

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

ELETRORESISTIVIDADE APLICADA AO ESTUDO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO MU  
NICÍPIO DE SALVATERRA-MARAJÓ- PARÁ

Tese Apresentada por

CESAR AUGUSTO CAMPOS DE ALENCAR BEZERRA

como requisito parcial à obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Geofísicas e Geológicas da  
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 14.08.79

*William August Sauck*

WILLIAM AUGUST SAUCK

(ORIENTADOR)

*Luiz Rijo*  
LUIZ RIJO

*Olivar Antonio Lima de Lima*  
OLIVAR ANTONIO LIMA DE LIMA

Comitê de Tese

## AGRADECIMENTOS

À FINEP, pelo apoio financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

Ao Serviço de Computação da UFPa., pela boa vontade dos seus funcionários e técnicos.

Ao Laboratório Hidroquímico do NCGG pela presteza na análise das amostras de água.

Ao Dr. Luiz Rijo, pelas sugestões apresentadas.

Ao Dr. William August Sauck, pela orientação segura e dedicada.

## RESUMO

A partir de 1974, quando da implantação do Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas da UFPa., começou a ser desenvolvido um estudo de água subterrânea na Ilha do Marajó, sob o título de Projeto Marajó, financiado pela FINEP, que visava definir e delinear aquíferos em algumas áreas piloto da ilha.

Este trabalho, realizado em uma dessas áreas piloto, no município de Salvaterra, Marajó, busca determinar áreas favoráveis para exploração de água subterrânea, através do uso do método geofísico de eletroresistividade. A área, de 200 Km<sup>2</sup>, foi prospectada através de 65 sondagens elétricas verticais e 6 perfilagens horizontais, tendo sido utilizado o dispositivo Schlumberger nas sondagens e o dispositivo Wenner nas perfilagens.

Os dados foram inicialmente interpretados através do método do Ponto Auxiliar, quando se obteve uma visão geral do comportamento resistivo dos terrenos sondados, sendo depois reinterpretados usando técnica computacional, indicando existir na área camadas com resistividades que variam desde 5 até 43000 ohms-metro.

Observou-se a existência de um pacote formado por uma sucessão de camadas que apresentaram resistividades com valores de 500 a 4000 ohms-metro, interpretado como constituído de sedimentos arenosos com água doce (aquífero), tendo uma espessura que chegou a atingir mais de 60 metros em algumas áreas. Na área pesquisada, foram delimitadas três sub-áreas cobrindo cerca de 40% da área total e, nestas, as espessuras do aquífero vão de 20 a 80 metros. As profundidades do topo desse aquífero nas três sub-áreas variam de 1,3 a 6,6 metros.

A interpretação geofísica foi comprovada através de quatro furos de sondagem até 20 metros. Dois destes furos, realizados nas áreas interpretadas como bons aquíferos, mostraram terrenos mais arenosos, e os outros dois, alocados fora daquelas áreas, apresentaram uma parcela considerável de sedimentos argilosos com al gum material orgânico. Informações obtidas quando do levantamento dos poços escavados na região e das análises de amostras das águas destes poços, mostram que, em termos gerais, não existem problemas quanto à qualidade das águas desses aquíferos mais superficiais, com exceção de dois poços escavados muito próximos da borda da Baía do Marajó, nas localidades de Joanes e Monsarás, que apresentam um aumento na salinidade quando no pico da estação de estio.

Pelo que foi visto, o método utilizado neste trabalho é uma técnica eficiente para localizar bons aquíferos em ambientes geológicos semelhantes ao da área pesquisada.

## ABSTRACT

A pilot area of 200 Km<sup>2</sup> in Salvaterra county along the east edge of Marajo island was selected to make a study of groundwater using electrical resistivity methods. Sixty-five Schlumberger vertical electric soundings and six horizontal Wenner resistivity profiles were made.

The sounding data were first interpreted individually with the auxiliary point method, and later reinterpreted in groups using an iterative curve-calculating routine. The results show the range of resistivities in this area vary between 5 and 40000 ohm-m. The aquifer appears to be defined by a sequence of layers with resistivities between 500 and 4000 ohm-m. In this pilot area three favorable sub-areas were delimited, covering about 40% of the area, where the interpreted aquifer thickness is in excess of 20 m and sometimes as great as 80 m. The depth to the top of this aquifer zone varies between 1.3 and 6.6 m in the three sub-areas.

The geophysical interpretations were verified by four shallow drill holes (to 20 m). Two of these, located within the favorable sub-areas, showed dominantly sand sediments and the other two, drilled outside the favorable areas, showed much more clay and organic material, but limited amounts of fine sand.

Analyses of water samples from many existing wells and of the new drill holes show that, in general, there are no problems with the quality of these shallow groundwaters. The only exceptions are several wells within 100 m of Marajo Bay which show considerable increases in salinity during the height of the

dry season, when the Bay waters also have maximum salinity.

The ages and origin of the long oval belts of sand are not known with certaint, but they could be channel sands deposited by an ancient river or distributary of this deltaic region.

The results of this research have outlined three large zones of good groundwater potential which will be very important for the agricultural and industrial development of this region.

## SUMÁRIO

	<u>PAG.</u>
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 1 - ÁREA DA PESQUISA .....	3
1.1 - Generalidades .....	3
1.2 - O Município de Salvaterra .....	3
CAPÍTULO 2 - TRABALHOS ANTERIORES .....	7
2.1 - Hidrologia e Hidrogeologia .....	7
2.2 - Geologia .....	10
2.2.1 - Geomorfologia .....	10
2.2.2 - Tectônica .....	11
2.2.3 - Estratigrafia .....	15
2.3 - Geofísica .....	15
CAPÍTULO 3 - O MÉTODO ELETRORESISTIVO .....	19
3.1 - Fundamentos do Método .....	19
3.2 - Trabalho de Campo .....	21
3.3 - Instrumental .....	23
CAPÍTULO 4 - TRATAMENTO E MANIPULAÇÃO DE DADOS .....	25
4.1 - Análise de Erro das Sondagens Elétricas Verticais .....	25
4.2 - Suavização das Sondagens Elétricas Ver- ticais .....	26
4.3 - O Método do Ponto Auxiliar .....	30
4.4 - Modelamento das Curvas de Sondagem Elé- trica Vertical Através do Uso de Técni- ca Computacional .....	31

	<u>PAG.</u>
4.5 - Tratamento Integrado com Grupo de Curvas de Sondagem Elétrica Vertical .....	33
4.6 - Perfis de Resistividade Aparente .....	37
CAPÍTULO 5 - LEVANTAMENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO ....	44
5.1 - Levantamento dos Poços Escavados .....	44
5.2 - Sondagens Mecânicas .....	46
CAPÍTULO 6 - INTERPRETAÇÃO E CONCLUSÃO .....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## ÍNDICE DAS FIGURAS

	<u>PAG.</u>
FIG. 1 - Mapa de situação da Ilha de Marajó.....	4
FIG. 2 - Mapa de situação da área pesquisada .....	5
FIG. 3 - Estudo probabilístico das chuvas, apresentando máximos e mínimos registrados mensalmente, com dados observados de 1855 a 1971 .....	9
FIG. 4 - Mapa tectônico da foz do Rio Amazonas .....	12
FIG. 5 -- Mapa isópaco do Grupo Pará .....	13
FIG. 6 - Mapa isópaco das formações Marajó e Amapá .....	14
FIG. 7 - Coluna estratigráfica da foz do Rio Amazonas..	16
FIG. 8 - Mapa base da área com as alocações das sondagens elétricas verticais, perfilagens elétricas horizontais e os poços escavados e perfurados .....	*
FIG. 9 - Dados de campo da SEV-2, mostrando graficamente os limites de incerteza instrumental, e também a curva suavizada .....	27
FIG. 10 - Dados de campo da SEV-13, mostrando graficamente os limites de incerteza instrumental, e também a curva suavizada .....	28
FIG. 11 - Interpretação preliminar da SEV-23, através do método do Ponto Auxiliar .....	32
FIG. 12 - Modelamento da curva da sondagem elétrica vertical n° 6, através de técnica computacional....	34
FIG. 13 - Modelamento da curva da sondagem elétrica vertical n° 65, através de técnica computacional....	35

	<u>PAG.</u>
FIG. 14 - Curva típica do 1º sub-grupo do Grupo I (SEV-36), com a interpretação geofísica .....	38
FIG. 15 - Curva típica do 2º sub-grupo do Grupo I (SEV-4), com a interpretação geofísica .....	39
FIG. 16 - Curva do Grupo II (SEV-63), com a interpretação geofísica .....	40
FIG. 17 - Mapa com linhas de contorno das resistividades interpretadas a uma profundidade de 10 metros..	*
FIG. 18 - Mapa com linhas de contorno das resistividades interpretadas a uma profundidade de 25 metros..	*
FIG. 19 - Mapa com linhas de contorno das resistividades interpretadas a uma profundidade de 50 metros..	*
FIG. 20 - Mapa com linhas de contorno das espessuras do pacote resistivo .....	*
FIG. 21 - Mapa com linhas de contorno das profundidades do topo do pacote resistivo .....	*
FIG. 22 - Mapa com linhas de contorno dos valores do parâmetro Resistência Transversal T .....	*
FIG. 23 - Perfil de eletroresistividade horizontal nº 4, realizado ao longo da estrada Salvaterra-Jubim.	42
FIG. 24 - Perfil de eletroresistividade horizontal nº 6, que inicia-se próximo da SEV-9, e desenvolvido ao longo da trilha que dá acesso à localidade de "Pingo-d'Água" .....	43
FIG. 25 - Descrição litológica dos sedimentos do poço perfurado nº 14 e a curva da SEV-24 com sua inter-	

	<u>PAG.</u>
pretação geofísica .....	47
FIG. 26 - Descrição litológica dos sedimentos do poço per- furado nº 15, e a curva da SEV-21 com sua inter- pretação geofísica .....	49
FIG. 27 - Descrição litológica dos sedimentos do poço per- furado nº 16, e a curva da SEV-39 com sua inter- pretação geofísica .....	50
FIG. 28 - Descrição litológica dos sedimentos do poço per- furado nº 17, e a curva da SEV-4 com sua inter- pretação geofísica .....	51

(\*) As figuras indicadas com asterisco, estão inseridas nos enve-  
lopes apresentados no verso da contracapa.

## INTRODUÇÃO

As principais atividades econômicas da Ilha do Marajó são a pecuária, a pesca e a fruticultura, esta última desenvolvida principalmente na parte leste da ilha, sendo que a primeira e a última são largamente prejudicadas pelo problema de água. As regiões de campos são as mais atingidas pela seca e salinização da pouca água nesse período. Durante esse período de estação seca (de julho a dezembro), a maioria dos depósitos de águas superficiais fica esgotada, principalmente na região dos campos, devido à ação da intensa evaporação, conjugada com a homogeneidade da topografia. Sendo assim, qualquer estudo que vise determinar parâmetros qualitativos e quantitativos dos mananciais de água subterrânea, poderá ter relevante importância no desenvolvimento da Ilha do Marajó.

Particularmente no município de Salvaterra, a área em estudo apresenta aspecto de poucos campos naturais, com poucas fazendas, e sua principal atividade resume-se na fruticultura (abacaxi e coco), além da pesca. A área é pouco representativa de toda a ilha do ponto de vista topográfico, e também quanto aos tipos de solo.

O incremento do turismo na área, principalmente durante o veraneio (mês de julho), quando a população aumenta muito, aliado ao desenvolvimento da cultura frutífera, associada à implantação de indústrias para o beneficiamento dessa produção, torna imprescindível um melhor dimensionamento em termos de exploração e distribuição dos recursos hídricos na região. Além dos quatro po-

ços para o abastecimento da sede do município, os únicos poços mais profundos disponíveis na região haviam sido perfurados pelo Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP), até profundidades de 40 metros.

