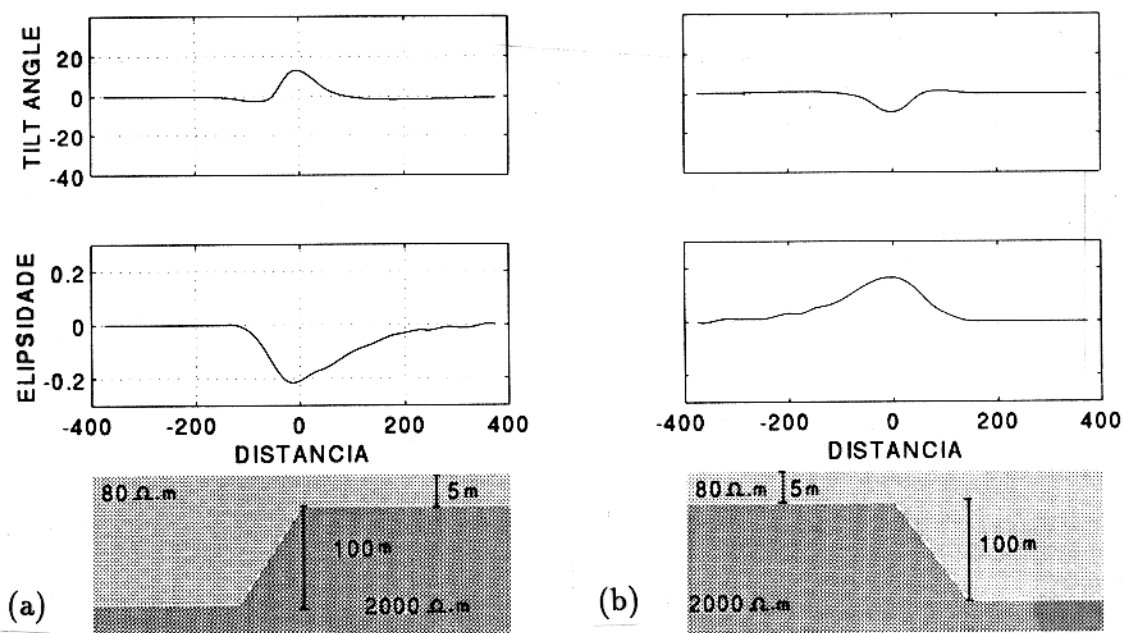


Figura 4.2 - Resposta de um contato inclinado de 45°: a) caminhando do condutivo para o resistivo; b) caminhando do resistivo para o condutivo

#### 4.2.2.1 Efeito do Produto Condutividade x Espessura do Manto de Intemperismo

Na Figura 4.3a é mostrado a situação em que um corpo condutivo, em um meio encaixante relativamente resistivo e coberto por um manto de intemperismo. Considerando dois valores para este produto, 0,025 e 0,5. Observa-se que este horizonte causa uma redução na amplitude da curva de "tilt angle" em relação a curva sem o manto, redução esta que é mais acentuada se o manto for mais condutivo, podendo conduzir o intérprete a considerar o sinal captado como um erro na coleta dos dados ou apenas um ruído geológico. Na curva de elipsidade ocorre uma mudança em sua forma, retirando a quebra ocorrida exatamente sobre o corpo e para o manto de baixa condutância, chega ocorrer também uma amplificação deste sinal.

#### 4.2.2.2 Efeito da Variação Lateral na Resistividade do Manto de Intemperismo

Figura 4.3b mostra a situação em que ocorrem mudanças laterais nas propriedades elétricas da camada intempérica. Dessa modelagem, observamos que dependendo do contraste de resistividade dessas variações (8 e 15 no exemplo), a resposta VLF, através das curvas de "tilt angle" e elipsidade, é afetada e não se pode distinguir facilmente essa anomalia daquelas geradas por corpos condutivos no substrato, além de ocorrer um deslocamento no nível base da curva de "tilt angle" ( $0^\circ$ ).

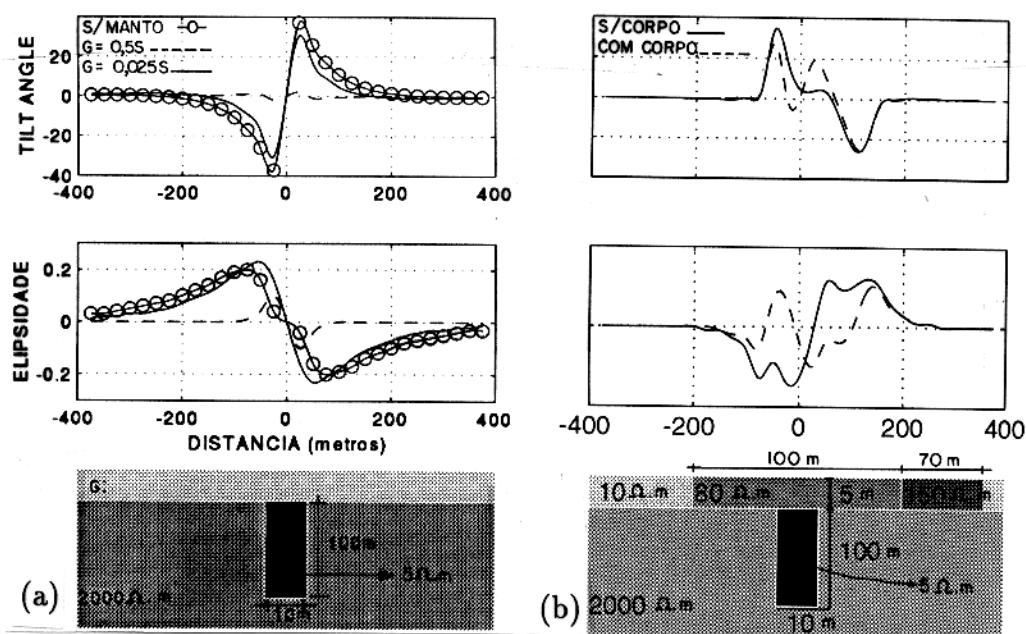


Figura 4.3 - Efeito do manto de intemperismo: a) condutância e b) variação lateral de resistividade

### 4.2.3 Efeito do Contraste de Resistividade entre o Corpo Condutor e o Meio Encaixante

A análise deste efeito foi realizado considerando uma feição na posição vertical, com 100 m de comprimento e 10 m de largura. Considerando 4 diferentes contraste de resistividades entre este corpo e o meio encaixante, e recoberto por um manto de intemperismo com resistividade de  $80 \Omega.m$ , como ilustrado na Figura 4.4. Pode-se ver através das curvas de "tilt angle" e elipsidade apresentadas na parte superior desta figura, que quanto menor for o contraste de resistividade com o ambiente, menor será resposta, a ponto de, em dados reais se interpretar, para pequenos contraste como o de 2 e 4 em nosso exemplo, como uma imprecisão na leitura dos dados ou apenas sinais espúrios.

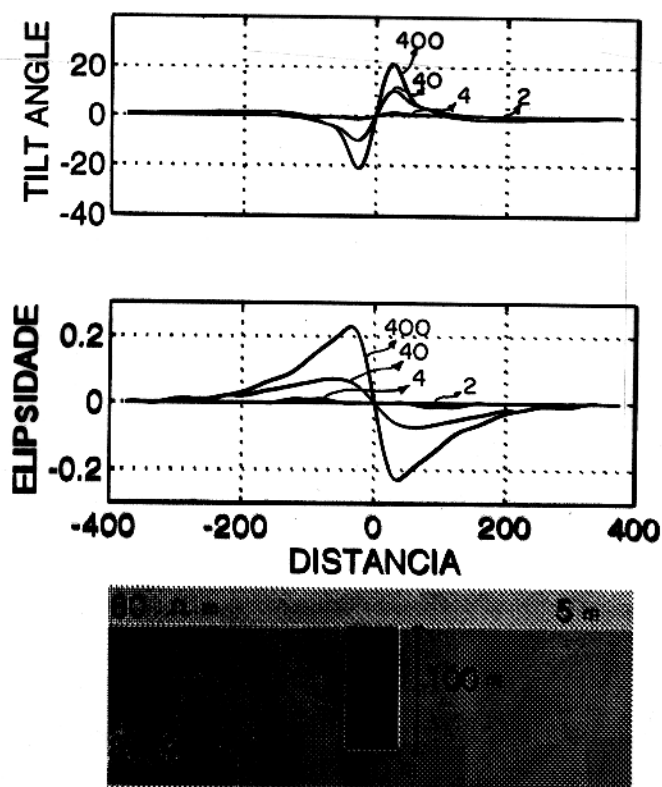


Figura 4.4 - Efeito do contraste de resistividade entre o corpo condutor e o meio encaixante

### 4.2.4 Disposição Geométrica

Para analisar a influência que a disposição espacial dos corpos anômalo tem nos parâmetros medido pelo método VLF ("tilt angle" e elipsidade), simulou-se três situações diferentes para o mesmo corpo, como mostrado na Figura 4.5. Na Figura 4.5a tem-se um corpo vertical de 100 m de comprimento e 10 m de largura, resistividade de  $5 \Omega.m$  (um

contraste de resistividade com o meio encaixante de 400), observa-se que as curvas tanto de "tilt angle" quanto de elipsidade são simétricas com o "crossover" ocorrendo exatamente no centro do corpo. Este resultado é semelhante ao obtido quando se tem este mesmo corpo rotacionado de 90°, ficando, desta forma, na posição horizontal ( Figura 4.5b), porém sem contato com o manto de intemperismo, o que caracteriza uma ambiguidade.

Modelando-se agora o mesmo corpo com uma inclinação de 45° ( Figura 4.5c). Observa-se que, ocorre uma quebra da simetria das curvas, havendo uma tendência das mesmas em se prolongarem mais na direção da declividade do corpo, permitindo-se assim, indentificar a direção de mergulho. O "crossover" se deslocou em direção ao centro de massa do corpo.

#### 4.2.5 Depressão no Embasamento

Nesta simulação foi considerado uma depressão na estrutura do embasamento com 10 m de largura e 100 m de profundidade, a qual é preenchida com o mesmo material da camada intemperizada. Se este material for propício para o armazenamento, então esta estrutura será considerada, na prática, como um possíveis reservatório de água subterrânea em região do cristalino. Tomando duas resistividades diferentes para esta cobertura (10 e 80  $\Omega.m$ ), observamos que quanto mais condutiva é esta camada, menor é a resposta com relação a curva de "tilt angle", sendo a elipsidade pouco alterada, conforme ilustrado na Figura 4.6a.

Supondo agora o caso de uma depressão no embasamento preenchida com o mesmo material da camada intemperizada e recoberta por um corpo resistivo, semelhante a uma soleira. Nesta situação, é possível notar a influência da soleira na curva de "tilt angle", o que não ocorre com a elipsidade. Se esta depressão estiver preenchida com material mais condutivo que a camada intemperizada, a soleira já não influencia mais nas curvas de anomalia VLF ( Figura 4.6b)

#### 4.2.6 Soerguimento no Embasamento

O modelo idealizado consiste em um bloco soerguido do embasamento a uma altura de 60 m do plano deste e com 10 m de largura, dentro de um meio cuja resistividade aparente é de 80  $\Omega.m$ , como mostra a Figura 4.7. As curvas resultantes deste modelo são de sentido contrário daquelas geradas pela situação apresentada na Figura 4.6a. Porém, esta anomalia é de amplitude tão pequena que, na interpretação de dados reais é comum considerar este sinal como consequência de ruído ou erro de leitura.

Esse tipo de estrutura, que pode ser considerado um dique resistivo ou um host em meso

escala, é possível de representar uma zona de cisalhamento.

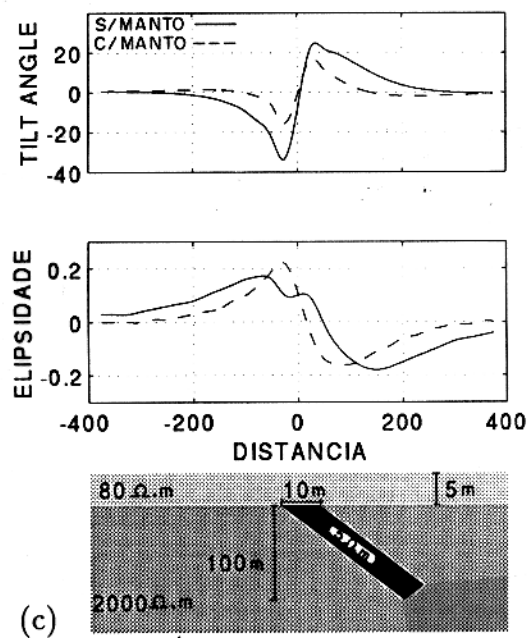
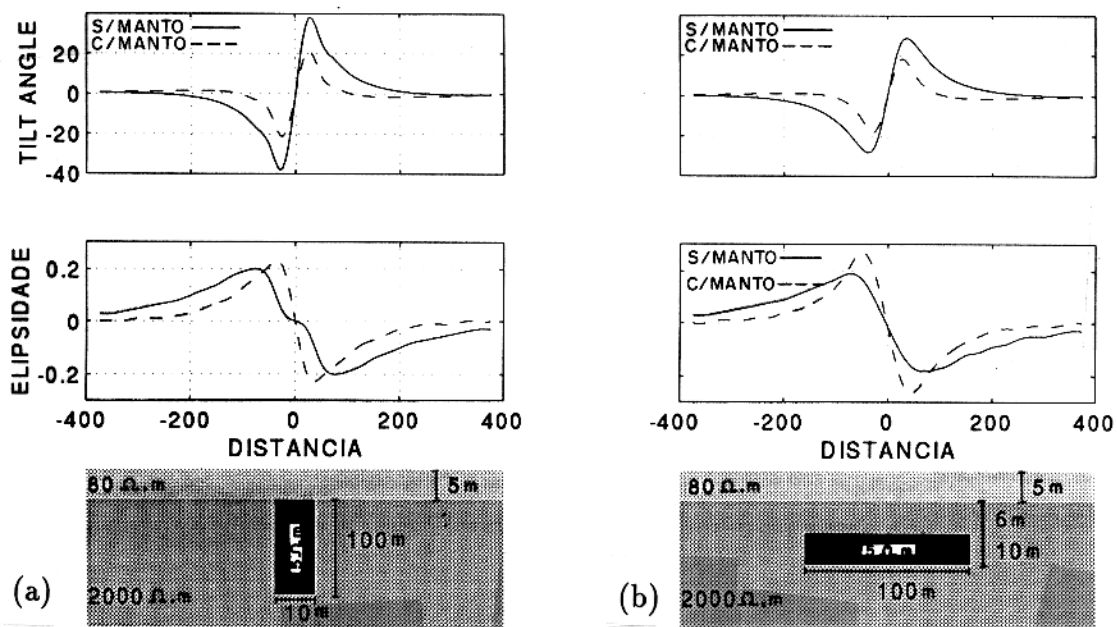


Figura 4.5 - Efeito da disposição geométrica do corpo condutor: a) vertical; b) horizontal e c) inclinado de  $45^\circ$