Este trabalho visa, através do método geofísico de eletroresistividade, definir geometricamente corpos arenosos com água doce (aquíferos) na região estudada. O custo e a simplicidade do método eletroresistivo estão bem de acordo com os objetivos propostos neste trabalho, e isto levou-nos a escolhê-lo dentre os outros métodos geofísicos. Este método se presta bem na diferenciação de alternâncias de sedimentos arenosos e argilosos, como também atestam trabalhos anteriores.

Devido a atual procura de água nas vilas e lugarejos afastados da sede do município ser relativamente pequena, é de interesse maior pesquisar os aquíferos mais rasos, de no máximo 100 metros, que estão mais de acordo com as necessidades e realidade econômica da população.

## CAPÍTULO 1

### ÁREA DA PESQUISA

#### 1.1 - Generalidades

A Ilha do Marajó apresenta uma população de 180.000 habitantes, distribuídos numa área de cerca de 50.000 Km<sup>2</sup>, estando situada na foz do Rio Amazonas, entre os paralelos 0° e 2° de latitude Sul, e entre os meridianos 48° e 51° de longitude Oeste (ver mapa de situação da ilha, Fig. 1).

Sua área está dividida distintamente em duas regiões: uma formada de campos naturais, apresentando uma vegetação pouco desenvolvida, e uma outra, que apresenta vegetação em forma de densa floresta.

Sua drenagem é constituída de uma intrincada rede de rios, igarapês e furos tipicamente amazônicos, e sua topografia é muito baixa e plana, podendo mesmo ser considerada extremamente homogênea, apresentando as maiores altitudes exatamente no município de Salvaterra, que é a área específica desta pesquisa.

#### 1.2 - O Município de Salvaterra

A pesquisa foi desenvolvida numa área de cerca de 200 Km<sup>2</sup>, situada no município de Salvaterra, limitada ao norte pelo Rio Paracauari, a leste e sul pela Baía do Marajó, e a oeste por uma linha que teria como ponto inicial a foz do Rio Camará, se estendendo no sentido sul-norte (Fig. 2).

São encontradas na área estudada, zonas de praia, alagados, capoeiras, florestas, enfim, diversos tipos de solos e vegeta

Seg. IDESP (1974)

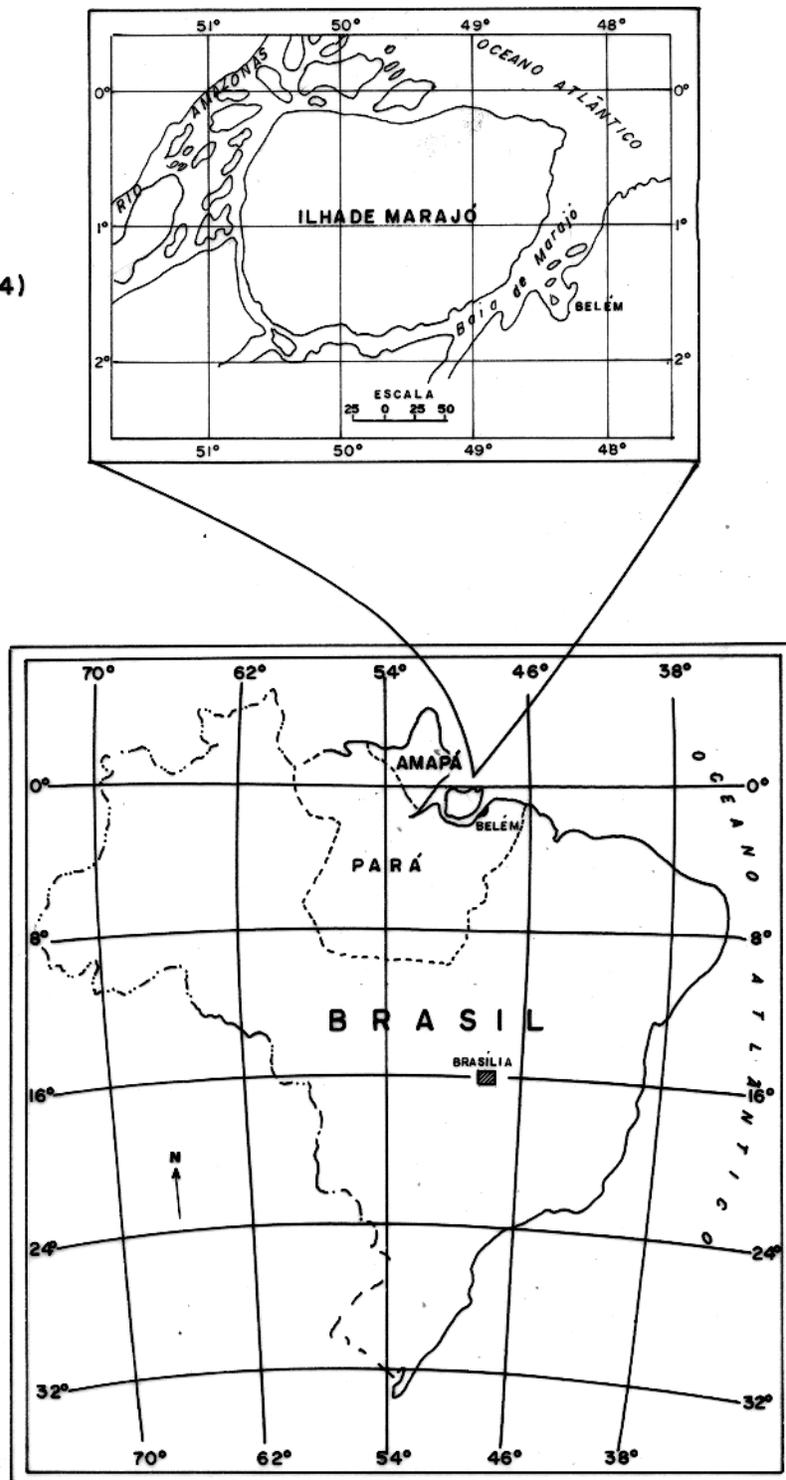


FIG. 1 - MAPA DE SITUAÇÃO DA ILHA DE MARAJÓ.

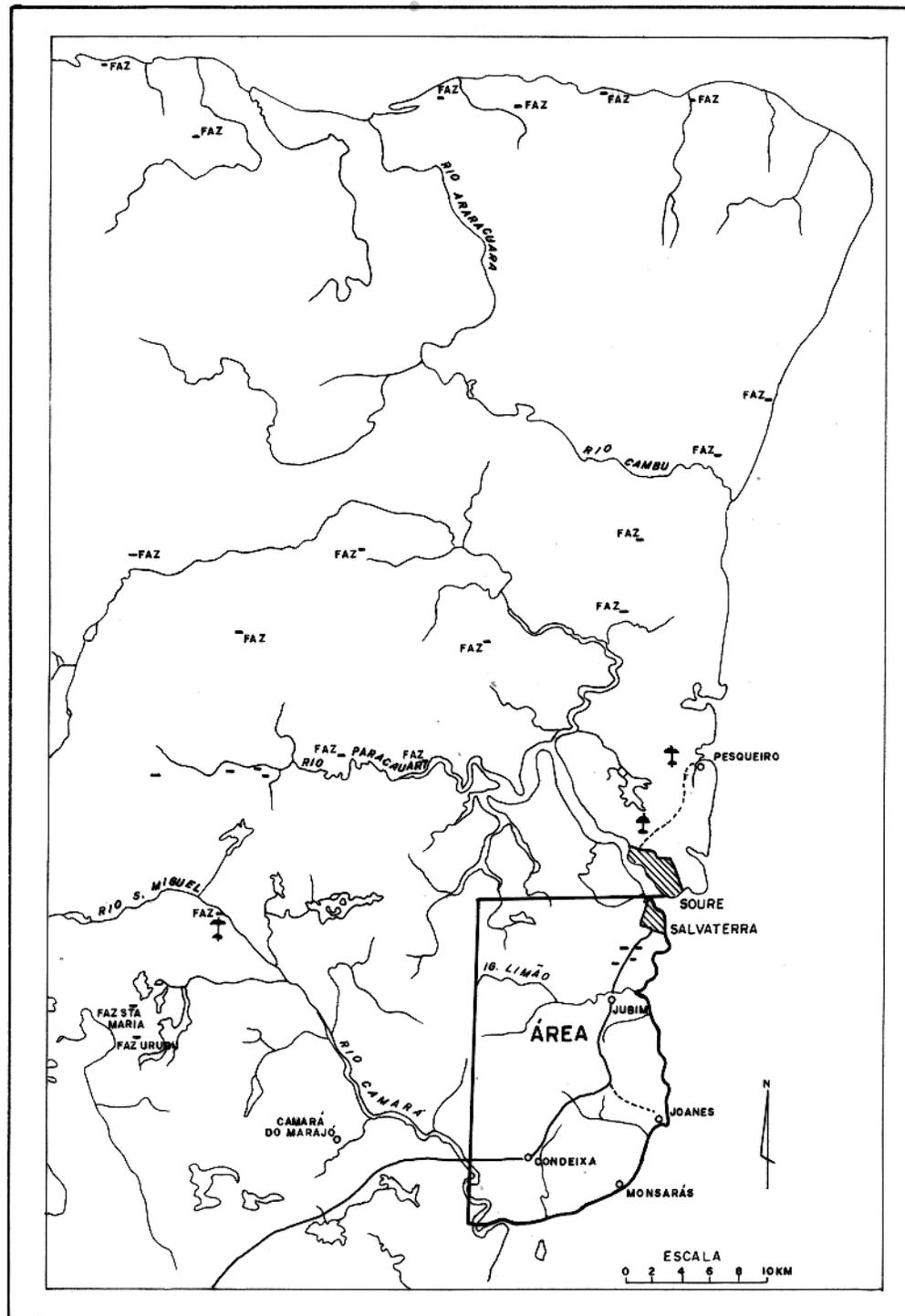


FIG. 2 - MAPA DE SITUAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA.

tação.

As principais contribuições para a drenagem da área são dadas pelos igarapês de Jubim, Condeixa e Rio Camará, bem como pelos pequenos igarapês afluentes, e ainda pelo Rio Paracauari.

Chega-se a Salvaterra mais facilmente através de aviões ou navios que fazem linha na rota Belém-Soure, sendo feita, então, a travessia do Rio Paracauari, em barcos que continuamente deslocam-se entre as sedes dos municípios de Soure e Salvaterra.

O acesso para as vilas do município de Salvaterra é feito através de uma precária rede de estradas, o que se constituiu numa das principais dificuldades para a realização dos trabalhos de campo, pois para o acesso a alguns lugarejos do município, dispõe-se unicamente de picadas e trilhas naturais.

## CAPÍTULO 2

### TRABALHOS ANTERIORES

#### 2.1 - Hidrologia e Hidrogeologia

Segundo relatório do Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará - IDESP (1974), a homogeneidade da topografia, aliada ao baixo relevo, são fatores responsáveis pela dificuldade do escoamento superficial das chuvas, o que justificaria os rios do Marajó serem classificados como de baixa velocidade de escoamento, desenvolvendo-se em forma de meandros, bem como desaguarem em estuários bastante profundos. Um fator que também contribui para a dificuldade da drenagem natural, de acordo com a publicação da Organização dos Estados Americanos - O.E.A. (1974), seria a ação das marés, que funcionariam como freio de escoamento. Estes seriam também os motivos da dificuldade de se estabelecer com mais precisão, os limites das bacias hidrográficas.

Como os mais importantes, temos os rios Anajás, Arari e Camará, desaguando na Baía do Marajó, e o Rio Paracauari que, segundo o mesmo relatório da O.E.A. (1974), já desembocaria no Oceano Atlântico, num local onde as águas não apresentam a salinidade típica desse oceano, devido à diluição das águas salgadas frente à grande quantidade de água doce trazida pela Baía do Marajó e Rio Amazonas.

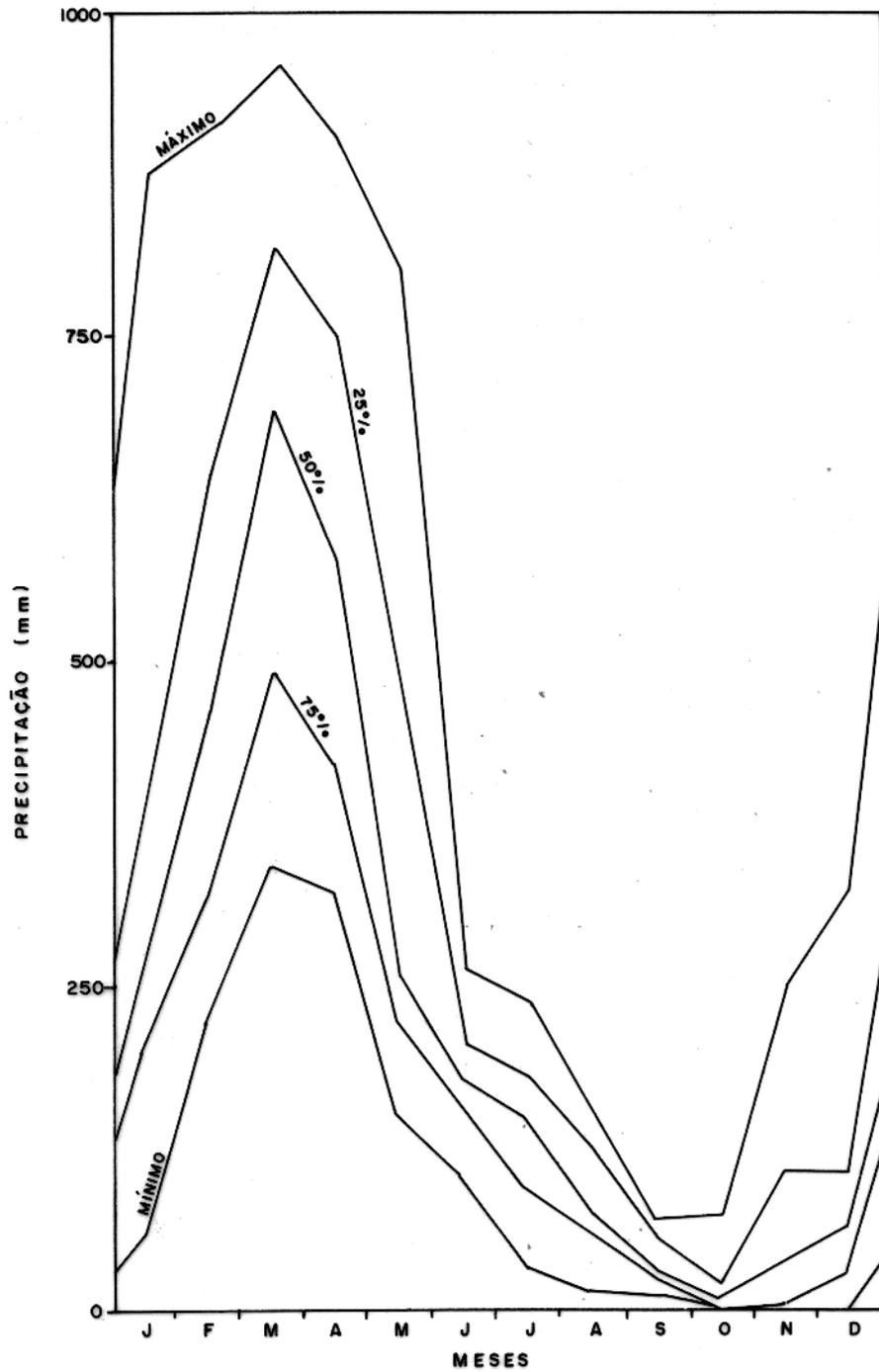
Segundo MERCADO (1974), é suposto em primeira aproximação, que grande parte da bacia de água subterrânea mais rasa é análoga ao sistema de drenagem superficial. O sentido dessa drenagem seria no sentido dos rios, e apenas uma pequena parte desse fluxo se daria no sentido do mar.

Em termos de pluviometria poderíamos discriminar duas estações perfeitamente definidas. Uma sendo de aproximadamente seis meses, de altos índices pluviométricos (de janeiro a julho) e outra com seis meses de seca (de agosto a dezembro). A Fig. 3 (IDESP, 1974), ilustra a afirmação. As precipitações variam de um máximo de 3100 mm anuais (dados colhidos no município de Soure, bem próximo a Salvaterra), até 2500 mm por ano, na região central da ilha (dados colhidos em Cachoeira e Santa Cruz). A temperatura média é de 27°C, com muito pouca variação mensal e anual, sendo que os valores limites médios mensais ficam entre 25°C e 29°C. A umidade relativa é sempre superior a 80%, sendo geralmente menor na região dos campos naturais do que na zona da mata (O.E.A., 1974).

Segundo MERCADO (1974), como um balanço de águas sem muita precisão (cerca de  $\pm$  30%), podemos apresentar as seguintes características: o "runoff" total (águas superficiais + subterrâneas) como sendo cerca de 65% da precipitação anual. Apesar de MERCADO (1974) não fazer referência, é válido se admitir que os outros 35% perdem-se na forma de evapo-transpiração. O reabastecimento subterrâneo é avaliado em 25% do "runoff" total.

Em termos de aquíferos, nosso interesse restringe-se aos de profundidade de no máximo 100 metros, por razões ditadas pelos objetivos desta pesquisa, bem como pelas possibilidades de uma exploração mais rápida e de mais baixo custo. E segundo relatório do IDESP (1974), existe uma alternância de areias e argilas que vai da superfície até essa profundidade (100 m), com esses sedimentos já estando saturados a partir de poucos metros da superfície. O nível hidrostático médio do aquífero livre (primeiro aquífero), estaria

## ESTAÇÃO: SOURE



Seg. IDESP (1974)

FIG. 3 - ESTUDO PROBABILÍSTICO DAS CHUVAS, APRESENTANDO MÁXIMOS E MÍNIMOS REGISTRADOS MENSALMENTE, COM DADOS OBSERVADOS DE 1955 A 1971.

a cerca de três metros da superfície, enquanto que nos aquíferos das regiões de campos naturais, onde ocorrem predominâncias de terrenos argilosos, a profundidade da água subterrânea é de cerca de 15 metros (IDESP, 1974). As águas subterrâneas apresentam baixo gradiente hidráulico e pequena velocidade de escoamento, em razão da topografia da ilha ser baixa e homogênea.

PIUCI & FENZEL (1978), em estudo realizado na cidade de Ponta de Pedras, Marajó (cerca de 50 Km a sudoeste de Salvaterra), cuja área é parecida com a área de Salvaterra do ponto de vista geofísico e geológico, afirmam que a influência das marés parece não atingir o quimismo das águas subterrâneas rasas. Segundo ainda o mesmo trabalho, muitas dessas águas apresentam elevada acidez (pH 3,5 - 6,7), que implica restrições ao uso humano e agrícola. O ferro também apresenta-se em concentrações de até 4,0 mg/litro, e a maioria dos seus teores estaria acima do padrão máximo exigido (0,3 mg/litro) para o uso humano, sendo um dos fatores mais limitantes para o uso em geral dessas águas.

## 2.2 - Geologia

### 2.2.1 - Geomorfologia

O PROJETO RADAM (1974), distingue três unidades geomorfológicas na ilha:

- a) As planícies colmatadas a leste, caracterizadas por inúmeras lagoas sujeitas às inundações pluviais;
- b) Pediplano pleistocênico na parte central, recoberto por densa vegetação, e responsável pela topografia extremamente baixa da região;

c) Uma zona em começo de processo de colmatagem na faixa oeste de ilha.

Esta divisão acima apresenta características regionais da ilha, mas a área específica de Salvaterra não se enquadra em nenhuma das unidades apresentadas, segundo observações pessoais na área em estudo. A faixa litorânea que vai de Salvaterra até Ponta de Pedras, alargando-se por 10 ou 15 Km, é mais parecida com o outro lado da Baía do Marajó, ou seja, a área de Belém e adjacências.

Esta distinção apresentada talvez seja devido ao fato de o município de Salvaterra apresentar as maiores altitudes de toda a ilha, também mostrando-se mais acidentado e com drenagem bem desenvolvida, em contraste com outras regiões do Marajó.

#### 2.2.2 - Tectônica

Segundo trabalho de SCHALLER et alii (1971) a grande unidade tectônica da bacia sedimentar da foz do Rio Amazonas é a Fossa Marajoara, composta pelos "grabens" de Mexiana e Limoeiro (Fig. 4). O "graben" de Mexiana apresenta uma direção NE, enquanto que o de Limoeiro tem direção NW. A Fossa Marajoara está limitada a oeste pela Plataforma do Amapá, que se prolonga para sudeste, e a sudeste a Fossa Marajoara é limitada pela Plataforma do Pará, que também mergulha suavemente para o "graben" de Mexiana. A espessura máxima dos sedimentos terciários nos "grabens" é de aproximadamente 5 Km e, segundo a Fig. 4, a área pesquisada está localizada na Plataforma do Pará, próxima da margem este do "graben" de Limoeiro, e a profundidade do embasamento na área estudada estaria a menos de 600 metros, segundo extrapolação dos dados das curvas isópacas de SCHALLER et alii (1971) até a área (ver figuras 5 e 6).