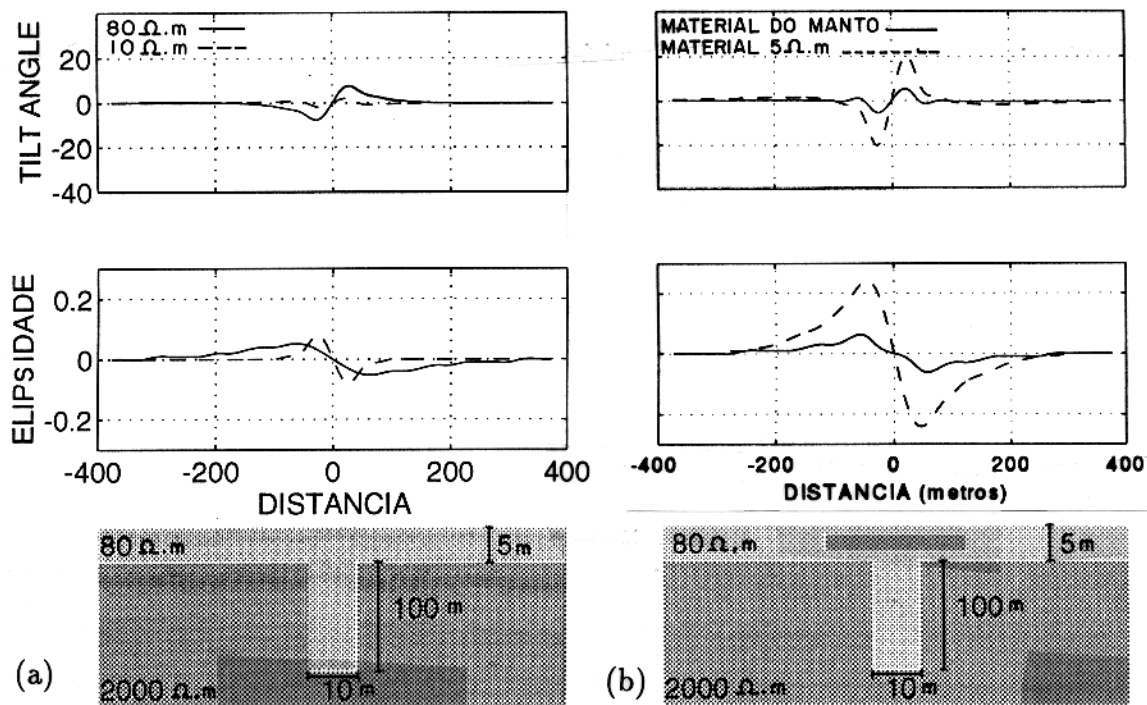


Figura 4.6 - a) Depressão no embasamento preenchida com o mesmo material do manto de intemperismo e b) Depressão sob um corpo resistivo

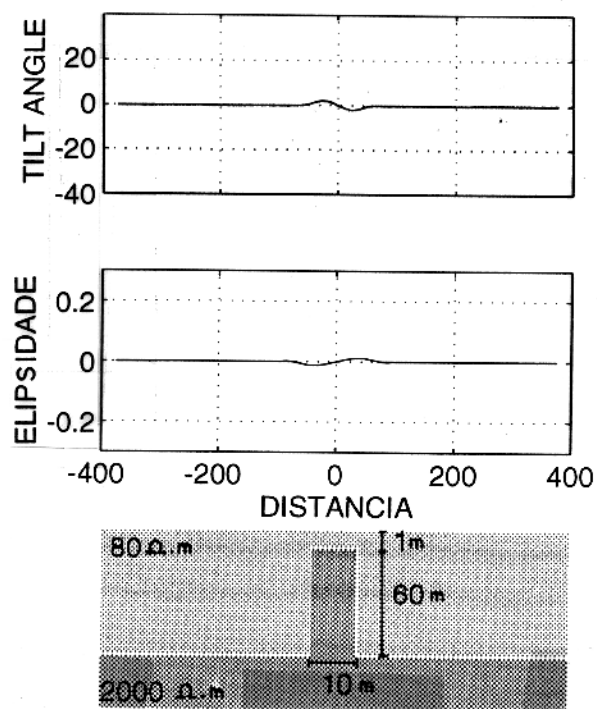


Figura 4.7 - Soerguimento do embasamento, que pode representar uma zona de cisalhamento

#### 4.2.7 Sequência de Soerguimentos e Depressões no Embasamento

Um perfil VLF realizado em uma região que possui irregularidades acentuadas na estrutura do embasamento, com sequências de elevações e depressões, se apresenta como mostrado na Figura 4.8. Esta situação é típica em regiões tropicais onde o manto de intemperismo é espesso e a topografia do contato dessa camada com a rocha sã é bastante irregular. O método, através das curvas de "tilt angle" e elipsidade na parte superior da figura, detecta esta situação anômala. Porém não é possível identificar com precisão, através destas curvas, os locais onde ocorrem depressões e elevações, podendo conduzir a interpretação à ignorância de possíveis reservatórios de água, no caso depressões, ou até mesmo considerar soerguimentos como locais ideais para a perfuração de poços para captação de água.

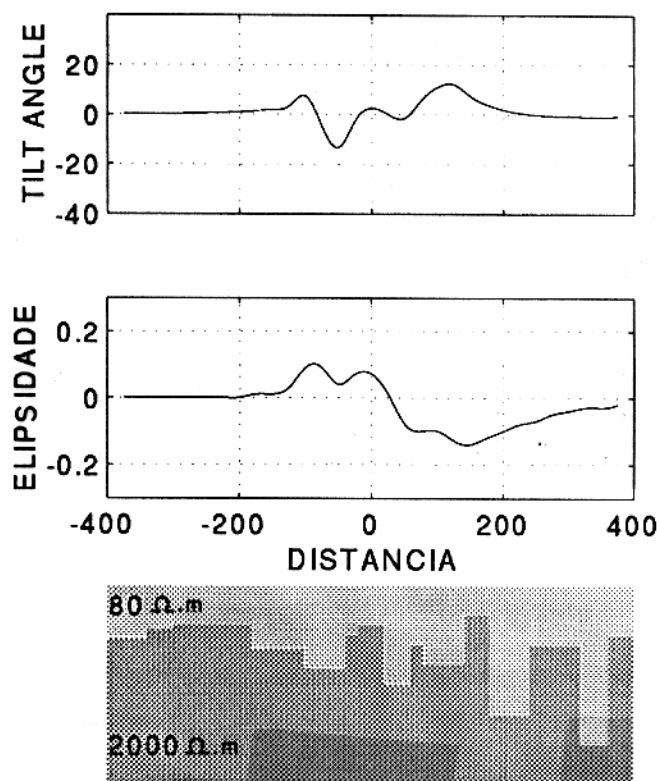


Figura 4.8 - Sequência de depressões e soerguimentos na estrutura do embasamento

#### 4.2.8 Multicorpos

Para analisarmos a influência entre corpos condutores na anomalia VLF, foram simuladas algumas situações geológicas com feições com diferentes disposições. Foram considerados para

estas modelagens um manto de intemperismo com 5 m de espessura e  $80 \Omega.m$  de resistividade, os corpos com resistividade de  $5 \Omega.m$  e um meio encaixante com  $2.000 \Omega.m$ .

Considere três corpos verticais, de mesmas dimensões e igualmente espaçados, conforme ilustrado na Figura 4.9. No espaçamento encontrado, é possível identificarmos a presença das três estruturas tanto na curva de "tilt angle" quanto de elipsidade, isto considerando apenas as curvas sem o manto de intemperismo (linha cheia). Já quando se considera a cobertura condutiva, as três feições são observadas nitidamente apenas na curva de "tilt angle", e a elipsidade torna-se semelhante àquela anomalia gerada na presença de apenas um corpo vertical ( Figura 4.5a). No espaçamento simulado (60 m ou  $0,4\delta$ , em relação a rocha encaixante), a curva de "tilt angle" atinge "crossover" para todos os corpos, porém somente o do centro manteve a simetria esperada para a disposição vertical.

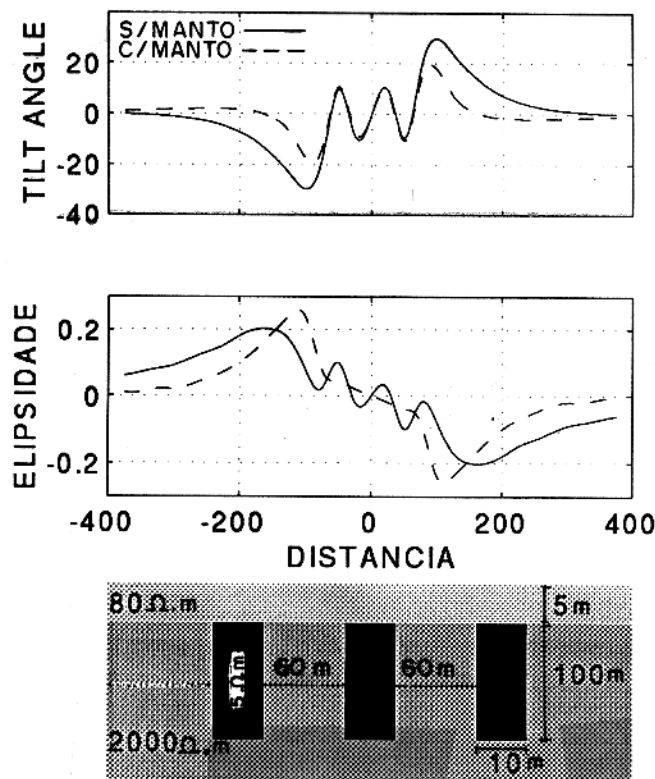


Figura 4.9 - Três corpos condutores verticais igualmente espaçados

Quando um dos corpos laterais é colocado mais próximo do corpo central e mantendo-se a mesma distância em relação ao outro, conforme ilustrado na Figura 4.10a, nota-se, neste caso, que na anomalia gerada não é mais possível perceber a presença das três heterogeneidades, e este resultado é idêntico ao apresentado na situação da Figura 4.10b, na qual se tem dois corpos separados por uma distância de 100 m, esta semelhança é um importante fator de

ambiguidade, que na prospecção de água subterrânea em região cristalina não é desejável, pois pode-se ignorar um possível reservatório de água.

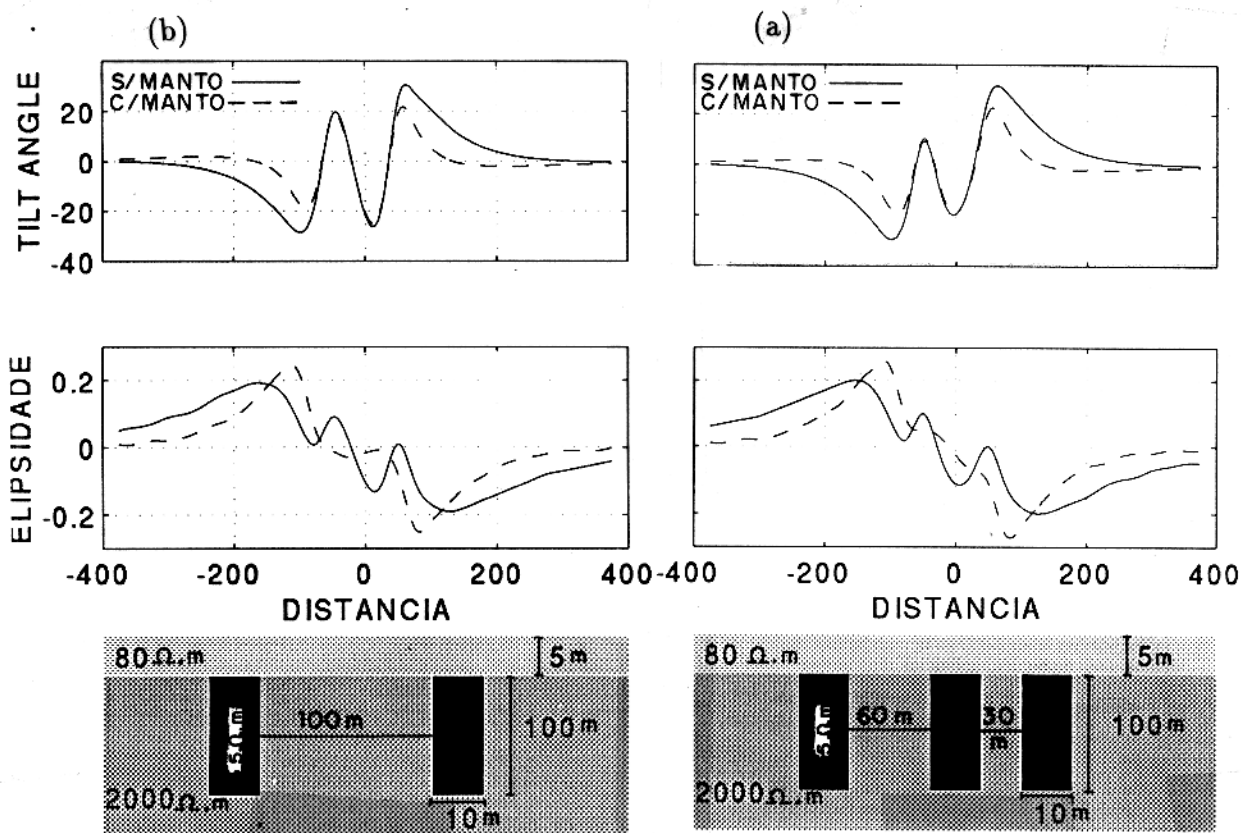


Figura 4.10 - a) Três corpos condutores verticais espaçados 60 e 30 m e b) dois corpos condutores verticais distantes 100 m um do outro

Considere agora a situação mostrada na Figura 4.11, onde temos três corpos inclinados, sendo os dois primeiros possuindo mergulho no mesmo sentido e encontrando um terceiro corpo maior e mergulhando em sentido oposto. Observe que nos espaçamentos considerados, é possível perceber as três estruturas na curva de "tilt angle", já na curva de elipsidade a resposta é semelhante a situação da Figura 4.5a. Estes resultados são idênticos àqueles apresentados na Figura 4.9, com a diferença que naquela disposição a feição central manteve simetria na curva de "tilt angle".

Trocando o corpo inclinado do centro por um vertical na mesma localização, como ilustrado na Figura 4.12a, podemos ver pela curva de "tilt angle", que os dois corpos laterais são notados claramente, enquanto a anomalia referente a feição central pode passar despercebida, pois não atinge o "crossover". Como consequência, em dados de campo esse corpo não seria

considerado na interpretação. A elipsidade tem o comportamento como nos casos anteriores.

Deslocando-se o corpo central mais para a direita, como ilustra a Figura 4.12b. Observa-se nesta configuração, que a presença da heterogeneidade central é detectada na curva de "tilt angle", porém não se tem a simetria esperada em uma anomalia gerada por um corpo vertical. Na curva de elipsidade ocorre uma ligeira ondulação nas proximidades dessa feição.

Um fato importante ocorrido nos modelos das Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, é que o manto de intemperismo mascara a curva de elipsidade muito mais do que a curva de "tilt angle".