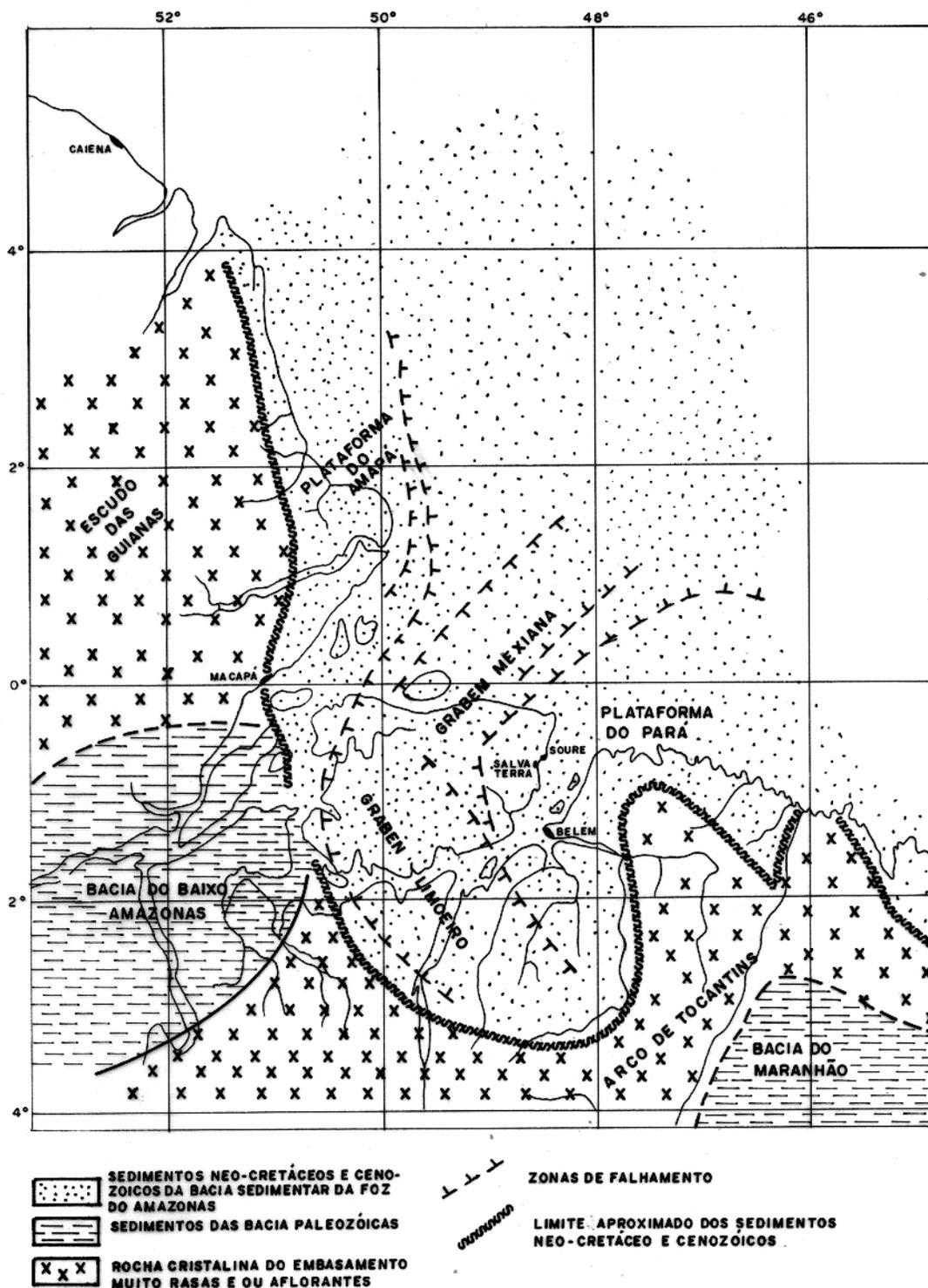


FIG. 4 - MAPA TECTÔNICO DA FOZ DO RIO AMAZONAS.

seg. SCHALLER et alii (1971)

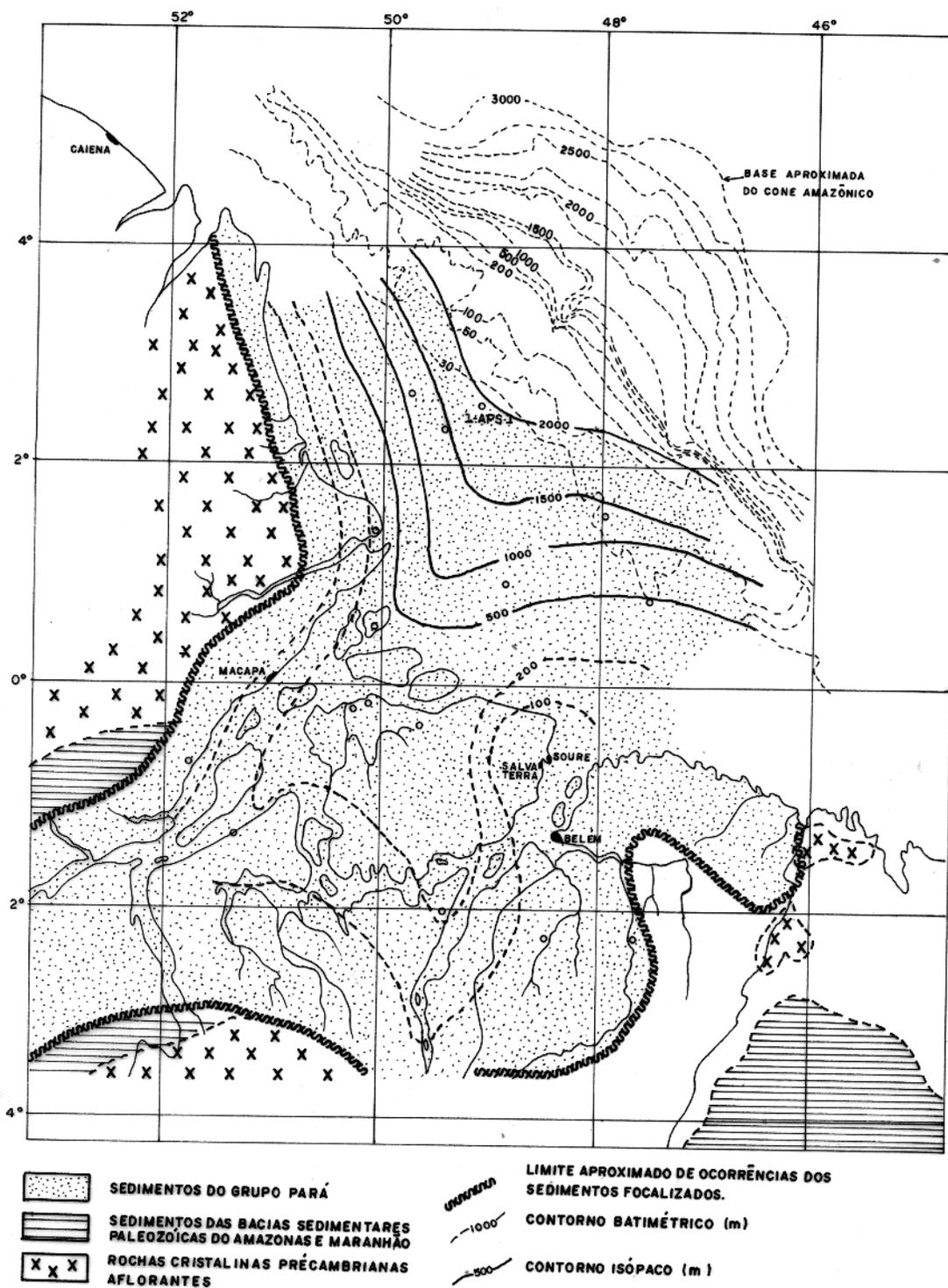


FIG. 5 - MAPA ISÓPACO DO GRUPO PARÁ.

Seg. SCHALLER et alii (1971)

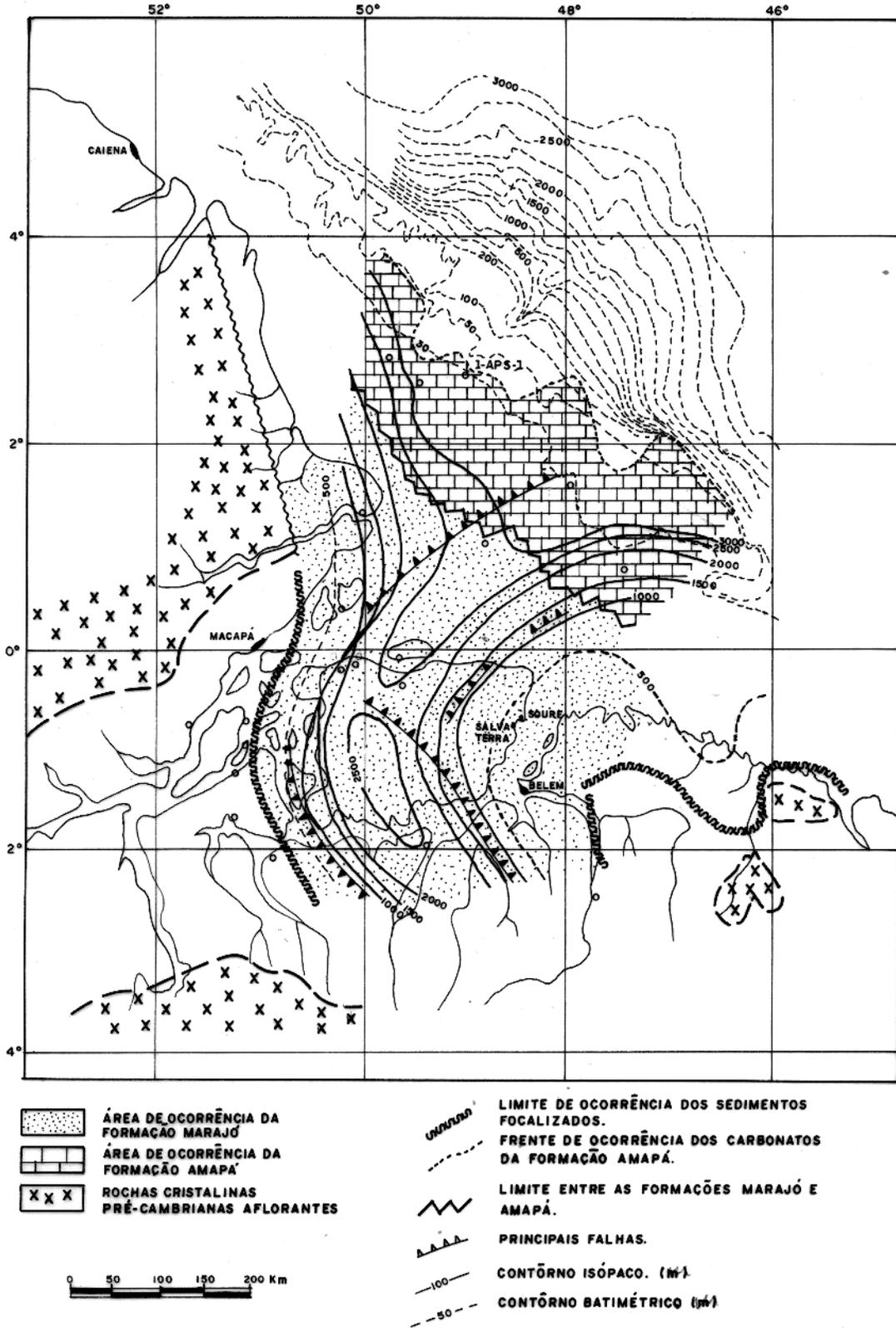


FIG. 6 - MAPA ISÓPACO DAS FORMAÇÕES MARAJÓ E AMAPÁ

Seg. SCHALLER et alii (1971)

### 2.2.3 - Estratigrafia

A estratigrafia preliminar da bacia da foz do Rio Amanon-  
nas foi esboçada pela PETROBRAS em 1971, segundo coluna apresenta-  
da na Fig. 7. Como nosso interesse restringe-se aos sedimentos mais  
superficiais desta coluna estratigráfica, limitaremos nossa descri-  
ção apenas ao Grupo Pará.

O Grupo Pará está dividido nas formações Tucunaré e Pira-  
rucú. A formação Pirarucú, unidade basal do Grupo e predominante na  
região da Plataforma Continental, apresenta-se mais argilosa. Já a  
formação Tucunaré, mais rasa e predominante na região do Marajó e  
litoral, mostra uma maior presença de areias de origem fluvial. No  
furo 1-APS-1, realizado na Plataforma Continental e situado a cer-  
ca de 350 Km ao norte de Salvaterra, a seção-tipo das formações do  
Grupo Pará indicou uma espessura de 1900 metros para esses sedimen-  
tos. Mas, de acordo com as curvas isópacas mostradas na Fig. 5, es-  
ta espessura reduz-se para menos de 100 metros na região de Salva-  
terra. Os dados do referido furo não apresentam maiores detalhes so-  
bre os sedimentos atravessados nos primeiros 100 metros de perfuração.

Abaixo das formações do Grupo Pará, no lado do Marajó e  
litoral, teríamos a formação Marajó (Fig. 6), que tem como compo-  
nentes básicos os arenitos, as argilas e os folhelhos (SCHALLER et  
alii, 1971).

### 2.3 - Geofísica

O Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pa-  
rá - IDESP, a partir de 1971, iniciou um levantamento geofísico com  
o método eletroresistivo na Ilha do Marajó, com o objetivo de estu-

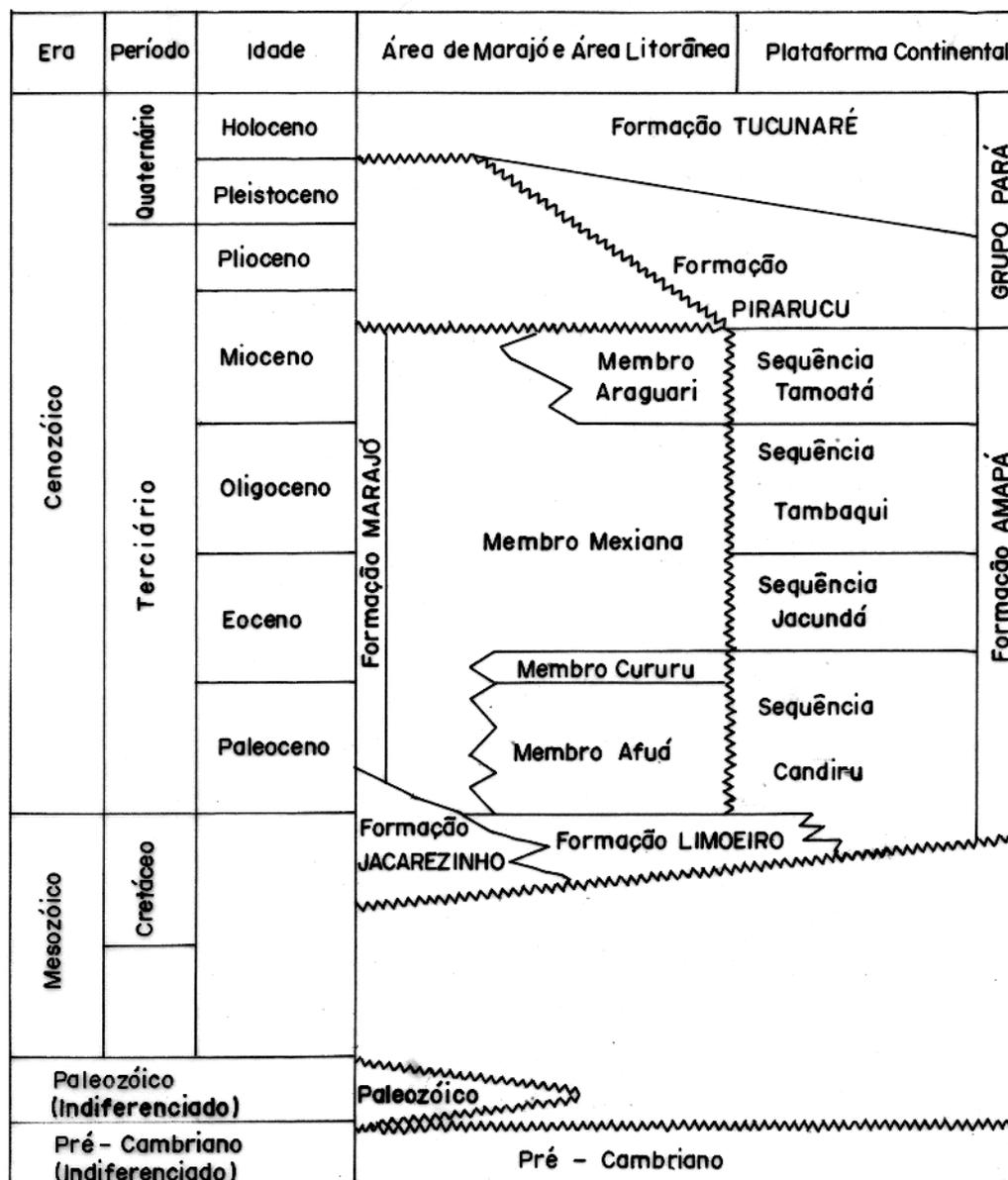


FIG. 7 - COLUNA ESTATIGRÁFICA DA FOZ DO RIO AMAZONAS.

Seg. SCHALLER et alii (1971)

dar a natureza dos terrenos, desde a superfície até uma profundidade de 50 metros.

Segundo relatório do IDESP (1974), utilizou-se nas sondagens elétricas o dispositivo Schlumberger, tendo os terrenos sondados apresentado grandes variações de resistividade, desde valores superiores a 1000  $\Omega$ .m (Soure, Salvaterra, Cachoeira do Arari e Ponta de Pedras), até valores de alguns ohms-metro (na região central da ilha), indicando que os terrenos argilosos constituem grande parte desta região central. Na parte sul-sudeste (faixa de Salvaterra até Ponta de Pedras) ocorre um acréscimo da fração arenosa, com os valores de resistividade apresentando-se acima dos 300  $\Omega$ .m, havendo, porém, regiões onde as resistividades máximas dos terrenos sondados ultrapassariam 1000  $\Omega$ .m.

Esse mesmo levantamento também indicou a existência de um substrato resistente a uma profundidade da ordem de 100 metros, presente em toda a ilha. Segundo o IDESP (1974), esse substrato teria enorme importância na pesquisa de água subterrânea nas regiões central, norte e nordeste da ilha, em virtude da má qualidade dos aquíferos mais superficiais dessas regiões.

Perfis de resistividade foram realizados pelo IDESP nas direções N-S e E-W da ilha. Este primeiro perfil apresentou altas resistividades aparentes na parte sul (100 - 1000  $\Omega$ .m), uma queda acentuada dos valores na parte central (<10  $\Omega$ .m) e, finalmente, uma pequena elevação na borda norte da ilha. O outro, indicou altos valores de resistividade aparente na parte leste (região de Salvaterra), novamente caindo na parte central, e aumentando na parte oeste.

Em levantamento geofísico realizado em área situada no município de Ponta de Pedras (cerca de 50 Km a sudoeste de Salvaterra), KOBAYASHI (1978) determinou áreas promissoras para exploração de água subterrânea, com as resistividades dos terrenos situando-se entre 200 e 1000  $\Omega$ .m dentro desses aquíferos, e sendo menores que 60  $\Omega$ .m fora deles. Já a 20 Km a noroeste da sede do município de Salvaterra, na região do Rio Paracauari, CAVALCANTI et alii (1978) selecionou áreas com predominância de areias (possivelmente paleocanais), constituindo-se bons aquíferos com espessuras entre 10 e 35 metros, mas, com as resistividades desses corpos arenosos ficando na faixa de 20 a 300  $\Omega$ .m, enquanto que as resistividades dos terrenos situados fora desses corpos arenosos eram menores que 2  $\Omega$ .m.

## CAPÍTULO 3

### O MÉTODO ELETRORESISTIVO

#### 3.1 - Fundamentos do Método.

O método geofísico empregado nesta pesquisa, foi o método de resistividade elétrica. Os terrenos foram prospectados através de sondagens elétricas verticais de resistividade usando o dispositivo Schlumberger, e perfilagens também de resistividade, com espaçamento constante, que é o dispositivo Wenner.

As sondagens objetivaram verificar a equipartição da corrente elétrica enviada pelos eletrodos de corrente, através dos terrenos atravessados.

Os dispositivos de medida de resistividade consistem de um sistema de quatro eletrodos, sendo dois deles usados para enviar uma corrente elétrica  $I$  ao solo (A e B), e os outros dois (M e N), para medir a diferença de potencial  $\Delta V$  entre eles, distribuídos simetricamente em relação a um centro, sendo que MN tem que ser menor que  $AB/5$ , quando se usa o dispositivo Schlumberger.

Para terrenos homogêneos e isotrópicos, tem-se:

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

onde  $\rho$  é a resistividade do meio.

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

teremos que

$$\rho = \frac{K \Delta V}{I} \quad (3)$$

notando-se que o coeficiente K dependerá da geometria do dispositivo usado, onde a resistividade  $\rho$  é o parâmetro fundamental na interpretação.

Contudo, subsolos não-homogêneos são mais representativos da natureza e, para esses terrenos, as diferenças de potenciais diferem das medidas quando em um meio homogêneo. É então atribuído um valor fictício de resistividade, que é chamado "resistividade aparente" ( $\rho_a$ ), definida da mesma maneira que na equação (3). Essa resistividade aparente de uma formação geológica equivale à resistividade verdadeira de um meio homogêneo e isotrópico fictício, no qual se envia uma corrente I, e a diferença de potencial  $\Delta V$  medida é igual àquela no meio não-homogêneo.

No dispositivo Wenner,  $AM = BN = a$ ,  $AN = BM = 2a$ , e o valor de K na equação (2) torna-se  $K = 2\pi a$ . Sendo o dispositivo Schlumberger,  $AM = BN$  e  $AN = BM$ , e ficamos com:

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

Quando o interesse do estudo é saber as variações da resistividade dos terrenos em profundidade, teremos sondagens elétricas, nas quais os eletrodos são expandidos simetricamente a partir de um centro que permanece fixo, e cujas profundidades de investigação crescem com o aumento do espaçamento entre os eletrodos de corrente (A e B). Caso a intenção seja observar as variações laterais de resistividade, usando o dispositivo Wenner como o Schlumberger

ger podem ser usados para realizar uma perfilagem horizontal, mudando apenas o procedimento de campo, quando os quatro eletrodos são deslocados ao mesmo tempo. Os dispositivos Schlumberger e Wenner são os mais usados nas sondagens verticais, levando o dispositivo Schlumberger a vantagem de ser menos sensível às inhomogeneidades laterais, pois seus eletrodos de potencial permanecem fixos durante uma série de medidas, como também por apresentar uma maior rapidez na obtenção dessas medidas.

### 3.2 - Trabalho de Campo.

O levantamento inicial da área desta pesquisa, bem como o levantamento dos poços escavados, e todo o levantamento geofísico da área, foi efetuado em quatro jornadas, em agosto e dezembro de 1976, agosto de 1977 e junho de 1978, o que demandou no total cerca de 60 dias efetivos de trabalho de campo.

Foram realizadas 65 sondagens elétricas verticais, buscando levantar toda a área, sendo utilizado o dispositivo Schlumberger por ser o menos sensível aos terrenos não-homogêneos e apresentar maior rapidez no desenvolvimento dos trabalhos, estando todas elas locadas no mapa base da área, que constitui a Fig. 8.

O comprimento de linha máximo das sondagens foi  $AB = 1000$  metros, sendo que em cerca de 30% destas sondagens, este comprimento de linha não pode ser mantido devido a limitações do equipamento utilizado, e até limitações impostas pela própria natureza dos terrenos sondados, que apresentaram altas resistências de contato, atingindo valores desde  $5 \text{ K}\Omega$  até  $100 \text{ K}\Omega$ . Para minimizar este problema, a partir de comprimentos de linha  $AB = 200$  metros, foi ne

cessário molhar, com solução saturada de NaCl, os terrenos onde eram fincados os eletrodos de emissão de corrente, bem como usar um conjunto de dois ou três eletrodos separados de mais ou menos 2 metros um do outro, que funcionavam como um único. Passou-se também a usar eletrodos não-polarizáveis (com solução de sulfato de cobre) como eletrodos de medida de potenciais, para obter uma melhor estabilização nas leituras desses potenciais.

Conseguiu-se uma média de três sondagens elétricas verticais por dia, mas o acesso aos locais de algumas sondagens constituiu-se na principal dificuldade para o levantamento geofísico, sendo o equipamento transportado manualmente por grandes distâncias, ocorrendo então grande perda de tempo apenas com o deslocamento da equipe para o local a ser sondado, fazendo com que algumas vezes executássemos apenas uma única sondagem por dia. Ao efetuarmos a sondagem, os valores obtidos para a resistividade aparente eram imediatamente plotados em papel de escala bilogarítmica, num controle de campo que possibilitava detectar quaisquer anormalidades que pudessem surgir durante a sondagem, tais como mau isolamento dos fios de emissão de corrente, ou mesmo incorreções na localização dos quatro eletrodos.