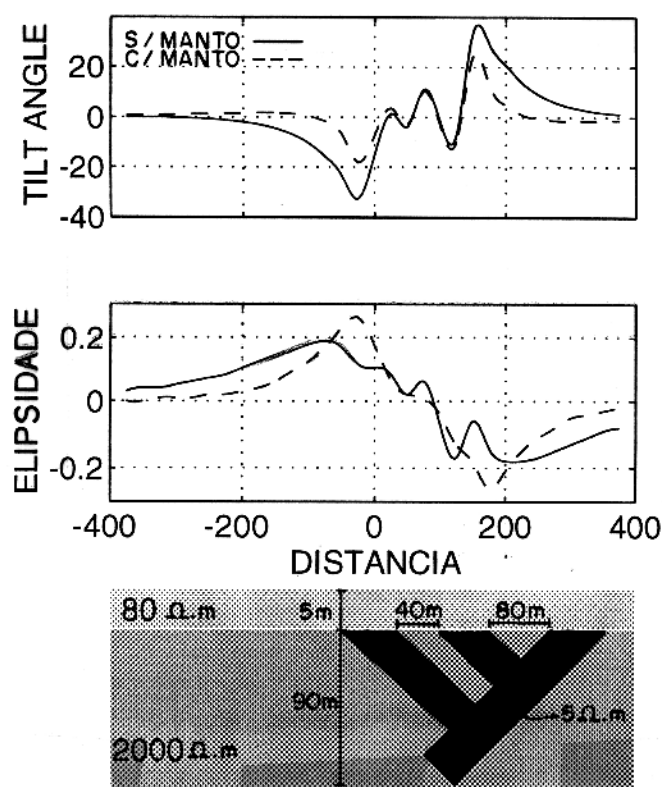


Figura 4.11 - Três corpos condutores inclinados, sendo o dois primeiros com mergulho no mesmo sentido e encontrando um terceiro mergulhando no sentido oposto

Vale relembrar que os resultados obtidos das situações estudadas neste capítulo, servirão para nortear a interpretação dos dados de campo coletados no Município de São Domingos do Araguaia. Esse será o assunto do próximo capítulo.

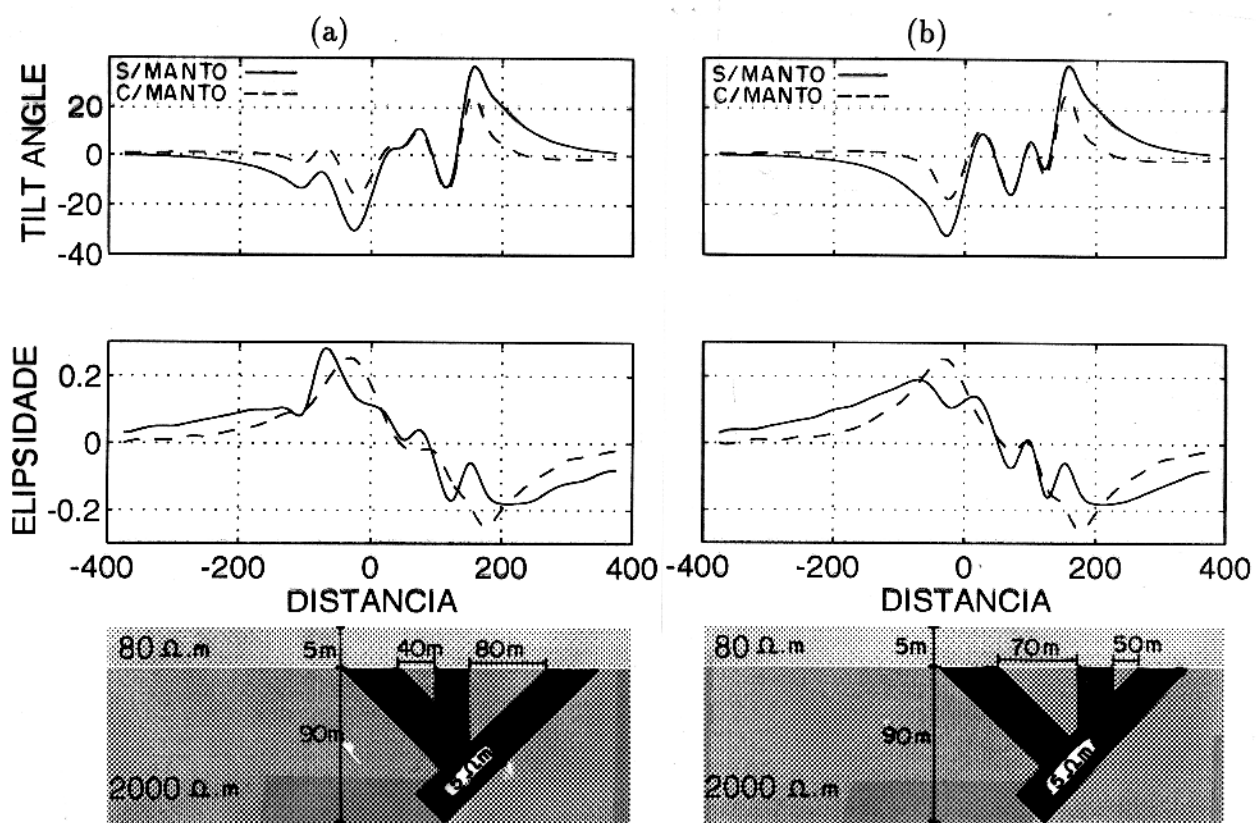


Figura 4.12 - a) Corpo vertical sobre o primeiro corpo inclinado e b) corpo vertical sobre o segundo corpo inclinado

## **5 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresentaremos os resultados do levantamento com o método eletromagnético VLF e em alguns pontos com o HLEM, na cidade de São Domingos do Araguaia, cuja finalidade foi a identificação de feições geológicas-estruturais passíveis de armazenamento de água. Os resultados obtidos são satisfatórios, sendo detectadas estruturas de "trends" N-S e NE-SW, que têm coerência com os dados da geologia regional.

### **5.2 OPERAÇÃO DE CAMPO**

Os levantamentos dos dados de campo foram tomados em três campanhas, realizadas nos meses de julho e outubro do ano de 1994 e junho do ano de 1995, o que corresponde ao período de maior seca desta região, o verão. Todos os levantamentos foram do tipo terrestre, e os perfís efetuados abrangeram todo o Município de São Domingos do Araguaia, incluindo comunidades como Vila Açaizal, Vila Nazaré, Cuchiú, dentre outras. Porém, na interpretação se utilizará apenas os dados coletados na sede municipal, devido a existência de uma maior concentração populacional e como consequência de uma maior necessidade de água.

Os pontos em cada região selecionada, onde iniciou-se cada perfil e a direção de caminhada são mostrados na Figura 5.1.

#### **5.2.1 Levantamento com o Método VLF**

Na sede municipal foram realizados 17 perfís, totalizando 6,5 quilômetros. O equipamento usado foi o receptor VLF SCOPAS, modelo SE-81, fabricado pela SCINTREX e pertencente ao Departamento de Geofísica CG/UFPa, cujos parâmetros de medidas são a inclinação ("tilt angle") e o azimute do campo magnético resultante. A estação transmissora captada, foi NAA, localizada em Cutler, Maine-USA, cuja coordenadas são 67W17 - 44N39 e frequência de operação 24,0 kHz. As medidas ao longo dos perfís foram tomadas a cada 20 m, normalmente, no intervalo de 7:00 às 12:00 hs, com o intuito de evitar ruídos atmosféricos (Mc. NEILL & LABSON, 1991).

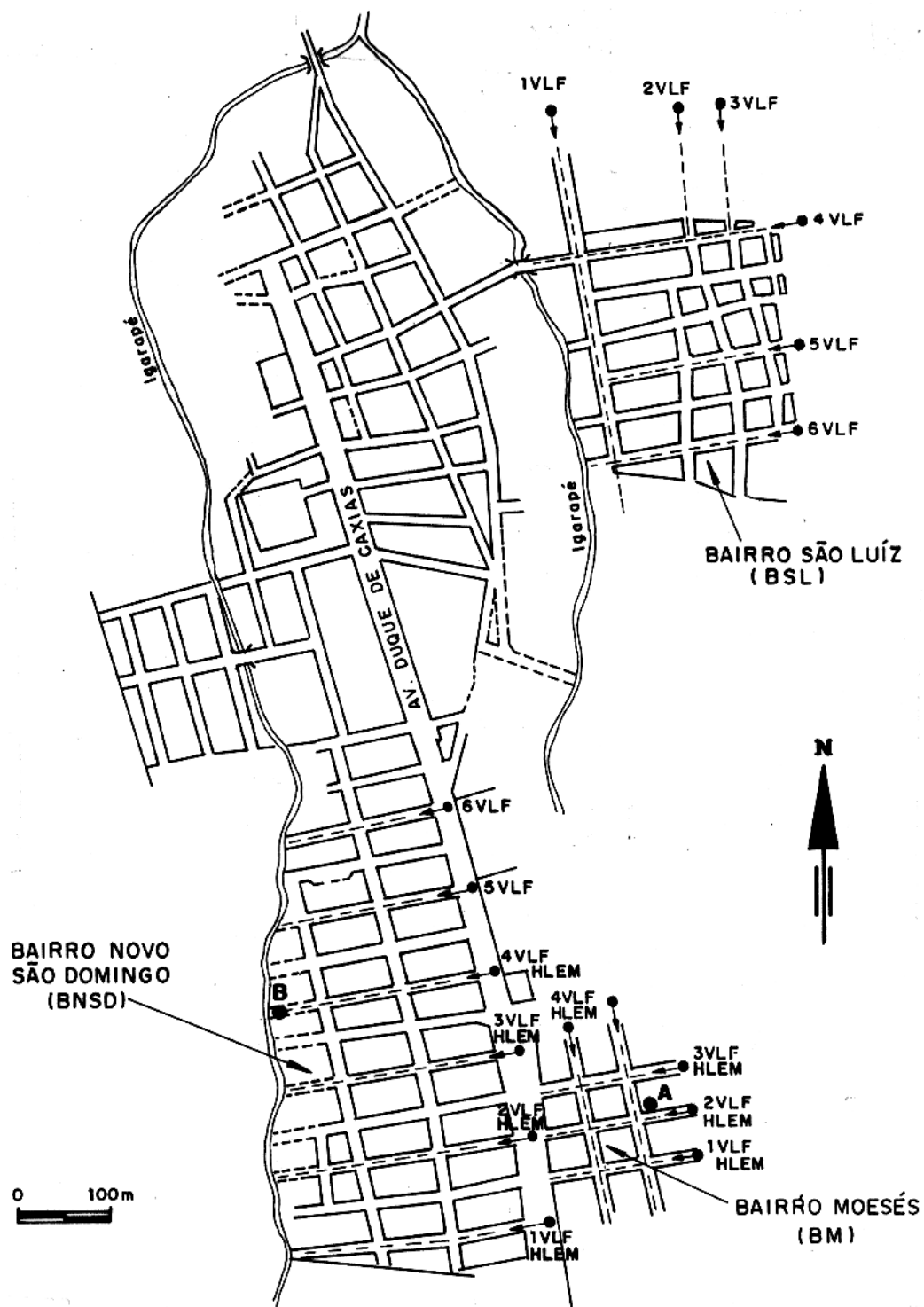


Figura 5.1 - Mapa da cidade, com as demarcações dos locais de realização dos levantamentos

Durante a aquisição dos dados, foram observados e registrados na caderneta de campo, além dos afloramentos geológicos, a localização, em relação à estação de medida, a presença de qualquer material condutivo, tais como: veículos, redes de alta e baixa tensão, cerca de arame farpado, etc. Estes materiais podem influenciar os valores medidos, conduzindo a uma interpretação errônea dos dados.

### 5.2.2 Levantamento com o Método HLEM

Na operação de campo com o método HLEM, foram realizados na sede municipal 9 perfís, num total de 2,375 quilômetros. O instrumento usado foi o APEX MAX MIN II, que pertence ao Departamento de Geofísica CG/UFPa, operando em três frequências 110, 440 e 3.750 Hz. A distância entre transmissor e receptor e o caminhamento, foram mantidos constantes e igual a 50 e 25 m, respectivamente. Para esta separação entre bobinas, as respostas foram consideradas satisfatórias, não se fazendo necessário, com isso, realizar medidas com uma maior abertura no espaçamento para superar o manto intempérico (PALACKY & KADEKARU, 1979).

Tomou-se o cuidado, antes de cada perfil, de aferir o equipamento para que as leituras fossem efetuadas com melhor precisão. Essa calibração era realizada sempre no mesmo local (ponto A na Figura 5.1). As mesmas observações registradas na caderneta de campo citadas para o método VLF, são também realizadas neste levantamento, só que as distâncias são tomadas em relação ao transmissor e/ou receptor.

### 5.2.3 Critérios Adotados na Seleção das Regiões de Realização dos Perfís

O fato de se ter que trabalhar dentro de limites urbanos e não se contar com informações estruturais detalhadas da área em estudo, haja vista que os dados geológicos locais apresentados no capítulo II, são resultados de observações em superfície, realizados nas etapas de campo, não nos deixou muitas opções para uma seleção criteriosa dos locais da realização dos perfís.

Como os perfís tinham que decorrer ao longo das ruas da cidade, o critério adotado, foi basicamente, locais onde haviam indícios da existência de feições estruturais e onde o ruído cultural não influenciasse significativamente nas medidas. Com base nisso, foram selecionados três regiões: o Bairro Novo São Domingos (BNSD), o Bairro São Luiz (BSL) e o Bairro Moisés (BM). Sendo os dois últimos de formação recente.

### 5.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Nesta seção obteremos, a partir dos dados de campo, informações geológicas-estruturais da cidade, através da análise qualitativa das medidas VLF e HLEM, e será feita uma tentativa de interpretação quantitativa da resposta VLF. É válido ressaltar que os resultados apresentados, são baseados em dados geofísicos, na geologia regional e informações superficiais sobre a geologia local. Uma análise mais completa seria obtida se houvesse furos estratigráficos, importantes para aferir os dados interpretados, principalmente no que se refere a interpretação quantitativa.

#### 5.3.1 Interpretação Qualitativa

Tendo em vista o objetivo de localizar feições estruturais como falhas e fraturas para a alocação de poços de captação de água, foram considerados como dados disponíveis, os perfís VLF e HLEM em cada região (BNSD, BSL e BM), informações da geologia regional, o mapa geológico da Figura 2.3, lembrando que este mapa foi traçado a partir de descrições superficiais, e observações adicionais de campo. São apresentados a seguir as interpretações de cada região.

##### 5.3.1.1 Região BNSD

O mapa estrutural da cidade ( Figura 2.3), revela que nesta região tem-se demarcado o contato, de forma discordante, entre a Faixa Araguaia, representado pela Formação Pequizeiro, e a Bacia do Parnaíba, representada pela unidade Itapecuru. Ao final da rua José Mota, este contato se apresenta aflorante (ponto B na Figura 5.1), cuja direção é aproximadamente N-S. A partir dessa informação, os perfís foram tomados na direção perpendicular a esta (E-W), com o início se dando a leste do contato ( Figura 5.1). As curvas resultantes dos perfís VLF são mostradas na Figura 5.2.

Desses dados brutos foram identificados três anomalias, demarcadas pelas linhas R, C e CA na Figura 5.2. Aplicando o algoritmo desenvolvido por FRASER (1969), os corpos causadores da anomalia são contornados, conforme mostra a Figura 5.3. As anomalias R são possivelmente devido ao ruído cultural, haja vista que no início de cada perfil, na Av. Duque de Caxias, se fazia presente redes de alta e baixa tensão e um posto de combustível. Portanto, essas anomalias não são confiáveis para se correlacionar com feições estruturais, pois seria passível de grande erro.