Visando determinar as variações laterais de resistividade elétrica, e saber como os terrenos eram influenciados pela proximidade de rios, foram feitos seis perfis de resistividade, que também serviram para ajudar nas interpretações das sondagens elétricas, tendo sido usado o dispositivo Wenner em todos eles.

- Perfil 1: Nesta perfilagem foi usado o dispositivo Wenner ( $K = 2\pi a$ ), com um espaçamento de  $a = 10m$ , começando na

margem esquerda do igarapé de Jubim, e desenvolvendo-se por 200 metros, ortogonalmente ao igarapé (ver localização dos perfis no mapa base, Fig. 8).

- Perfil 2: Foi realizado com um espaçamento de  $a = 10$  m, começando na margem direita do igarapé de Jubim, com a perfilagem desenvolvendo-se por 500 metros no sentido N-S, ortogonalmente ao igarapé.
- Perfil 3: Com um espaçamento de  $a = 50$  m, inicia-se na localidade de Cururú e estende-se por cerca de 5 Km no sentido E-W.
- Perfil 4: Desenvolvido ao longo da estrada principal, começa a uns 400 metros do igarapé de Jubim e desenvolve-se por 3,5 Km no sentido da sede do município, com um espaçamento de 50 metros.
- Perfil 5: Com 2 Km de extensão e espaçamento de 50 metros, este perfil tem início próximo à cabeceira do igarapé de Condeixa, e se desenvolve no sentido W-E.
- Perfil 6: Desenvolve-se no sentido S-N e se estende por 5 Km, iniciando-se próximo da SEV 9, passa na localidade de Pingo d'Água, e também tem um espaçamento de 50 metros.

### 3.3 - Instrumental

O resistivímetro utilizado no levantamento geofísico (sondagens e perfilagens), foi o resistivímetro ER-300 da Companhia Perfilagem e Geofísica Ltda., com sistema de corrente contínua alimentado por baterias, o que minimiza os problemas de interferência

e pouca penetração da corrente na investigação, que ocorrem frequentemente com sistemas de corrente alternada. O intervalo de medidas de corrente vai de 0,1 mAmp até 1000 mAmp, enquanto que em termos de d.d.p. poderíamos medir valores desde 0,1 mV até 1000 mV. A potência máxima de saída do instrumento é de 80 Watts, e sua precisão é de ± 2% no final da escala.

CAPÍTULO 4

TRATAMENTO E MANIPULAÇÃO DOS DADOS

4.1 - Análise de Erro das Sondagens Elétricas Verticais

É importante um estudo do erro introduzido nas medidas de resistividade aparente, pois isto nos dará uma idéia da precisão da interpretação das curvas. Medidas erradas e distorcidas, proporcionarão, também, interpretações não confiáveis.

Para análise de erro, usa-se normalmente um número estatístico de leituras. Mas, devido o procedimento de campo estipular apenas uma ou, no máximo, duas leituras para cada valor de  $AB/2$ , precisamos fazer pelo menos uma estimativa do erro máximo que pode ocorrer devido a razões instrumentais,

Decorrente da própria precisão do instrumento no qual foram realizadas as medidas, existe uma imprecisão da ordem de  $\pm 0.1$  mV nas leituras de  $\Delta V$ , e  $\pm 0.1$  mAmp na corrente lida, nos permitindo calcular o erro relativo e absoluto de  $\rho_a$  para cada valor de  $AB/2$  de uma sondagem, supondo que não há erro no fator geométrico  $K$ .

Como exemplo, apresentamos um cálculo de erro relativo e absoluto para uma medida de  $\rho_a$  da SEV nº 2, na qual, para  $AB/2 = 30$  metros, tivemos  $I = 7.0$  mAmp,  $\Delta V = 18.0$  mV, implicando um valor de  $1201 \Omega.m$  para a resistividade aparente.

O erro relativo na medida de  $I$  é calculado através de uma regra de três simples:

$$\frac{0.1 \text{ mAmp}}{7.0 \text{ mAmp}} \times 100 = 1.42 \text{ (em porcentagem).}$$

Para a medida de  $\Delta V$ , o erro relativo é calculado também por:

$$\frac{0.1 \text{ mV}}{18.0 \text{ mV}} \times 100 = 0.55 \text{ (em porcentagem)}$$

O erro relativo máximo na medida de  $\rho_a$  para este determinado valor de  $AB/2$  será, então, a soma dos erros relativos máximos para  $I$  e  $\Delta V$ , o que dá um valor de 2%.

Torna-se, então, simples, o cálculo do erro absoluto. Para a medida de  $\rho_a$ , que será  $\pm 2\%$  de  $1201 \Omega.m$ , ou seja,  $\pm 24 \Omega.m$ . Então esta medida de  $\rho_a$  poderia ser plotada dentro de um intervalo que vai desde  $1277 \Omega.m$  até  $1225 \Omega.m$ , pois estaria dentro do erro instrumental calculado. O cálculo do erro para esta medida de  $\rho_a$  ( $1201 \Omega.m$ ), também mostra que os algarismos das unidades e das dezenas poderiam ser inteiramente desprezados.

As figuras 9 e 10 mostram cálculos dos erros em  $\rho_a$ , devido as medidas de  $I$  e  $\Delta V$ , para as SEVs 2 e 13, estando os intervalos de  $\rho_a$  apresentados graficamente.

#### 4.2 - Suavização das Sondagens Elétricas Verticais.

Segundo KELLER & FRISCHKNECHT (1966), para as medidas nas quais  $MN < AB/5$ , teríamos um erro menor que 5%, relativo ao caso ideal para medidas de campo elétrico, nas quais o intervalo de  $MN$  teria de ser infinitesimalmente pequeno, o que seria um erro perfeitamente tolerável.

Na execução de uma sondagem elétrica vertical, o ideal seria, então, mantermos um pequeno valor de  $MN$ , fixo ao longo de todas as medidas realizadas durante a expansão dos eletrodos de cor-

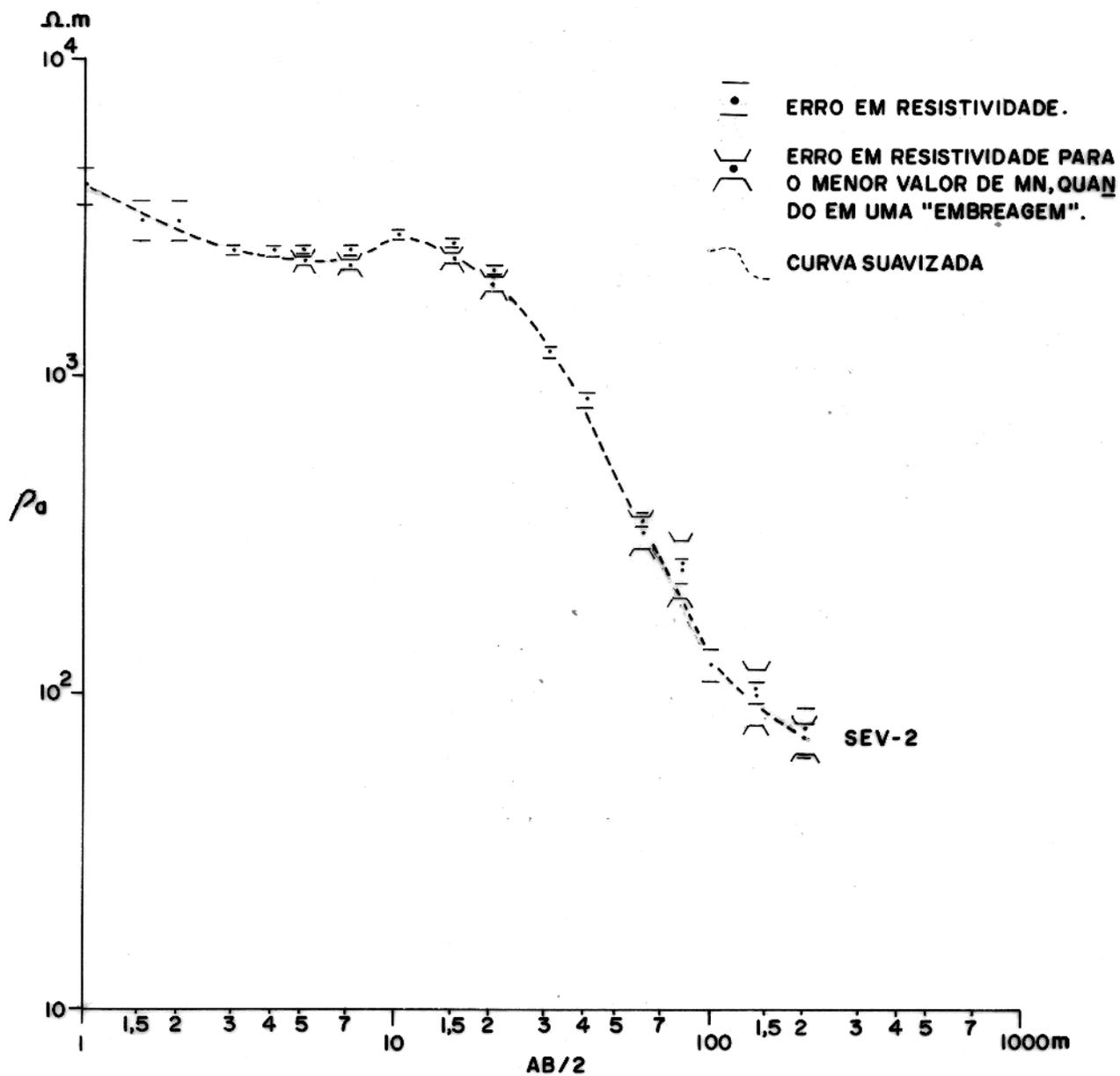


FIG. 9 - DADOS DE CAMPO DA SEV-2, MOSTRANDO GRAFICAMENTE OS LIMITES DE INCERTEZA INSTRUMENTAL, E TAMBÉM A CURVA SUAVIZADA.