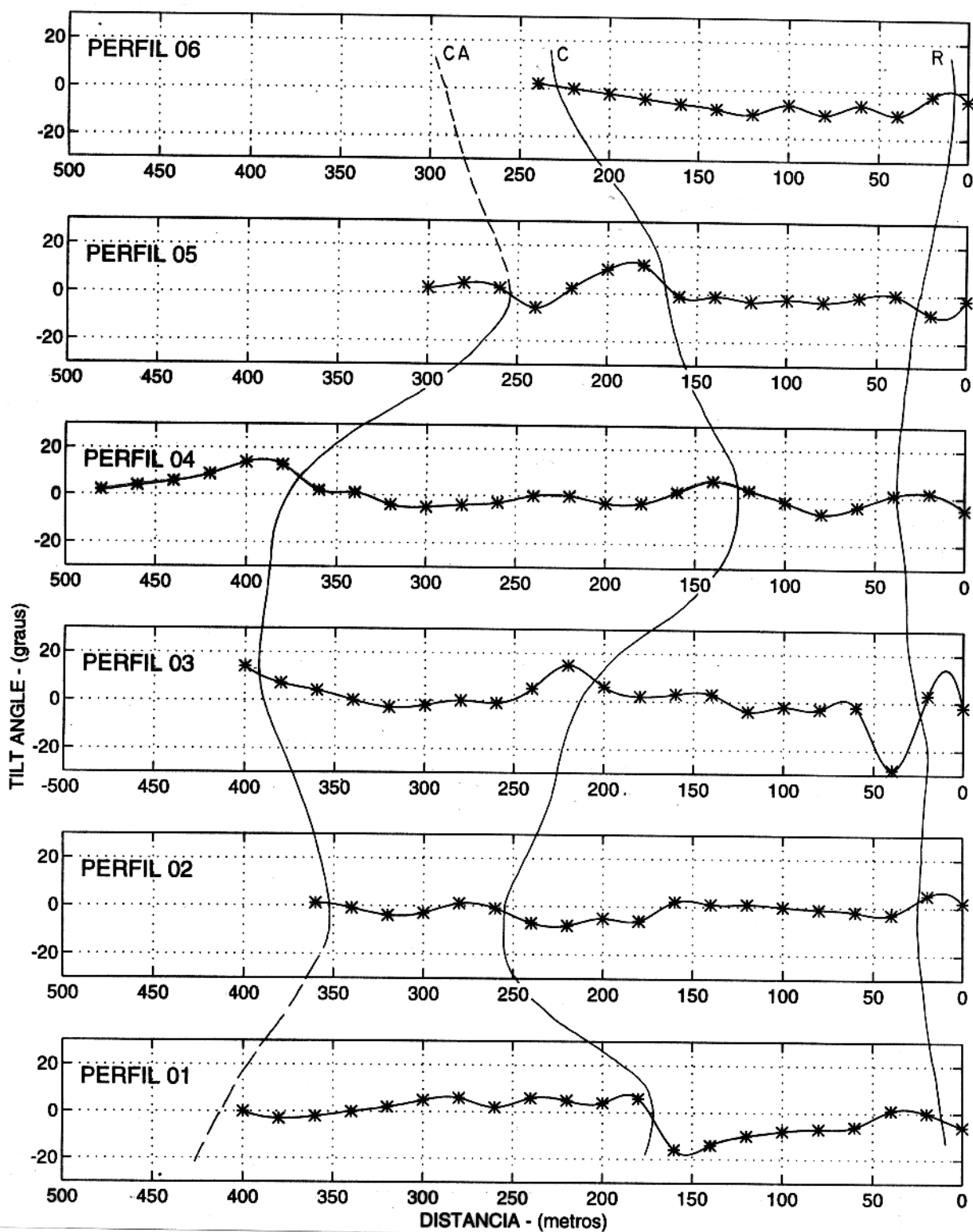


Figura 5.2 - Perfís VLF na região BNSD

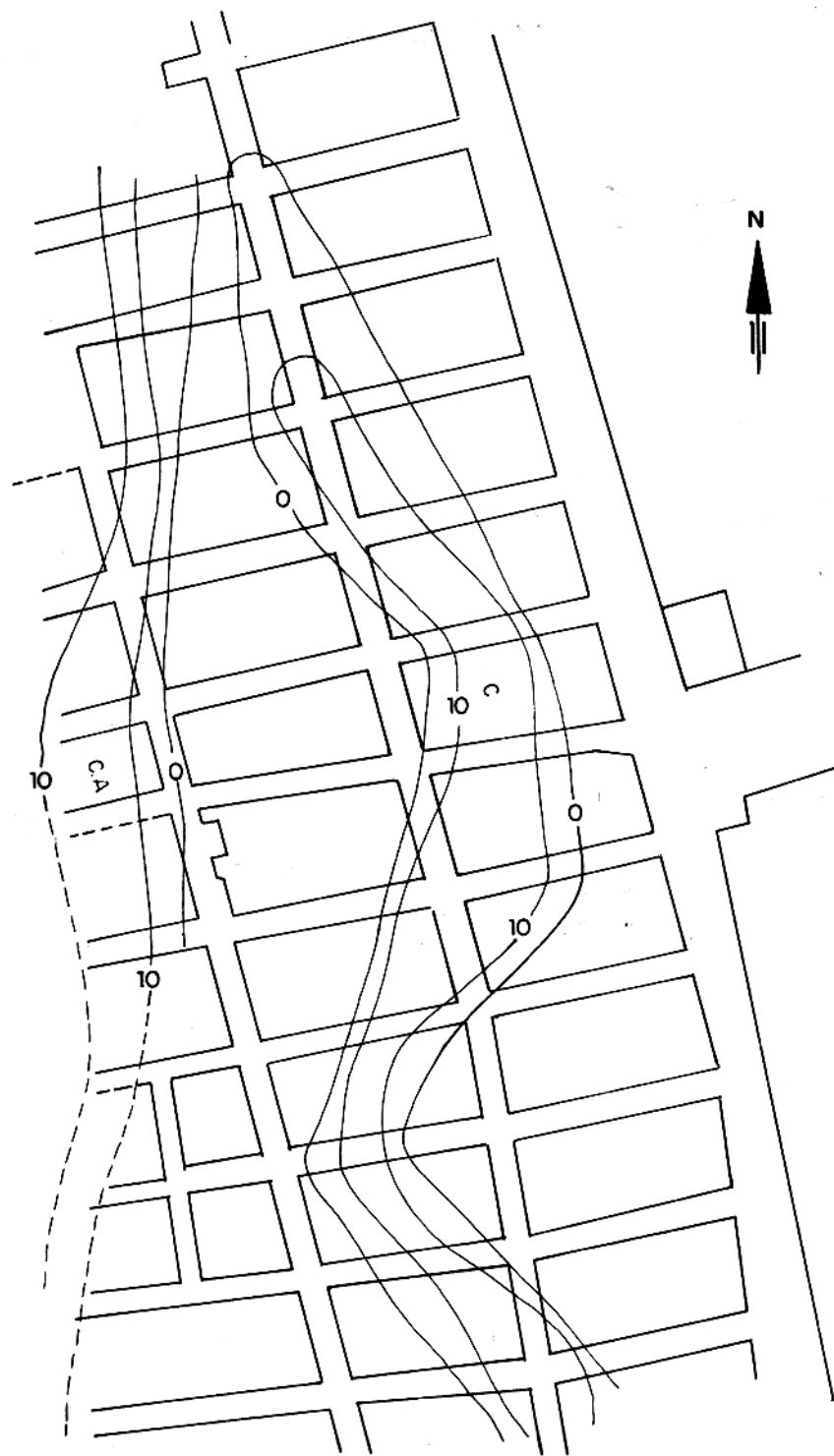


Figura 5.3 - Mapa de contorno após aplicação do filtro Fraser nos dados VLF da região BNSD na Figura 5.2.

As anomalias denominada CA (Figura 5.3) estão relacionadas ao contato aflorante no ponto já citado. Uma observação a ser feita, é que só foi possível atingir o contato nos perfís 02, 03, 04 e 05, pois se supõe que se alcançaria esta interface no prolongamento dos outros perfís, isto não foi possível por motivos operacionais.

Não haviam informações e nem observações de campo sobre a geologia para correlacionarmos as anomalias C (Figura 5.3) com alguma feição estrutural. A primeira hipótese que surgiu na interpretação correlaciona essas alterações às foliações da rocha cristalina (clorita xisto), haja vista que os perfís são perpendiculares a direção das mesmas. Porém, analisando os perfís 03, 04 e 05, percebe-se que estas anomalias são de forma semelhante aquela gerada por um contato, com direção de caminhamento indo de um material menos resistivo, nesse caso seria um material sedimentar, para um mais resistivo, no caso cristalino, como é mostrado na Figura 4.1 do capítulo anterior. Com essa interpretação e considerando as anomalias CA, é provável que tenhamos um contato com mergulho suave, a partir do ponto aflorante até o ponto de ocorrência da anomalia C, onde o mergulho torna-se mais acentuado.

Nas medidas HLEM levantadas em quatro linhas dessa região ( Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6), somente as anomalias C foram investigadas, com exceção do perfil 04. Porém, nessa linha apenas na frequência 3.520 Hz observa-se a anomalia CA, o que corrobora a hipótese dos contatos levantada na interpretação VLF.

Analisando a componente em-fase dos perfís HLEM, observamos que as curvas se apresentam simétricas, o que implicaria em um contato vertical. Porém, na componente em-quadratura não ocorre simetria, logo a interface é inclinada e com mergulho para a direção E (SILVA & GALVÃO, 1991).

É importante observar que as componentes em-fase, em todas as frequências, são de valores positivos muito elevado. Uma explicação para isso, são os fatos da rocha clorita xisto, presente na região, produzir, a partir de sua alteração, um material argiloso e também possuir em grande quantidade  $Cl^-$ , que em contato com água, torna esta salobra, esses materiais são de baixa resistividade ( $\rho < 10 \Omega.m$ ). Então, possivelmente o contato se faz entre o clorita xisto e um material com predominância argilosa e/ou com água salobra, gerando um alto contraste de resistividade, justificando, dessa forma, os alto valores obtidos nas curvas em-fase.

O mapa geológico do local (Figura 2.3), mostra que o contato detectado é uma falha normal que pela geologia regional, teve sua genese relacionada à evolução da Borda Oeste da Bacia do Parnaíba. Infelizmente, não foi realizado perfís para verificar a existência de possíveis falhas de transferência, que estão geneticamente vinculadas ao evento de abertura do oceano atlântico equatorial (COSTA et al., 1991; BORGES et al., 1994).

Os resultados obtidos, a partir dos dados eletromagnéticos nesta região, mostram que esta região não é propícia para a locação de poços, pois corre-se o risco de se encontrar água salobra. Esta suposição é reforçada por informações verbais de moradores da parte norte desta região, que perfuraram poços em suas casas e a água captada era salobra.

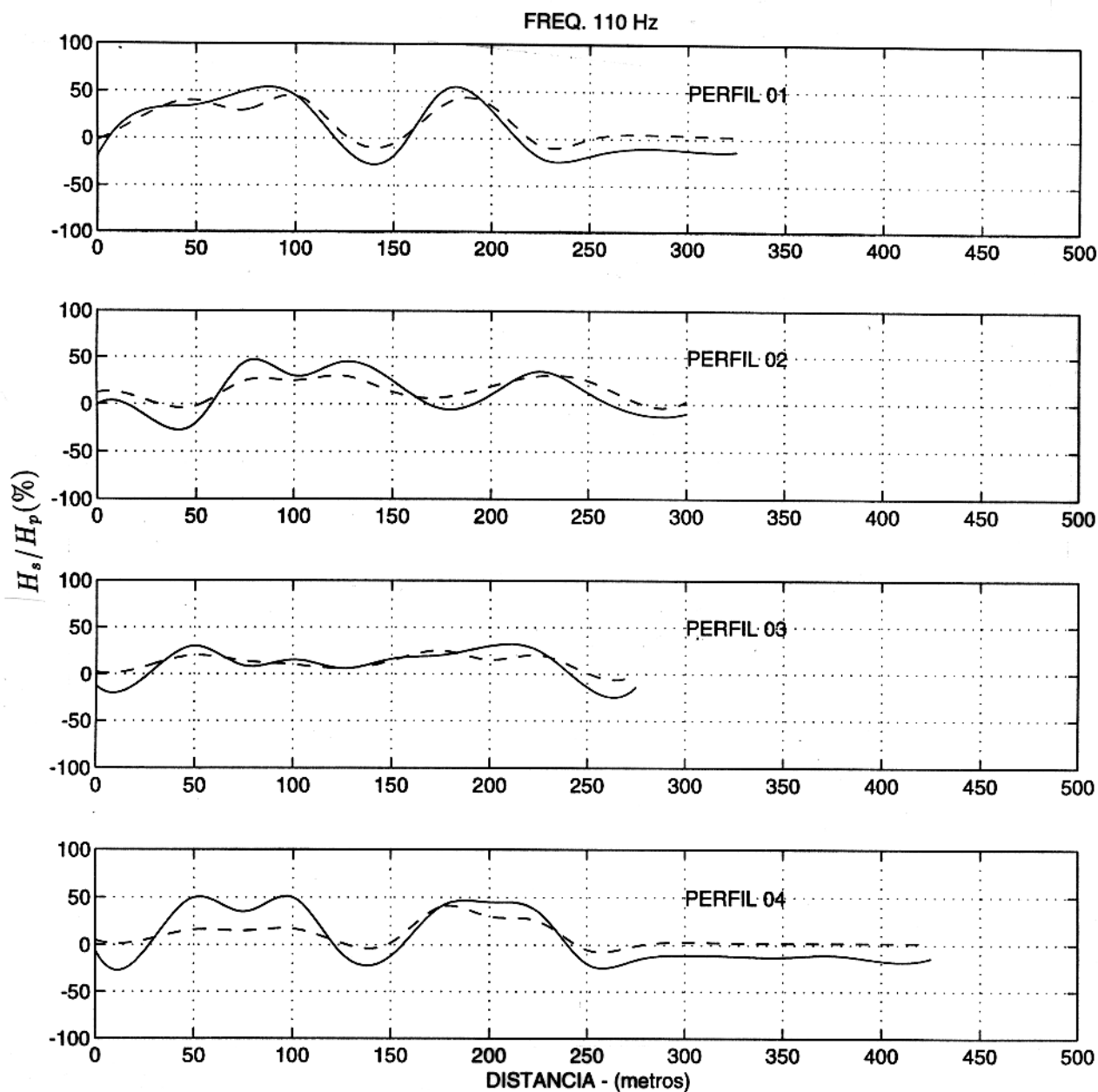


Figura 5.4 - Perfís HLEM na frequência 110 Hz realizados na região BNSD; em-fase —, Quad. - - - -

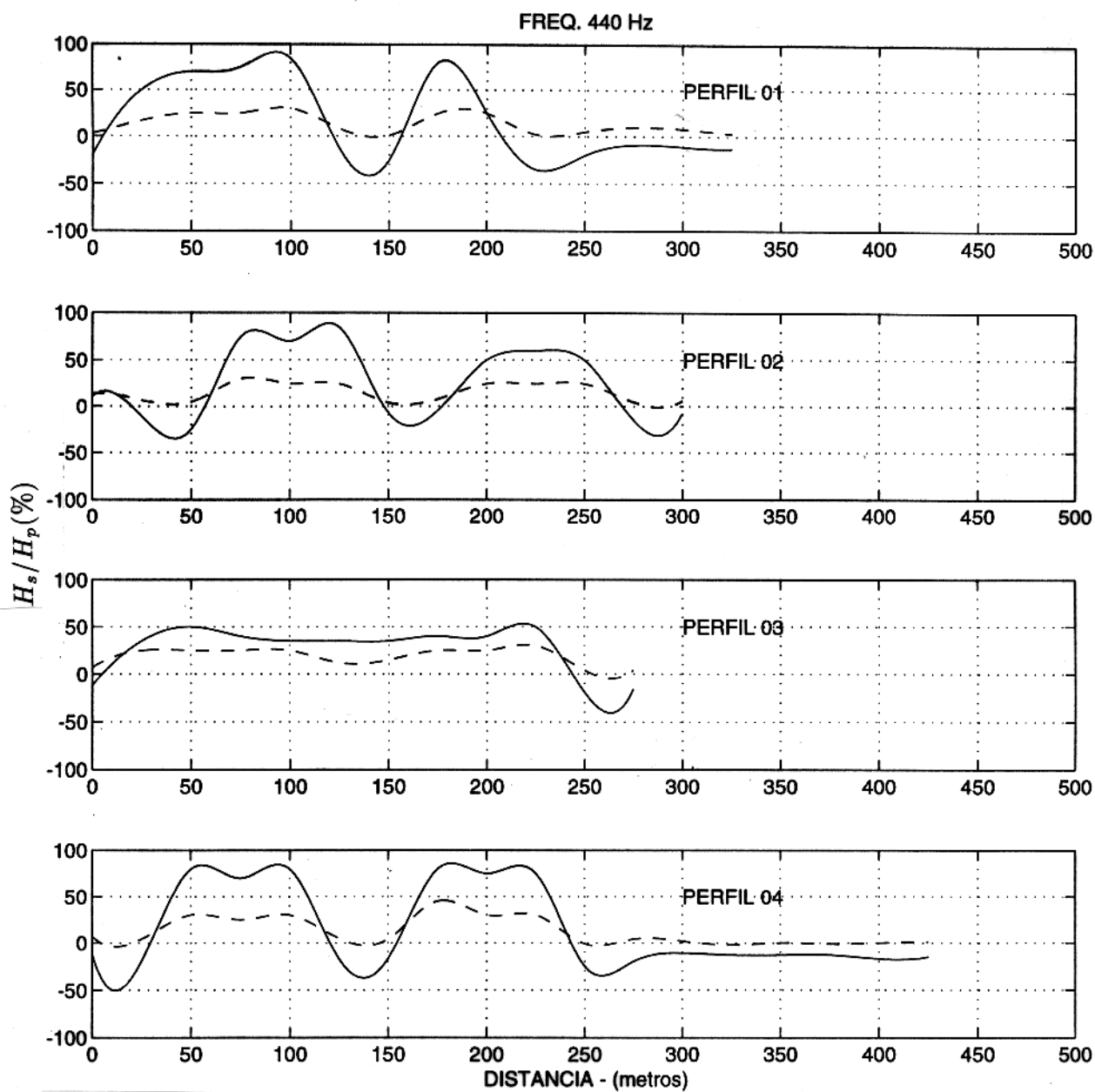


Figura 5.5 - Perfís HLEM na frequência 440 Hz realizados na região BNSD;  
em-fase —, Quad. - - - -

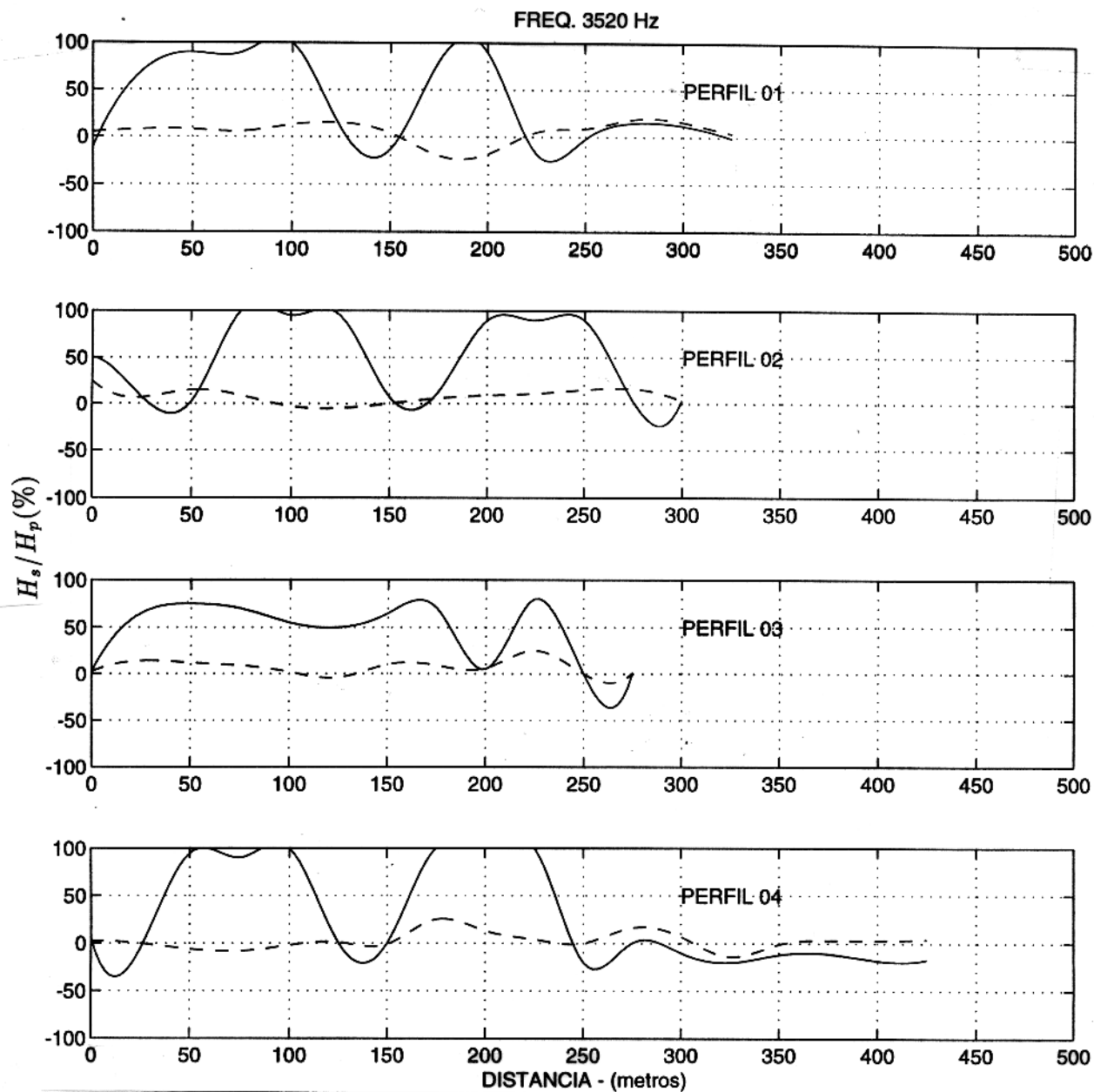


Figura 5.6 - Perfís HLEM na frequência 3520 Hz realizados na região BNSD;  
em-fase —, Quad. - - - -

### 5.3.1.2 Região BSL

É observada a existência de uma falha normal de direção N-S e de possíveis falhas de transcorrência, com "strike" NE-SW, nas imediações do bairro São Luiz, conforme mapa geológico ( Figura 2.3). Com base nesses dados, os perfís foram realizados nas direções E-W, para tentarmos detectar algumas falhas normais possivelmente presentes, haja vista que o mapa foi construído a partir de descrições superficiais, e N-S para a identificação das prováveis falhas de transferência, embora a ideal fosse NW-SE, o que não foi possível por motivos operacionais.

Dos dados brutos VLF ( Figura 5.7), somente foi possível distinguir anomalias com clareza nos perfís 01 e 02, as demais curvas se apresentam ruidosas. Como consequência, não conseguimos fazer uma relação entre essas linhas para a identificação imediata de feições estruturais, por ventura existentes.

Pelas observações de campo, existe uma variação do material que compõe a superfície dessa região, com presença de uma crosta laterítica. Havia também areias seca e úmida, em intercalações. Logo, este sinal ruidoso é consequência da variação lateral de resistividade na superfície (ver item 4.2.2), ou seja, efeito do ruído geológico.

A partir da aplicação do filtro Fraser (FRASER, 1969), foi possível identificar quatro estruturas, denominadas FT1, FT2 e FN1 e FN2, como ilustrado no mapa de contornos da Figura 5.8. E subsidiados por dados de geologia regional (item 2.4), podemos caracterizar as duas primeiras feições, como falhas de transferência, devido suas direção NE-SW, e a estrutura de "trend" aproximadamente N-S, como falhas normais. Dos perfís 01 e 02, onde as curvas de anomalia se apresentam simétrica, inferindo que as falhas FT1 e FT2 possuem mergulho de 90°.

Estes resultados obtidos são satisfatórios e bastante coerentes com a geologia da região.

Segundo PALACKY et al. (1981), aquíferos de alta produção, são geralmente associados com o cruzamento de dois lineamentos. Sendo assim, na região em questão, é mais aconselhado local poços para captação de água subterrânea nos locais demarcados na Figura 5.8.

### 5.3.1.3 Região BM

Este bairro é adjacente ao bairro Novo São Domingos, a leste. Novamente, as linhas de investigações foram tomadas nas direções N-S e E-W, para identificarmos possíveis feições descritas na geologia regional (item 2.4).

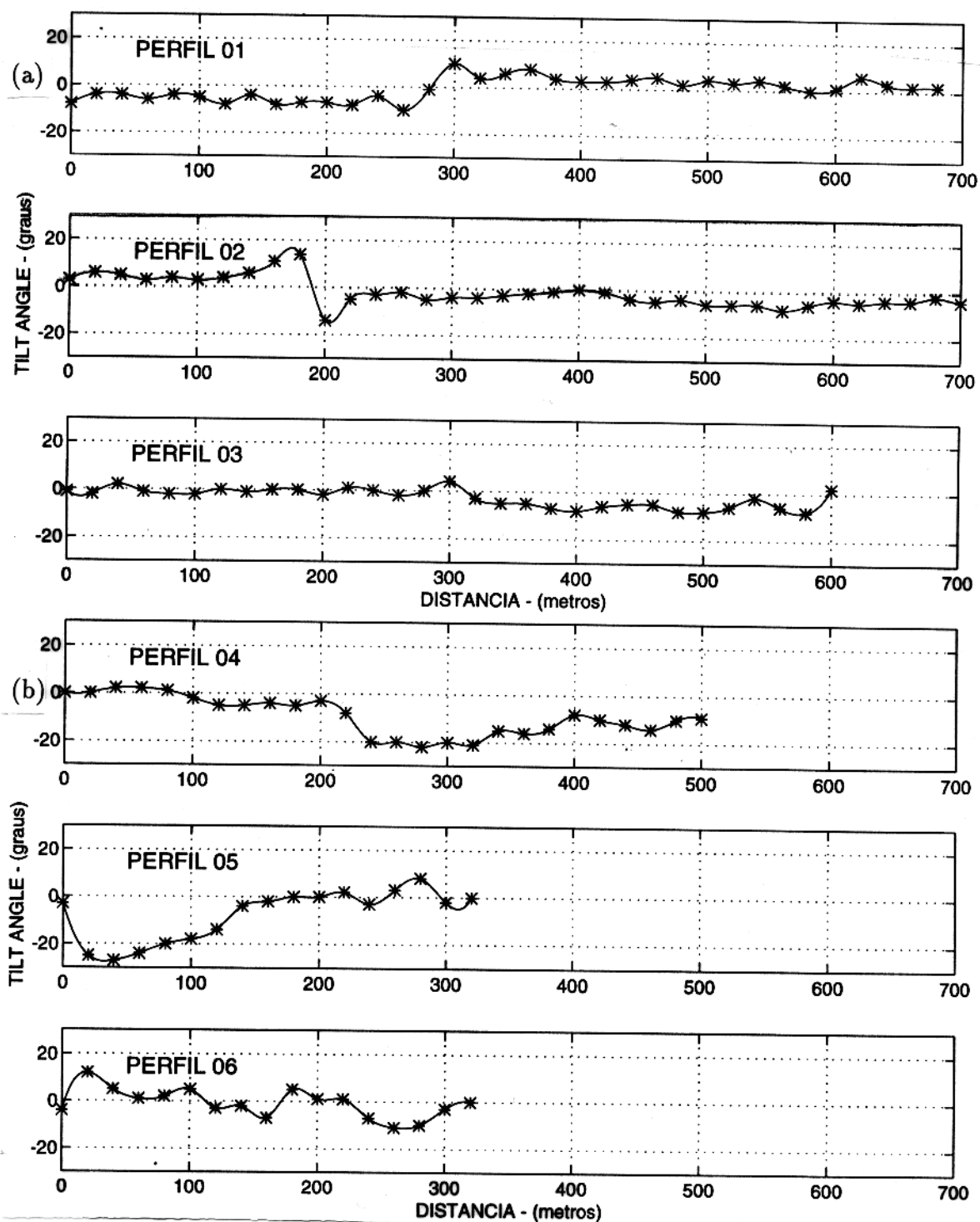


Figura 5.7 - Perfís VLF realizados na área BSL, nas direções: a) N-S e b) E-W

Os dados brutos obtidos pelo método VLF, se apresentam muito oscilantes e de amplitudes baixas, conforme mostra a Figura 5.9, não sendo possível uma correlação imediata destes perfís para a identificação de estruturas geológicas. Com a aplicação do filtro Fraser, uma estrutura de direção NE-SW foi contornada, que "a priori" pode ser correlacionada com falhas de transferências. Devido aos baixos valores de picos obtidos nas curvas, pode-se traçar apenas linhas de contorno de valor máximo 5, como mostra a Figura 5.10.