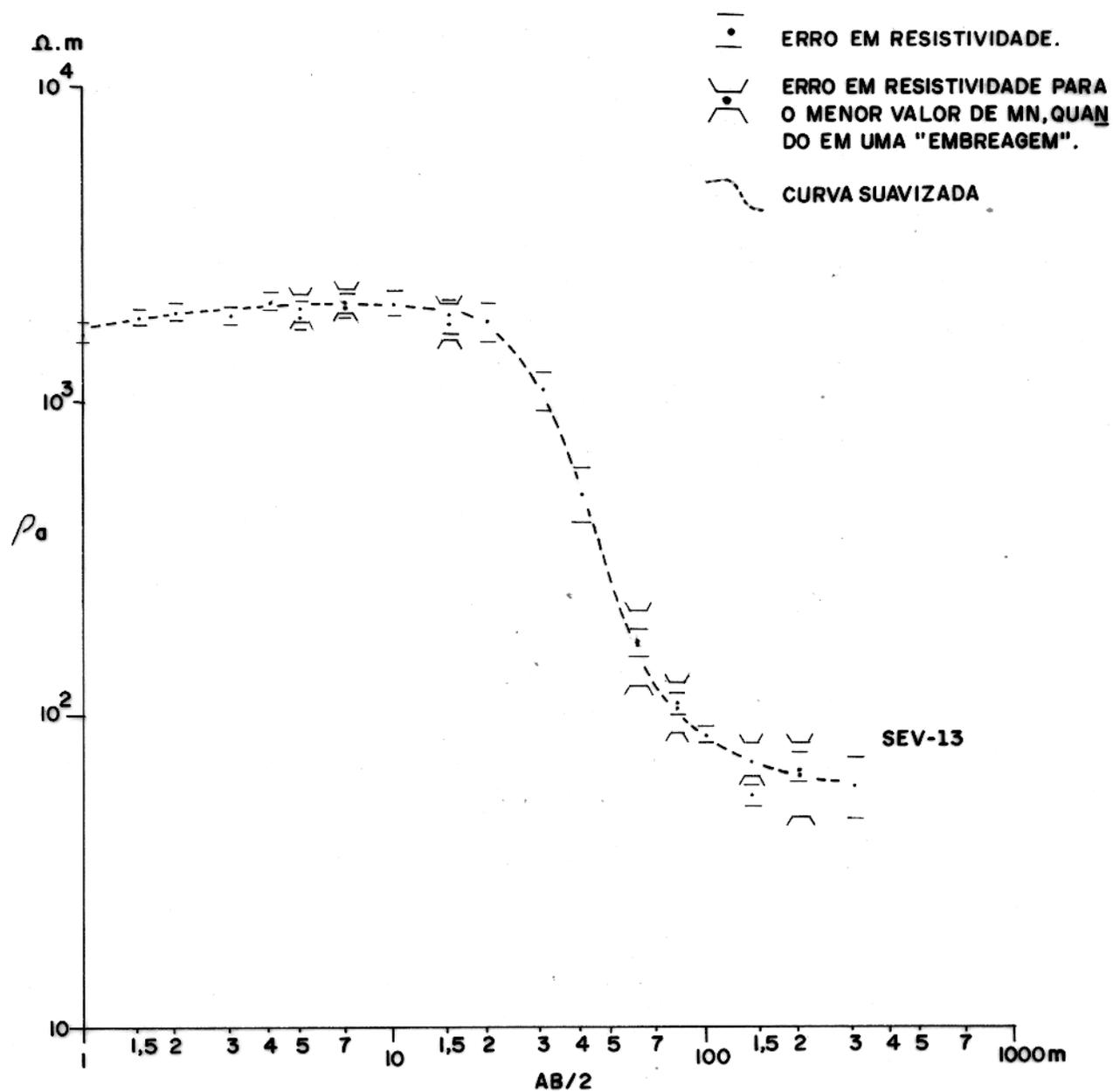


FIG.10 - DADOS DE CAMPO DA SEV-13, MOSTRANDO GRAFICAMENTE OS LIMITES DE INCERTEZA INSTRUMENTAL, E TAMBÉM A CURVA SUAVIZADA.

rente A e B. Mas, chegaríamos a um ponto tal, em que começaríamos a ter dificuldades na obtenção das leituras de  $\Delta V$ , devido ao pequeno valor de MN comparado com o de AB. Daí a necessidade de efetuarmos aumentos no valor de MN, sempre que este esteja muito pequeno com respeito a AB, a fim de que possa ser mantida uma razão entre os valores de AB e MN que esteja dentro do limite antes exigido por causa do erro introduzido devido a fatores geométricos, bem como também venha satisfazer as exigências da sensibilidade do instrumento.

Então, quando da realização de uma sondagem elétrica vertical, ao aumentarmos o valor de MN para iniciarmos uma nova série de medidas com diferentes valores de  $AB/2$ , usa-se repetir a medida para o último valor de  $AB/2$  da série feita com o valor anterior de MN, usando-se agora este valor maior de MN. Teremos, assim, dois valores de resistividade medidos para um mesmo valor de  $AB/2$ , porém com diferentes valores de MN. Esta operação é chamada de "embreagem".

No caso das nossas sondagens, empregamos "embreagens" para  $AB/2$  valendo 5, 7, 15, 20, 60, 80, 140 e 200 metros e, quando as duas medidas diferiam consideravelmente, a medida levada em conta para a composição final da curva foi a de menor MN.

Realiza-se, ainda, suavizações em curvas de sondagens elétricas verticais nas quais usou-se eletrodos metálicos como eletrodos de potencial. É que o uso desses eletrodos geram um potencial (potencial de eletrodo), que é grande (até centenas de mV) e varia com o tempo, o que ocasiona um erro na leitura de  $\Delta V$ . Nas sondagens feitas com eletrodos não-polarizáveis ("pote poroso"), nos quais se coloca uma solução saturada de sulfato de cobre, esse e-

feito é minimizado.

As figuras 9 e 10 são, também, ilustrações de suavizações de curvas.

#### 4.3 - O Método do Ponto Auxiliar

Na primeira interpretação geofísica dos dados obtidos nas sondagens elétricas verticais, foi usado o método do Ponto Auxiliar (ZOHDY, 1965), usando curvas padrão de duas camadas.

O objetivo da interpretação geofísica é obter-se os valores das resistividades e espessuras das camadas dos terrenos sondados. Mas, o que realmente se obtém numa curva de resistividade é um efeito da combinação desses dois parâmetros.

A combinação desses dois parâmetros, leva a outros dois, chamados parâmetros de "Dar Zarrouk", que são a resistência transversal unitária ( $T = hp$ ) e a condutância longitudinal unitária ( $S = \frac{h}{\rho}$ ), ambas definidas a partir de um prisma de seção reta unitária e eixo normal à estratificação das camadas geológicas. O parâmetro  $T$  representa a resistência desse prisma a uma corrente que flui perpendicularmente a ele, enquanto que  $S$  é a condutância desse mesmo prisma a uma corrente que flui paralela a ele (ORELLANA & MOONEY, 1966).

Admitindo que esse prisma é formado por uma sucessão de  $n$  camadas homogêneas e isotrópicas, para uma corrente perpendicular à sua face superior, podemos escrever:

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_n = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i$$

E para uma corrente normal à face superior

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}$$

O princípio da interpretação do método do Ponto Auxiliar é substituir as duas primeiras camadas por uma única camada de espessura e resistividade fictícias, e sempre a partir daí, interpretar o restante da curva com o uso de ábacos de duas camadas. Procede-se assim até interpretar toda a curva. A Fig. 11 ilustra uma sondagem elétrica vertical interpretada pelo método do Ponto Auxiliar, segundo o uso de curvas padrão de duas camadas.

#### 4.4 - Modelamento das Curvas de Sondagem Elétrica Vertical Através do Uso de Técnica Computacional.

Após termos obtido uma visão geral da área através da interpretação geofísica pelo uso do método do Ponto Auxiliar, foi feita uma reinterpretação dos resultados obtidos, usando agora a técnica computacional.

Nesta interpretação, onde cada curva foi interpretada separadamente, foi usado o programa em FORTRAN IV antes desenvolvido por RIJO et alii (1977) na interpretação dos dados de resistividade colhidos no Vale do Apodi, Rio Grande do Norte. Esse programa refaz a curva de sondagem elétrica vertical para um modelo arbitrário de interpretação, no qual os valores de resistividade e espessura das camadas são pré-estabelecidos.

Referido programa é baseado no trabalho de GHOSH (1971), tendo sido adaptado para os computadores IBM/370 e HP/9830A pelo Setor de Computação do Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas da Universidade Federal do Pará.

Para essa interpretação, faz-se um estudo da sondagem elétrica baseado no comportamento da curva de resistividade obtida,

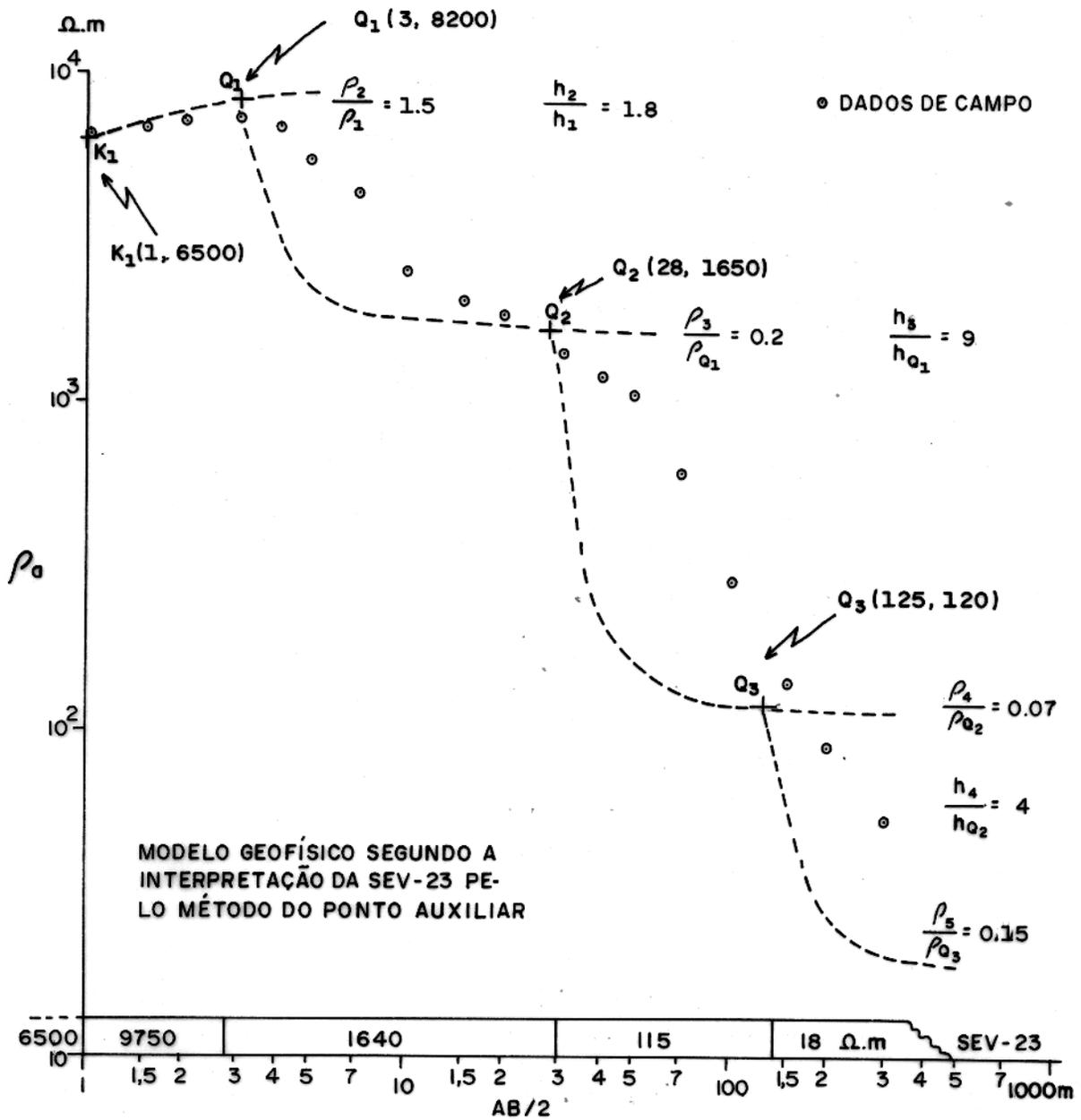


FIG. 11 - INTERPRETAÇÃO PRELIMINAR DA SEV-23, ATRAVÉS DO MÉTODO DO PONTO AUXILIAR.

e assume-se, então, valores de resistividade e espessura para as camadas, obtendo-se, então, pontos discretos que comporão uma curva para o modelo fornecido. Varia-se os valores assumidos para as espessuras e resistividades das camadas, até que a curva do modelo assim gerado coincida com a curva formada pelos valores de resistividade aparente obtidos no campo.

Apesar da dificuldade inicial de se obter o ajuste entre a curva gerada pelo modelo assumido e a curva de campo, após as primeiras interpretações começa-se a perceber que o comportamento resistivo de uma curva de sondagem repete-se em muitas outras, fazendo com que se consiga ajustar rapidamente muitas delas, bastando para isso efetuar-se pequenas modificações nas resistividades e espessuras das camadas da sondagem tomada como modelo.