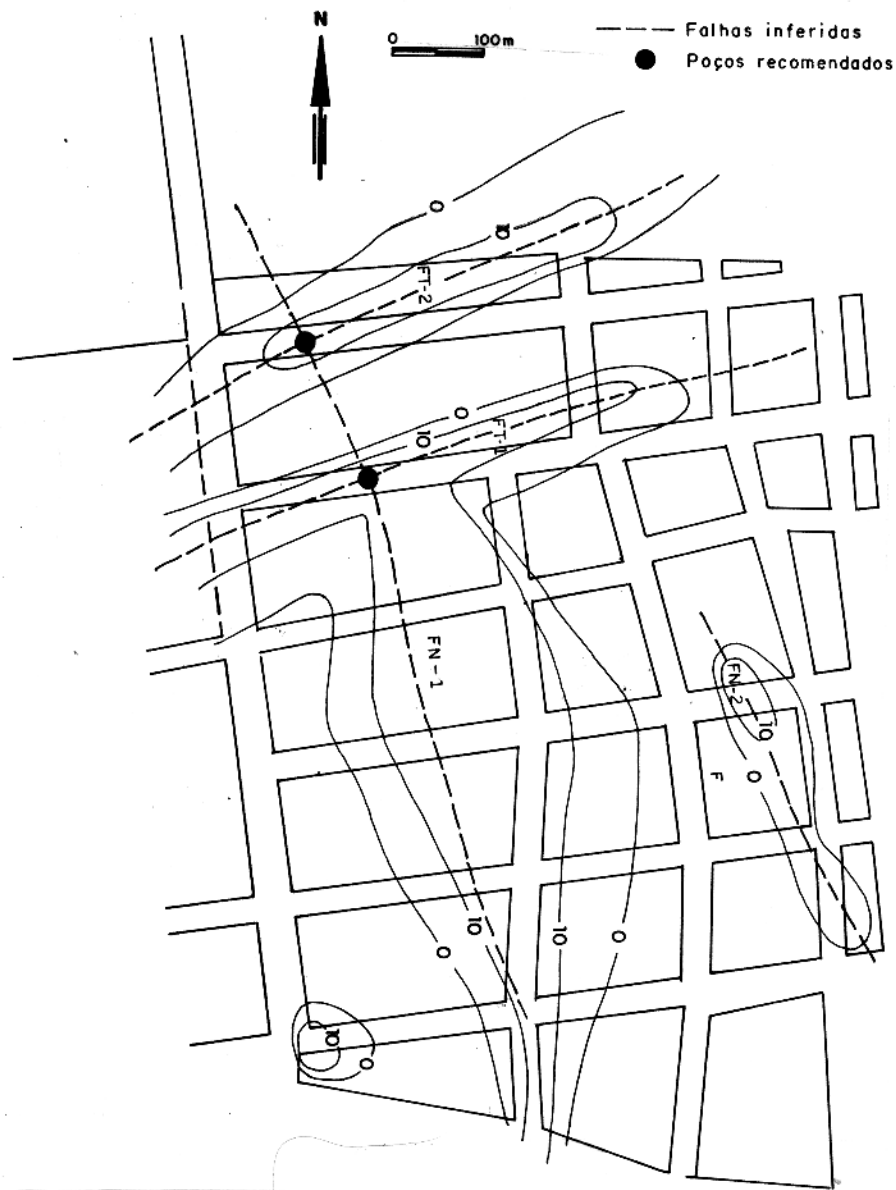


Figura 5.8 - Mapa de contorno após a aplicação do filtro Fraser nos dados VLF da região BSL na Figura 5.7, com falhas inferidas e locais recomendados para a perfuração de poços

A aplicação do método HLEM, através do qual obteve-se anomalias apenas na frequência mais alta ( $f=3.750$  Hz), ficando as curvas nas frequências mais baixas comportadas ( Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13), e informações de dados de SEVs realizadas nesta região (SILVA, 1996), indicam que a espessura do manto de alteração atinge 98 m, o que nos levou a atribuir esses sinais detectados à ruídos geológicos, ou seja, sinais gerados pela variação lateral, na superfície, da resistividade da camada intemperizada.

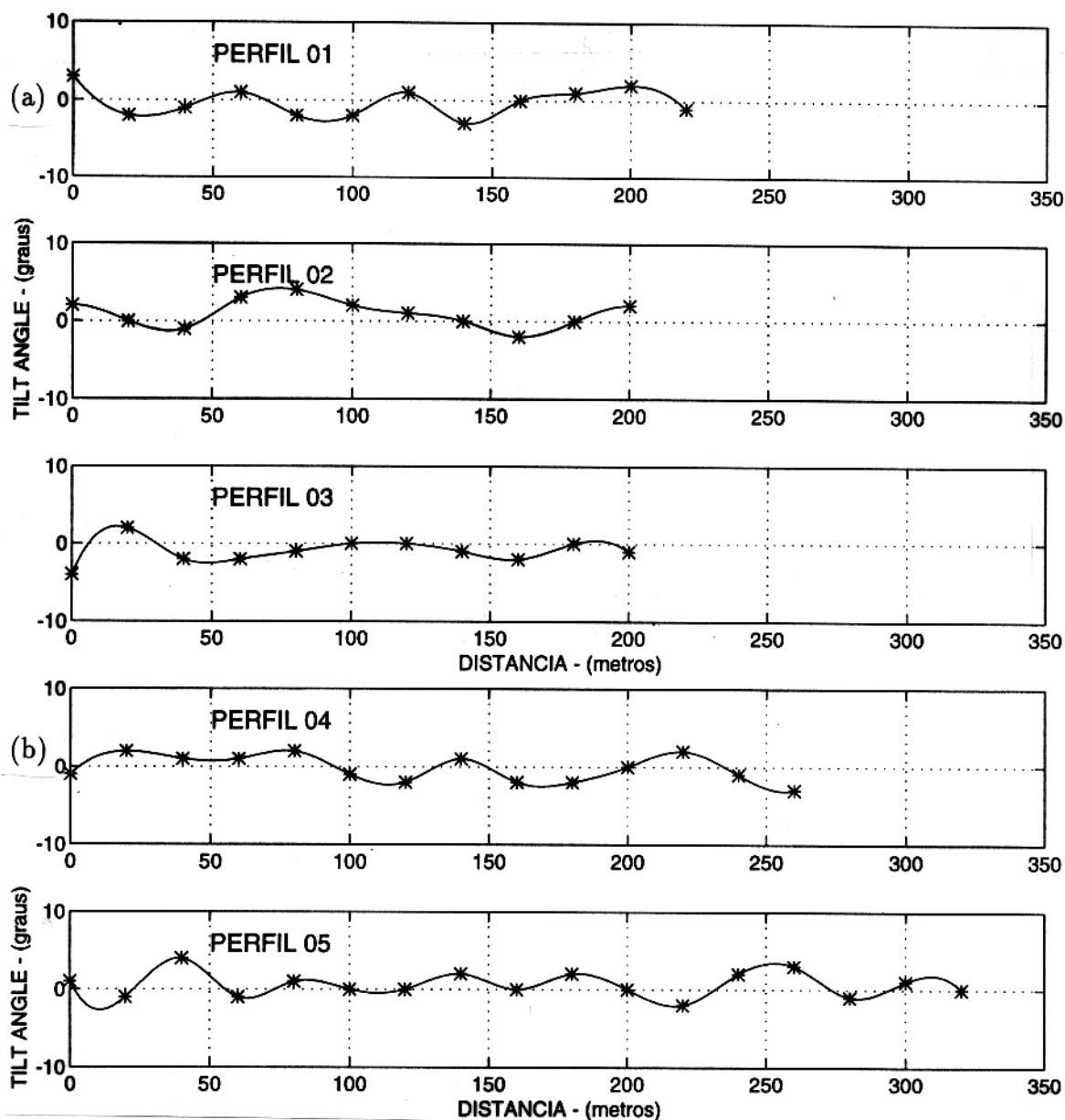


Figura 5.9 - Perfís VLF realizados na área BM, nas direções: a) E-W e B) N-S

Um ponto importante que deve ser observado, é que nesta área, assim como na região BNSD, ocorreu um deslocamento em relação a base (0%) nas curvas HLEM, notada principalmente na frequência mais alta (3520 Hz). Este fato não era esperado, pois a calibração do equipamento foi realizada nesta região, onde a cobertura se faz presente (SILVA & VERMA, 1986; SILVA & GALVÃO, 1991).

Segundo BOSE & SINGH (1975), quando a componente em quadratura de um perfil eletromagnético se mantém um patamar positivo, implica em indício da presença de água potável.

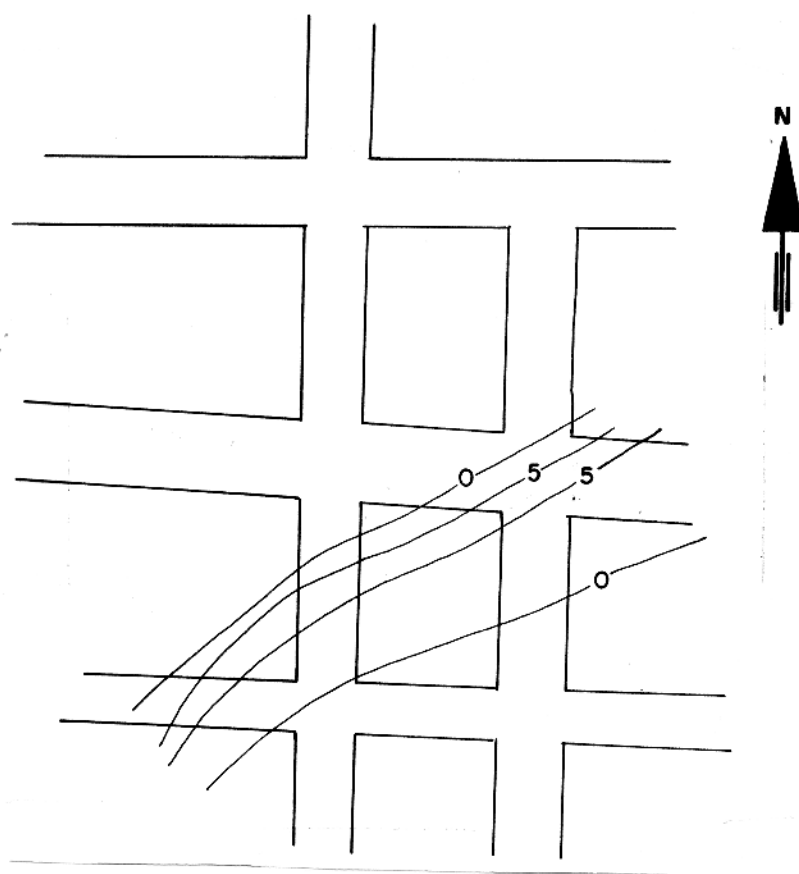


Figura 5.10 - Mapa de contorno após aplicação do filtro Fraser nos dados VLF da região BM na Figura 5.9

Considerando o perfil geológico descrito no item 2.5, onde é mostrado um horizonte arenoso promissor de armazenamento de água nesta região, a espessura da camada intemperizada

em torno de 98 m (SILVA, 1996) e os indícios de água potável obtidos pelo método HLEM, então podemos ter esta região como uma boa opção para locar um poço de captação de água subterrânea para o abastecimento da população da cidade.

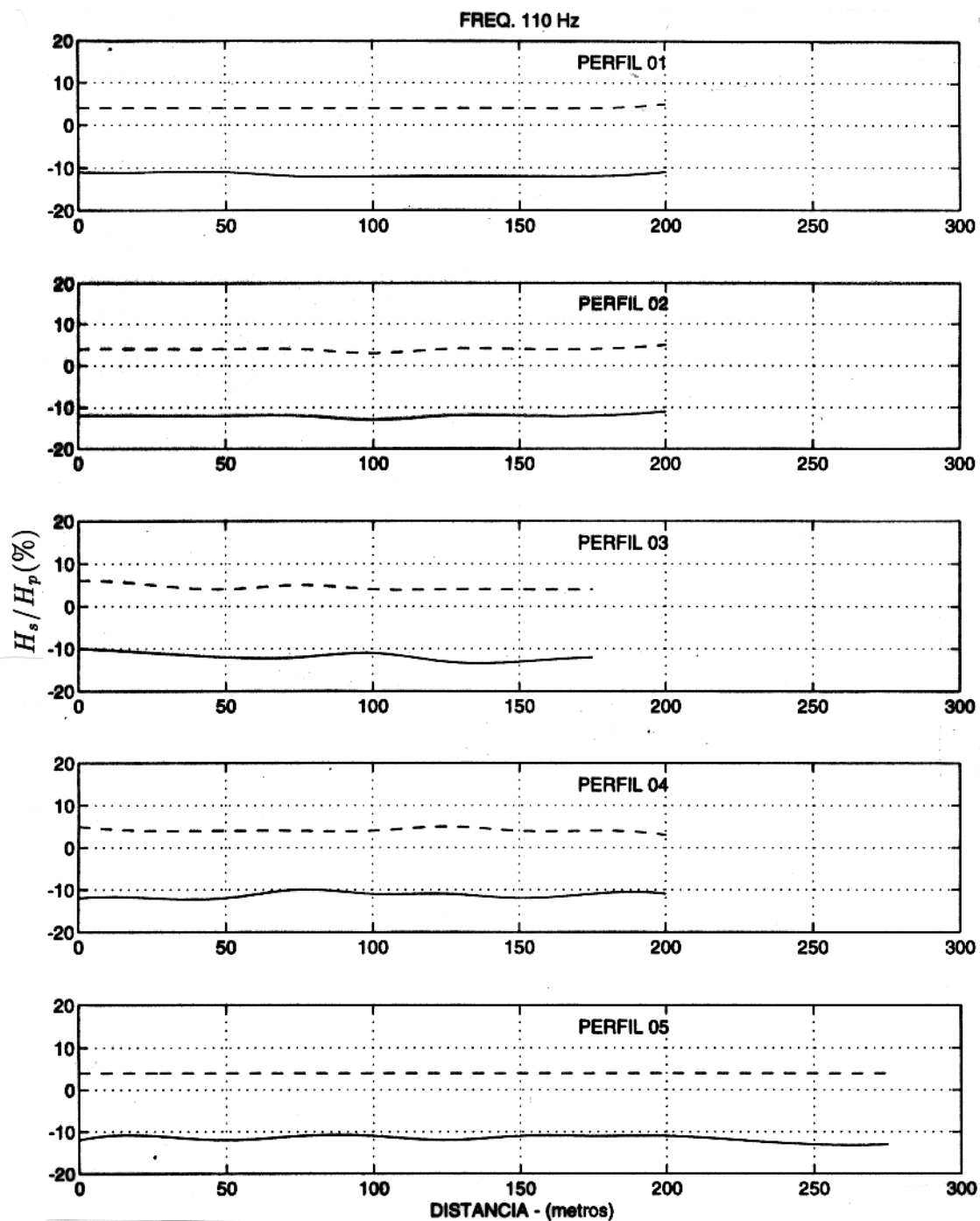


Figura 5.11 - Perfís HLEM realizados na região BM; em-fase —, Quad. - - - -

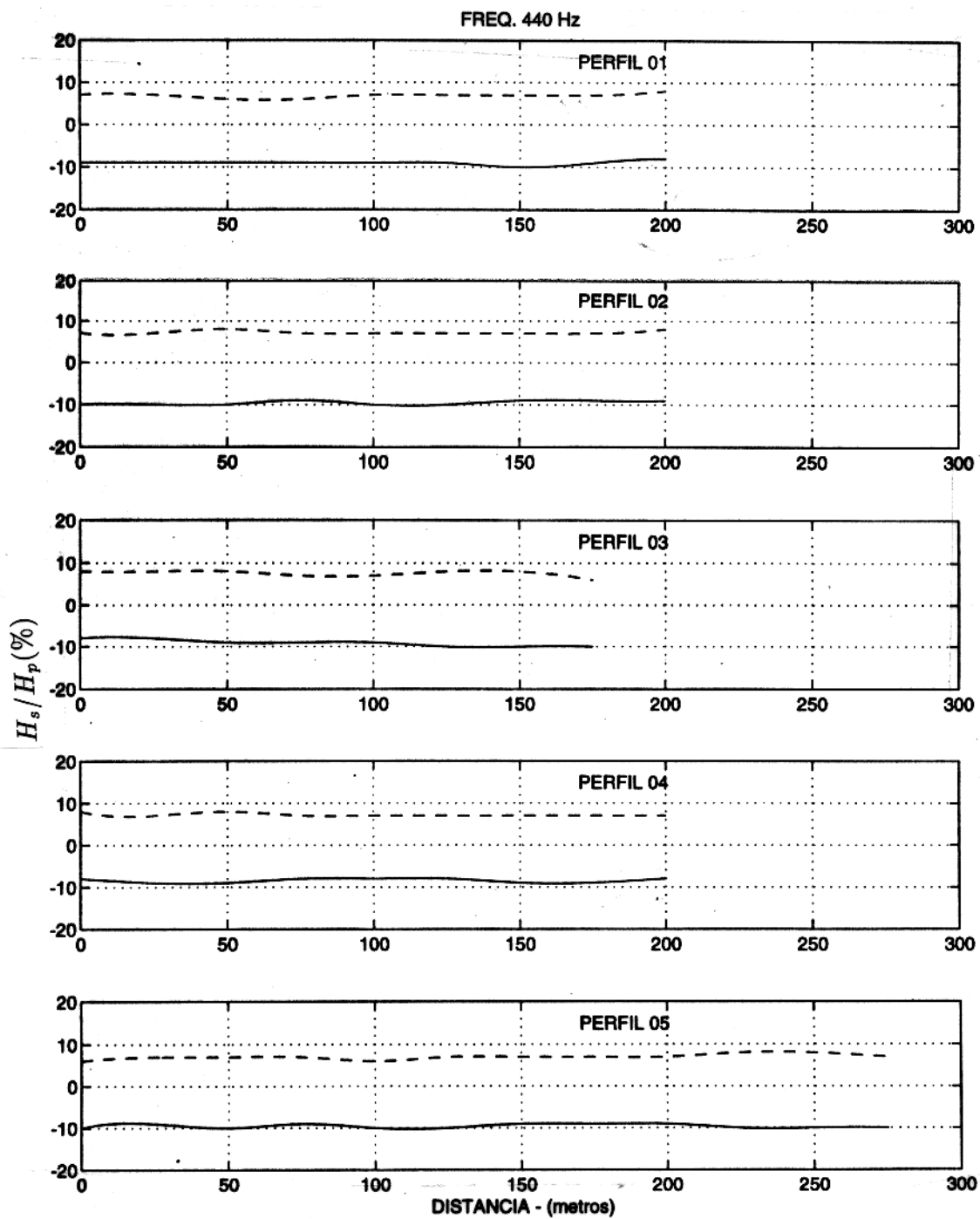


Figura 5.12 - Perfis HLEM realizados na região BM; em-fase —, Quad. - - - -

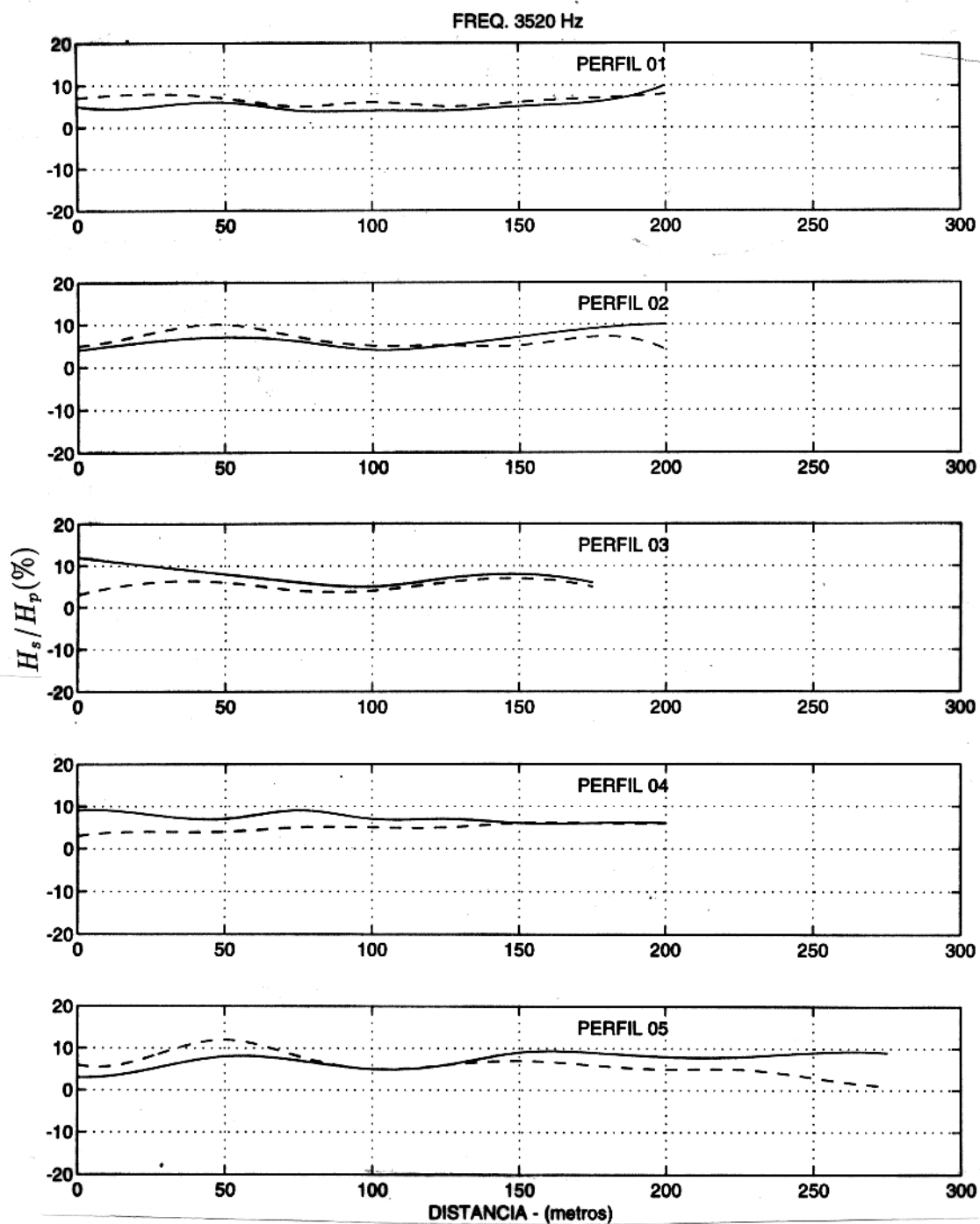


Figura 5.13 - Perfis HLEM realizados na região BM; em-fase —, Quad. - - - -

### 5.3.2 Interpretação Quantitativa de Dados VLF

Existem na literatura diagramas para auxiliar na interpretação quantitativa do método VLF (OLSSON, 1980; SAYDAM, 1981; PODDAR, 1982). Porém, estes ábacos não consideram alguns parâmetros que influenciam na anomalia do método, como a presença do manto de intemperismo, ou são considerados corpos perfeitamente condutivos, o que não representa situações geológica reais. Como consequência, os valores obtidos desses diagramas são normalmente superestimados, conduzindo a erros interpretativos acentuados, o que foi por nos constatado a partir dos modelagem apresentada no capítulo anterior.

Tomemos como exemplo, os diagramas desenvolvidos por OLSSON (1980), onde se tem o "plot" do valor médio da amplitude da anomalia  $(A_{R-} + A_{R+})/2$ , em por cento da tangente do "tilt angle", versus a distância do pico positivo até o "crossover"  $X_R + X_{R-}$  ( Figura 5.14a), com a linha contínua conectando pontos de mesma espessura, enquanto a linha tracejada liga pontos de mesma resistividade da camada intemperizada. Considerando a simulação de um corpo vertical ( Figura 4.5a), adaptando a curva de inclinação deste modelo ao adotado pelo citado autor, tem-se para  $(A_{R-} + A_{R+})/2$  e  $X_R + X_{R-}$  os valores 39 e 25, respectivamente. Colocando esses valores no diagrama da  $\text{feff}10b$ , obteremos 275  $\Omega.m$  para a resistividade e 13 m para a espessura do manto de intemperismo, o que são valores superestimados em relação aos assumidos no modelo. A explicação para este erro, é que na construção dos diagramas, OLSSON considerou um semi-plano perfeitamente condutivo, não condizendo com a realidade.

Como a anomalia VLF é influenciada por vários fatores que determinam o modelo, não adotaremos e nem construiremos nenhum tipo de diagrama, pois estes requerem, geralmente, a omisão de algum dos parâmetros que afetam a resposta, sendo usado somente o ajuste das curvas de campo com a teórica por tentativa e erro. O procedimento adotado para a interpretação quantitativa, é como segue:

1. a partir das características da curva obtida no campo, idealizaremos um modelo e atribuiremos valores para os parâmetros que definem este modelo, tais como: resistividade e espessura do manto de intemperismo, resistividade da rocha encaixante e dimensões e resistividade do corpo condutor.
2. Com o auxílio do programa EGSLIB/VLF2D (RIJO, 1994), apresentado no capítulo anterior, simularemos os efeitos que o modelo idealizado provoca e estes serão comparados com a curva medida no campo.
3. Quando ajuste se mostrar satisfatório, os valores numéricos, atribuídos aos parâmetros

do modelo, serão tomados como prováveis valores dos parâmetros da feição em subsuperfície, que produziu os efeitos de campo.

Este procedimento interpretativo é conhecido como método direto (LUIZ & SILVA, 1995), e segundo PODDAR (1982) é o mais satisfatório método de interpretação.

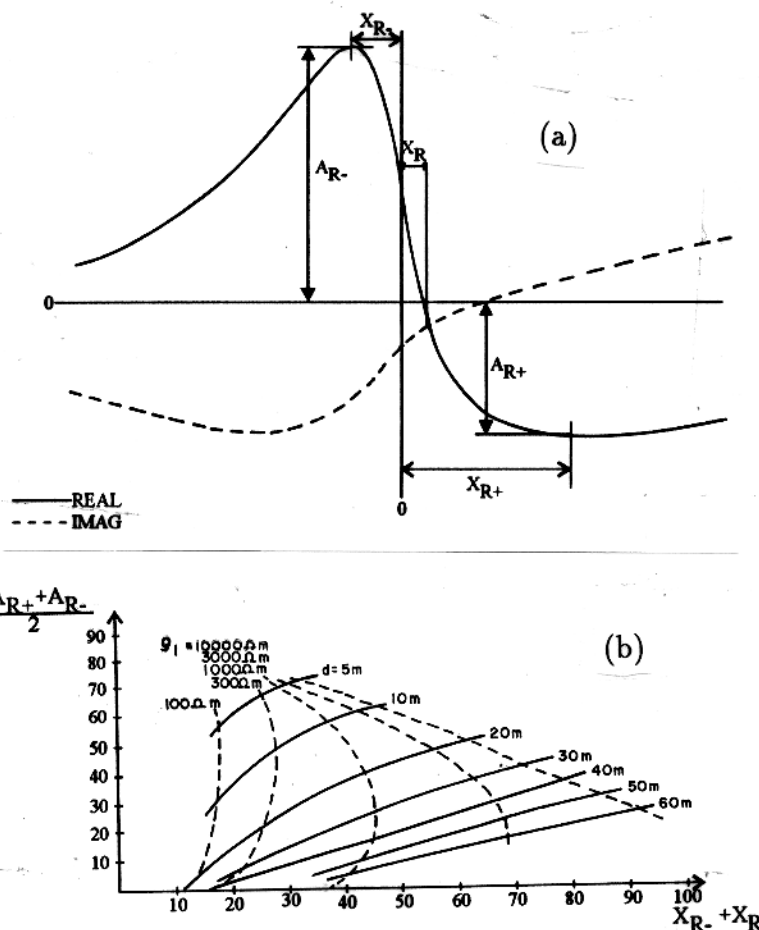


Figura 5.14 - a) Parâmetros usados para determinar a profundidade do topo do condutor; b) Diagrama para corpos verticais (após OLSSON,1980)

Foram selecionados duas linhas de investigação para esta análise. O perfil 01 da região BSL, onde a curva de inclinação apresenta uma anomalia nítida e simétrica com valores de pico variando de  $\pm 10^\circ$ , implicando em uma feição disposta verticalmente. O melhor ajuste, depois de 31 tentativas, é mostrado com as propriedades do modelo idealizado, na Figura 5.15.

SILVA (1996), através de dados de SEV, encontrou para esta região uma profundidade de aproximadamente 54 m para o topo do embasamento, e em nosso resultado obtivemos 14 m. O motivo de tamanha diferença é que o citado autor provavelmente interpretou a zona de

transição como uma simples camada, haja vista a existência de descontinuidades nesta área.

Segundo SOUZA & RIJO (1995), a resistividade de uma falha preenchida com água potável varia de 20 a 200  $\Omega.m$ . Considerando esta afirmativa, podemos concluir que a estrutura interpretada possivelmente contém água própria ao consumo da população.

O segundo perfil escolhido para a interpretação é o de número 03 da região BNSD. Qualitativamente foi identificado para esta área dois contatos, um mais superficial, mergulhando suavemente até alcançar o outro de maior declividade. Após 50 tentativas, o modelo teórico que apresentou um melhor casamento com os dados de campo, é mostrado, com suas propriedades físicas, na Figura 5.16.

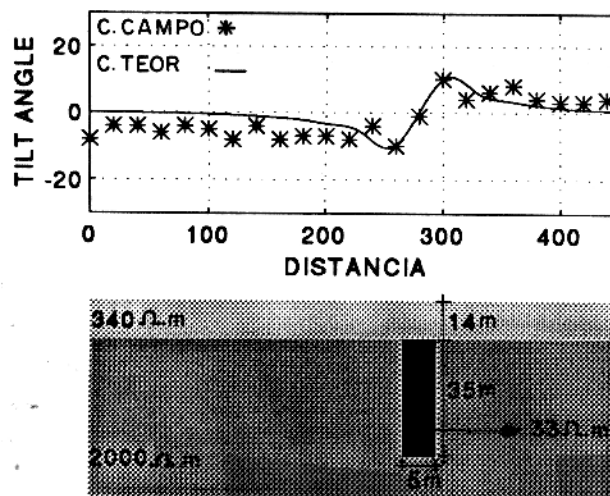


Figura 5.15 - Modelo de melhor ajuste do perfil 01 da região BSL, com os valores dos parâmetros físicos

Estes resultados reforçam a suposição levantada no item anterior para esta região, principalmente no referente a presença de argila e/ou água salgada, haja vista a resistividade de 3  $\Omega.m$ , em contraste com a de 2000  $\Omega.m$ , no segundo contato. Logo, não é indicado a perfuração de um poço nessa região, a menos que a cobertura de alteração, chegando a atingir 18 m de espessura, seja promissora.

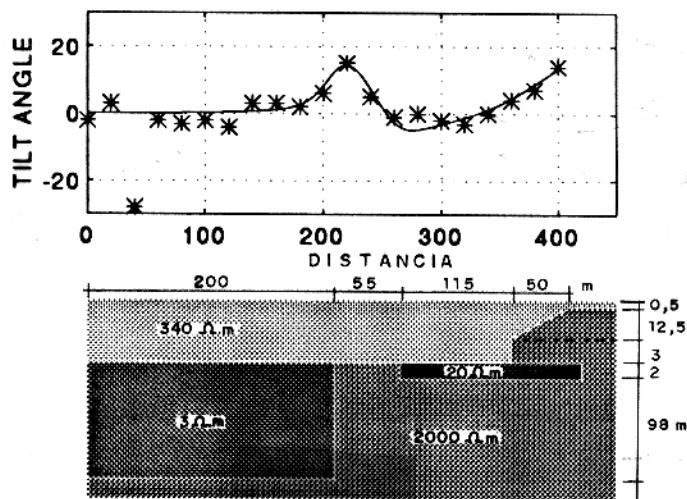


Figura 5.16 - Modelo de melhor ajuste do perfil 03 da região BNSD, com os valores dos parâmetros físicos

Com um algoritmo de inversão para dados eletromagnéticos VLF, os ajustes apresentados seriam de um melhor refinamento. Porém, os resultados obtidos nesta interpretação, não significam uma reprodução fiel da situação geológica de campo, haja vista que diferentes modelos, assim como diferentes valores para os parâmetros do mesmo modelo, podem gerar a mesma curva de anomalia. Com certeza, resultados mais seguros seriam alcançados se existissem dados de furos estratigráficos para aferir esta análise.

## 6 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Diante do fato que os reservatórios de água subterrânea em região cristalina são, em geral, condicionadas a existência de falhas e fraturas e o emprego de Sondagem Elétrica Vertical tem sua eficácia questionada nesse tipo de ambiente, foi utilizado o método eletromagnético VLF, e como apoio na interpretação qualitativa, aplicou-se em alguns locais a técnica HLEM, na prospecção hidrogeológica da cidade de São Domingos do Araguaia, Sudeste do Estado do Pará.

Um dos fatores atenuantes na aplicação dos métodos EM em países de clima tropical, é a presença de uma cobertura condutiva, normalmente, produto do intemperismo "in-situ". Para analisarmos os efeitos que esta camada, bem como de outro fatores, provocam na anomalia VLF, foram realizadas simulações numérica de situações geológicas direcionadas a prospecção de água subterrânea e possíveis de serem encontradas na área sob estudo.

Dos resultados obtidos dessa modelagem, verificamos que a resposta VLF, através das curvas de "tilt angle" e elipsidade, é influenciada por todos os parâmetros físicos que definem o modelo geológico, como:

- condutividade e espessura do corpo anômalo, provocando uma resposta mais forte quanto mais altos são esses valores;
- condutividade e espessura do manto de intemperismo, que com valores mais elevados provocam uma atenuação na curva "tilt angle" e uma ligeira amplificação na elipsidade; e
- a resistividade da rocha encaixante, que diminui a resposta de "tilt angle" para valores mais baixos.

Com relação as situações simuladas, fizemos as seguintes observações:

- a localização do contato nas curvas de resposta, está nas proximidades do primeiro ou do segundo ponto de inflexão, o que depende do sentido de caminhamento do perfil e não existe diferença na anomalia de interface vertical e inclinada;
- feições na posição vertical e horizontal possuem resposta de mesma forma. Porém,

quando inclinada, ocorre uma quebra de simetria das curvas, sendo possível a determinação da direção de mergulho;

- a resposta de uma depressão no embasamento preenchida com o mesmo material do manto de intemperismo, é mais acentuada quanto maior for a resistividade dessa camada;
- um soerguimento do embasamento, que pode representar uma zona de cisalhamento, possui uma fraca anomalia, que pode ser confundida com ruídos geológicos ou ser considerada como erro na leitura dos dados;
- em um embasamento irregular, não se pode determinar com precisão, através das curvas, os locais de depressão, onde o acúmulo de água é possível;
- na resposta de multicorpos, pode-se identificar o número de feições anômalas, quando o espaçamento entre essas for adequado, caso contrário a anomalia se torna ambígua.

Os dados de campo mostraram a existência de feições estruturais nas regiões da cidade de São Domingos do Araguaia onde foram coletados, a considerar BNSD, BSL e BM.

Na região BNSD, foi detectado um contato geológico que, em um ponto é visto aflorante, mergulha suavemente até um outro ponto onde o mergulho torna-se mais acentuado, com a existência de depressões neste perímetro. Pela análise quantitativa dos dados VLF, este aprofundamento alcança 18 m e a interface se faz entre o clorita xisto ( $\rho = 2000 \Omega.m$ ) com um material de resistividade de  $1 \Omega.m$ , que foi interpretado como argila e/ou água salobra.

Na área BSL, foram identificadas feições de direção N-S (FN1), NW-SE (FN2) e NE-SW (FT1 e FT2). Os perfis revelaram que as estruturas FT1 e FT2 são verticais ou possuem uma alta declividade. A interpretação quantitativa de uma linha de investigação, sugere que estas feições estejam a uma profundidade em torno de 15 m e preenchidas com um material de resistividade de  $33 \Omega.m$ , que está dentro da faixa de água potável (SOUZA & RIJO, 1995).

Na zona BM não foi constatada a existência de nenhuma feição estrutural, sendo as pequenas alterações nas curvas VLF e de frequência mais baixa do HLEM, atribuídas à ruído geológicos. Este resultado nos leva a concluir que nesta área o pacote sedimentar é bem espesso. Segundo SILVA (1996) essa espessura atinge 98 m e trata-se do início oeste da Bacia do Parnaíba.

Baseado na geologia regional e nos resultados anteriores, concluímos que o arranjo estrutural da cidade é composto por falhas normais de "trend" N-S e NW-SE, que são interceptadas por falhas de transferência de direção NE-SW.

Há possibilidades de se encontrar água potável nas falhas da região BSL. Na área BM, essa probabilidade fica condicionada a existência de um horizonte promissor. Na zona BNSD é provável que os aquíferos, se existirem, sejam salgados, excluídos aqueles da camada intemperizada.

Com este trabalho, verificamos que diferentes modelos, assim como diferentes valores dos parâmetros físicos que definem o modelo, podem gerar a mesma curva de anomalia VLF. Essas ambiguidades tornam a interpretação quantitativa cercada de imprecisões, o que impossibilita a definição de critérios meticulosos para o reconhecimento de falhas e fraturas com potencialidades hidrogeológicas. Para uma interpretação mais segura, é aconselhado a aplicação deste método em conjunto com outros, como o HLEM que foi o nosso caso.

Vale enfatizar que até o momento não existe nenhum poço perfurado no município em estudo. Por isso, faltou uma calibração mais precisa na interpretação dos dados geofísicos. Mesmo assim, acreditamos que as informações aqui contidas juntamente com os resultados de SILVA (1996), serão muito úteis para a FNS aumentar a possibilidade de sucesso na locação de poços na região. Naturalmente, após a perfuração dos primeiros poços, que certamente ocorrerá em breve, as nossas interpretações deverão ser revistas para a correção de possíveis incertezas nos resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, H.G.; MARINHO, P.A. da C.; MARTINS, R.C.-**Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Texto DNPM/CPRM. (no prelo)**
- BAKER, H.A. & MYERS, J.O. 1978. VLF-EM Model Studies and Simple Quantitative Applications to Field Results. **Geoexploration**, 17: 55-63.
- BORGES, M.S.; ALMEIDA, H.G.; ARAUJO, O.J.B. 1994. O Arcabouço Estrutural da Bacia do Parnaíba na Folha Marabá Programa Grande Carajás. In: CONG. BRAS. DE GEOL., 38, Camboriú, 1994. **Boletim de Resumos Expandidos**. Camboriú, SBG. p. 45-46.
- BOSE, R.N. & SINGH, H. 1975. Geoelectrical Surveys for Groundwater in Parts of Karnal District, Haryana, India. **Geoexploration**, 13: 171-186.
- CONEY, D.P. 1977. Model Studies of the VLF-EM Method of geophysical Prospecting. **Geoexploration**, 15: 19-35.
- COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; IGREJA, H.L.S.; HASUI, Y. 1991. Aspectos da Evolução Tectônica da Bacia do Parnaíba e sua Relação com o Arcabouço Pré-Cambriano. In: SIMP. NAC. DE EST. TECT., 3. Rio Claro, 1991. **Boletim**. Rio Claro, SBG. p. 96-98.
- FRASER, D.C. 1969. Contouring of VLF-EM Data. **Geoexploration**, 34: 958-967.
- FRISCHKNECHT, F.C.; LABSON, V.F.; SPIES, B.R.; ANDERSON, W.L. 1991. Profiling Methods Using Small Sources. In: NABIGHIAN, M.N., ed. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**; Applications part A and B. Tulsa, SOCIETY OF EXPLORATIONS GEOPHYSICISTS. p. 105-270. (Investigations in Geophysics, 2)
- GAUR, V.K. & VERMA, O.P. 1973. Enhancement of Electromagnetic Anomalies by a Conducting Overburden II. **Geophysical Prospecting**, 21: 159-184.
- GAUR, V.K.; VERMA, O.P.; GUPTA, C.P. 1972. Enhancement of Electromagnetic Anomalies by a Conducting Overburden. **Geophysical Prospecting**, 20: 580-604.
- HASUI, 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.

- HUEBNER, K. 1975. **The Finite Elements Method for Engineers**. New York, Jhon Wiley and Sons. 500 p.
- KAIKKONEN, P. 1979. Numerical VLF Modeling. **Geophysical Prospecting**, 27: 815-834.
- KAIKKONEN, P. 1980. Numerical VLF, VLF-R and AMT Profiles over some Complicated Models. *Acta Univ. Oul. A* 91. **Phys**, 16: 34.
- LAJOIE, J.J. & WEST, G. F. 1976. The Electromagnetic Response of a Conductive Inhomogeneity in a layered Earth. **Geophysics**, 41: 1133-1156.
- LAJOIE, J.J. & WEST, G.F. 1977. Short Note: two selected field examples of EM anomalies in a conductive environment. **Geophysics**, 42: 655-660.
- LIRA, S.R.B.; FIGUEIREDO, M.G.V.; PINHEIRO, T.P. 1993. **São Domingos do Araguaia**. Belém, SEPLAN. 32 p. . (Novos Municípios, 19)
- LOWRIE, W. & WEST, G.F. 1965. The Effect of a Conducting Overburden on Electromagnetic Prospecting Measurements. **Geophysics**, 30: 624-632.
- LUIZ, J.G. & SILVA, M.L. da C. 1995. **Geofísica de Prospecção**. Belém, CEJUP. V. 1, 311 p.
- MARINHO, P.A.C. 1994. Cinturões Itacaúnas 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.
- McNEILL, J.D. 1990. Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies. In: WARD, S.H. **Geotechnical and Environmental Geophysics; Review and Tutorial**. Tulsa, SOCIETY of EXPLORATION GEOPHYSICISTS. p. 191-218. (Investigation in Geophysics, 1)
- Mc NEILL, J.D. & LABSON, V.F. 1991. Geological Mapping Using VLF Radio Waves. In: NABIGHIAN, M.N., ed. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics; Application part A and part B**. Tulsa, SOCIETY of EXPLORATION GEOPHYSICISTS. p. 521-640. (Investigations in Geophysics, 2)
- OLSSON, O. 1980. VLF Anomalies from a Perfectly Conducting Half-Plane below an Overburden. **Geophysical Prospecting**, 28: 415-434.

- OLSSON, O. 1983. Computing VLF Response over Half-Plane and Wedge Models. **Geophysical Prospecting**, 31: 171-191.
- PAÁL, G. 1965. Ore Prospecting Based on VLF-Radio Signal. **Geoexploration**, 3: 139-147.
- PALACKY, G.J. & KADEKARU, K. 1979. Effect of Tropical Weathering on Electral and Electromagnetic Measurements. **Geophysics**, 44: 69-88.
- PALACKY, G.J. & SENA, O.F. 1979. Conductor Identification in Tropical Terrains - Cases Histories from the Itapecuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil. **Geophysics**, 44: 1941-1962.
- PALACKY, G.J.; RITSEMA, I.L.; DE JONG, S.J. 1981. Electromagnetic Prospecting for Groundwater in Pre-Cambrian Terrains in the Republic of Upper Volta. **Geophysical Prospecting**, 29: 932-955.
- PATERSON, N.R. & RONKA, V. 1971. Five Years of Survey with Very Low Frequency Electromagnetic Method. **Geoexploration**, 9: 7-26.
- PHILLIPS, W.J. & RICHARDS, W.E. 1975. A Study of the Effectiveness of the VLF Method for the Location of Narrow-Mineralized Fault Zones. **Geoexploration**, 13: 215-226.
- PODDAR, M. 1982. Very Low-Frequency Electromagnetic Response of a Perfectly Conducting Half-Plane in a Layered Half-Space. **Geophysics**, 47: 1059-1067.
- PODDAR, M. & RATHOR, B.S. 1983. VLF Survey of the Weathered Layer in Southen India. **Geophysical Propecting**, 31: 524-537.
- PONTE, M.X. 1995. **Pesquisas Geofísicas Realizadas em Convênio - FNS/UFPA de 1988-1995 (jul.)- e Déficit da demanda de consumo de água potável no Estado do Pará. (Relatório Diagnóstico)**
- RIJO, L. 1977. **Modelling of Electric and Electromagnetic Data**. PhD Thesis. Salt Lake City, University of Utah. 242 p.
- RIJO, L. 1994. VLF2D - Programa para Modelagem de Dados VLF devido à Estruturas Bidimensionais. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. Belém, DGf/UFPA.
- RIJO, L. Modeling of 2-D Schlumberger Electrical Soundings by Finite and Infinite Elements. (Inédito)

- SAYDAM, A.S. 1981. Very Low Frequency Electromagnetic Interpretation Using Tilt Angle and Ellipticity Measurements. **Geophysics**, 46: 1594-1605.
- SILVA, A.Q. 1996. **Eletrorresistividade Aplicada a Caracterização Hidrogeológica para o Abastecimento da Cidade de São Domingos do Araguaia**. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 81 p. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa, 1996.
- SILVA, M.L. DA C. 1981. **Efeitos do Manto de Intemperismo sobre Anomalias Eletromagnéticas Provocados por Corpos Tabulares Inclinados - um estudo através de modelamento reduzido**. Belém, Universidade Federal do Pará. Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas. 115 p. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, UFPa, 1981.
- SILVA, M.L. da C. & GALVÃO, M.V.G. 1991. Detecção de Condutores Tabulares sob Cobertura Indutiva. **Rev. Bras. Geoc.**, 21: 82-95.
- SILVA, M.L. DA C. & VERMA, O.P. 1986. Efeitos do Manto de Intemperismo sobre Anomalias Eletromagnéticas (HLEM) Geradas por Corpos Tabulares Inclinados. **Rev. Bras. Geoc.**, 16: 285-293.
- SILVESTER, P.P. & FERRARI, R.L. 1983. **Finite Elements for Electrical Engineers**. Cambridge University. 209 p.
- SMITH, B.D. & WARD, S.H. 1974. On the Computation of Polarization Ellipse Parameters: Short Note. **Geophysics**, 39: 367-869.
- SOUZA, J.A.F. 1996. **Eletrorresistividade na Prospecção Hidrogeológica do Município de Ourilândia do Norte, Pará**. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa, 1996.
- SOUZA, J.A.F. & RIJO, L. 1995. Sondagem Elétrica Vertical em Região do Cristalino: um exemplo de ambiguidade. In: CONG. INT. GEOF., 4., Rio de Janeiro, 1995. **Anais...Rio de Janeiro, SBGf V. 2**, p. 1003-1007.

- VELOSO, H.P.; JAPIASSU, A.M.S.; G. FILHO, L.; 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).
- VILLEGAS-GARCÍA, G.J. & WEST, G.F. 1983. Recognition of Electromagnetic Overburden Anomalies with Horizontal Loop Electromagnetic Survey Data. **Geophysics**, 48: 42-51.
- VOZOFF, K. 1971. The Effect of Overburden on Vertical Component Anomalies in AFMAG and VLF Exploration: a computer model study. **Geophysics**, 36: 53-57.