As Fig. 12 e 13, são ilustrações de interpretações pelo uso da técnica computacional, nas quais são apresentados desde modelos iniciais, até os modelos finais que coincidem com as curvas de campo.

Este método permite um melhor refinamento do modelo interpretado, pois proporciona um melhor ajuste com a curva de campo, que o método do ponto auxiliar, porque podemos supor modelos com muitas camadas.

#### 4.5 - Tratamento Integrado com Grupos de Curvas de Sondagem Elétrica Vertical

Após concluída essa interpretação feita curva a curva com o uso do método computacional, foi então observado o comportamento eletroresistivo das sondagens como um todo.

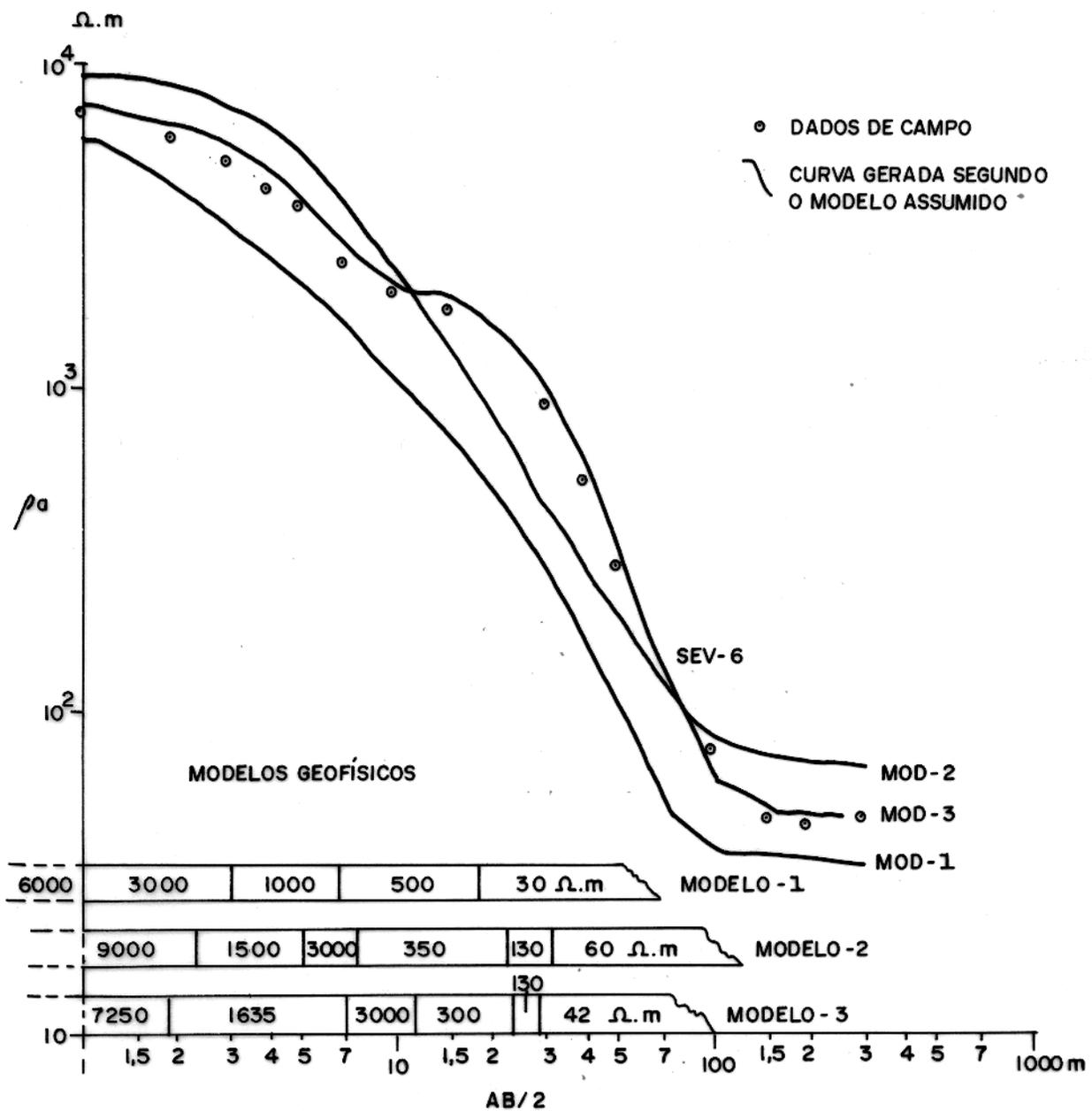


FIG. 12- MODELAMENTO DA CURVA DA SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL Nº 6, ATRAVÉS DE TÉCNICA COMPUTACIONAL.

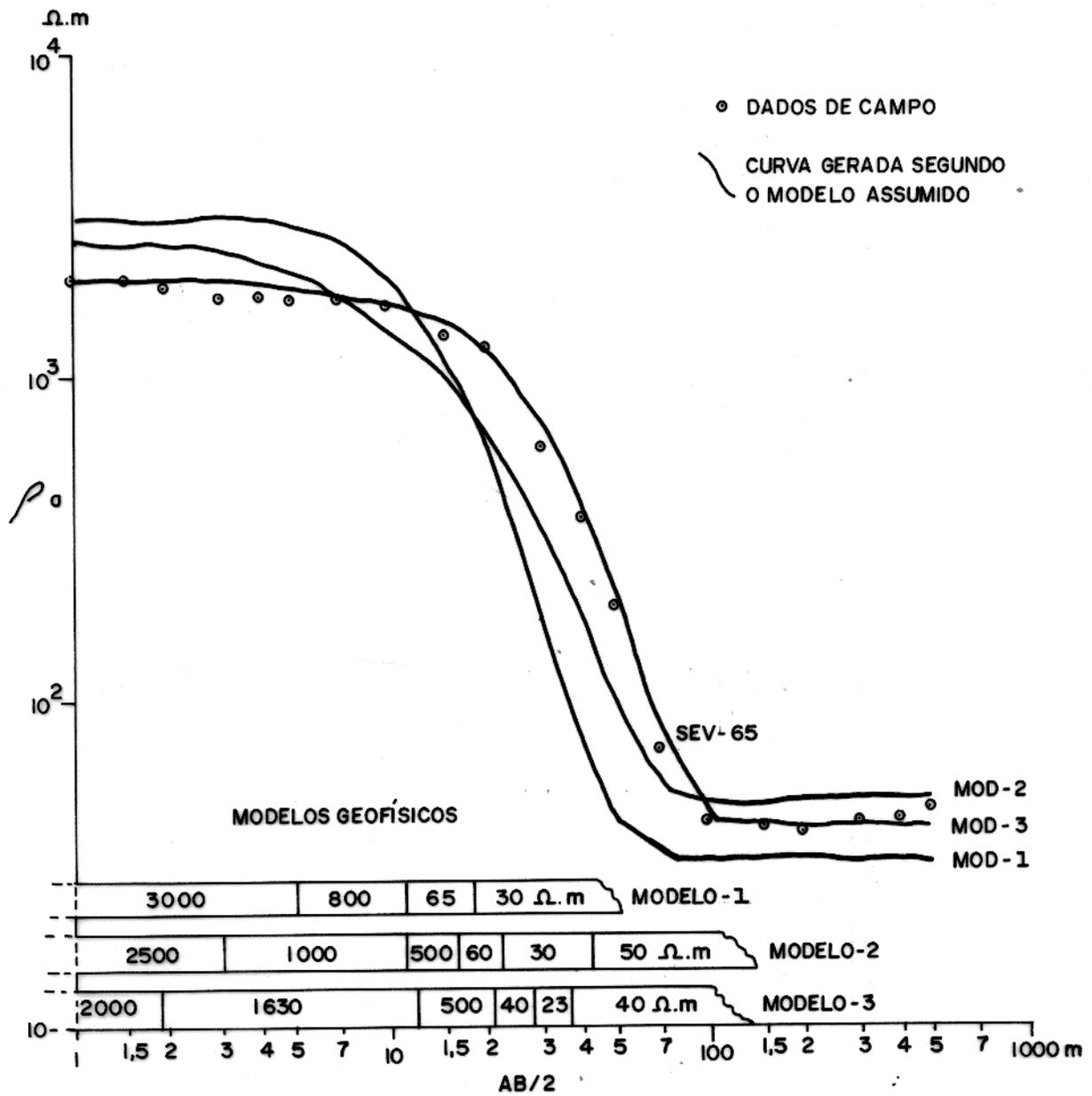


FIG. 13 - MODELAMENTO DA CURVA DA SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL Nº 65, ATRAVÉS DE TÉCNICA COMPUTACIONAL.

Notou-se que cerca de 50% das sondagens apresentavam curvas de resistividade com feições bastante similares, mostrando sempre uma camada resistiva a pouca profundidade, sucedendo a uma camada mais condutora.

As curvas que apresentaram este comportamento formaram o Grupo I, sendo, então, reinterpretadas em dois subgrupos, atribuindo-se para essa camada resistiva valores médios de 4000  $\Omega$ .m e 3600  $\Omega$ .m para os dois respectivos subgrupos. Foram tomados estes dois valores médios de resistividade da camada resistiva como sendo diferentes, a fim de facilitar o ajuste das curvas no computador, pois com dois subgrupos reduzíamos o intervalo de variação da resistividade dessa camada mais resistiva determinada na primeira interpretação com o computador.

Feita a nova interpretação, foram ajustadas 19 curvas no primeiro subgrupo, enquanto que 16 sondagens enquadraram-se no outro subgrupo. As 28 sondagens restantes, que não apresentaram esse comportamento geofísico, formaram o Grupo II.

Não houve grande preocupação com a precisão na delimitação das camadas situadas na faixa de 0 - 5 m de profundidade, pois neste intervalo ocorre uma variação no nível piezométrico, principalmente considerando-se que as sondagens foram realizadas tanto na época das chuvas, como também durante o período de estiagem na ilha, além das variações no grau de umidade do solo de local para local. Também não era de interesse um ajuste muito perfeito na parte final da curva, devido ao erro nas medidas aumentar para valores de  $AB/2$  maiores que 200 metros, como também pelo fato de profundidades maiores a 100 metros estarem fora dos objetivos deste estudo.

Sendo assim, tínhamos maior interesse nas camadas a partir do horizonte resistivo bem caracterizado nas curvas do Grupo I, e que também fossem razoavelmente resistivas para se admitir que pudessem comportar água doce.

As Figuras 14, 15 e 16 mostram curvas características dos dois subgrupos do Grupo I, bem como do Grupo II, com suas respectivas interpretações geofísicas.

A partir desta última interpretação, foram confeccionados mapas com curvas de contorno para os valores das resistividades interpretadas nas profundidades de 10, 25 e 50 metros, a fim de se observar o comportamento resistivo dos terrenos nessas profundidades (Figuras 17, 18 e 19), e ainda dois outros mapas também de contorno, em que foram marcadas, nos pontos sondados, as espessuras do pacote formado por terrenos razoavelmente resistivos já mencionado, bem como as profundidades do topo desse pacote (Figuras 20 e 21).

Devido à ambiguidade na interpretação relativa à combinação dos parâmetros  $h$  e  $\rho$ , foi feito também um mapa de contorno dos valores do parâmetro  $T$  (resistência transversal) calculados para todas as sondagens elétricas interpretadas a partir da primeira camada do pacote resistivo, o que contribuiu para uma melhor confiabilidade na interpretação (Fig. 22). Estes mapas serviram de base para as conclusões apresentadas no Capítulo 6.

#### 4.6 - Perfis de Resistividade Aparente

Dos seis perfis horizontais de resistividade aparente realizados para se determinar as variações laterais de resistividade elétrica e as influências da proximidade dos rios sobre os terrenos, e ainda para auxiliar as interpretações dos resultados obti-

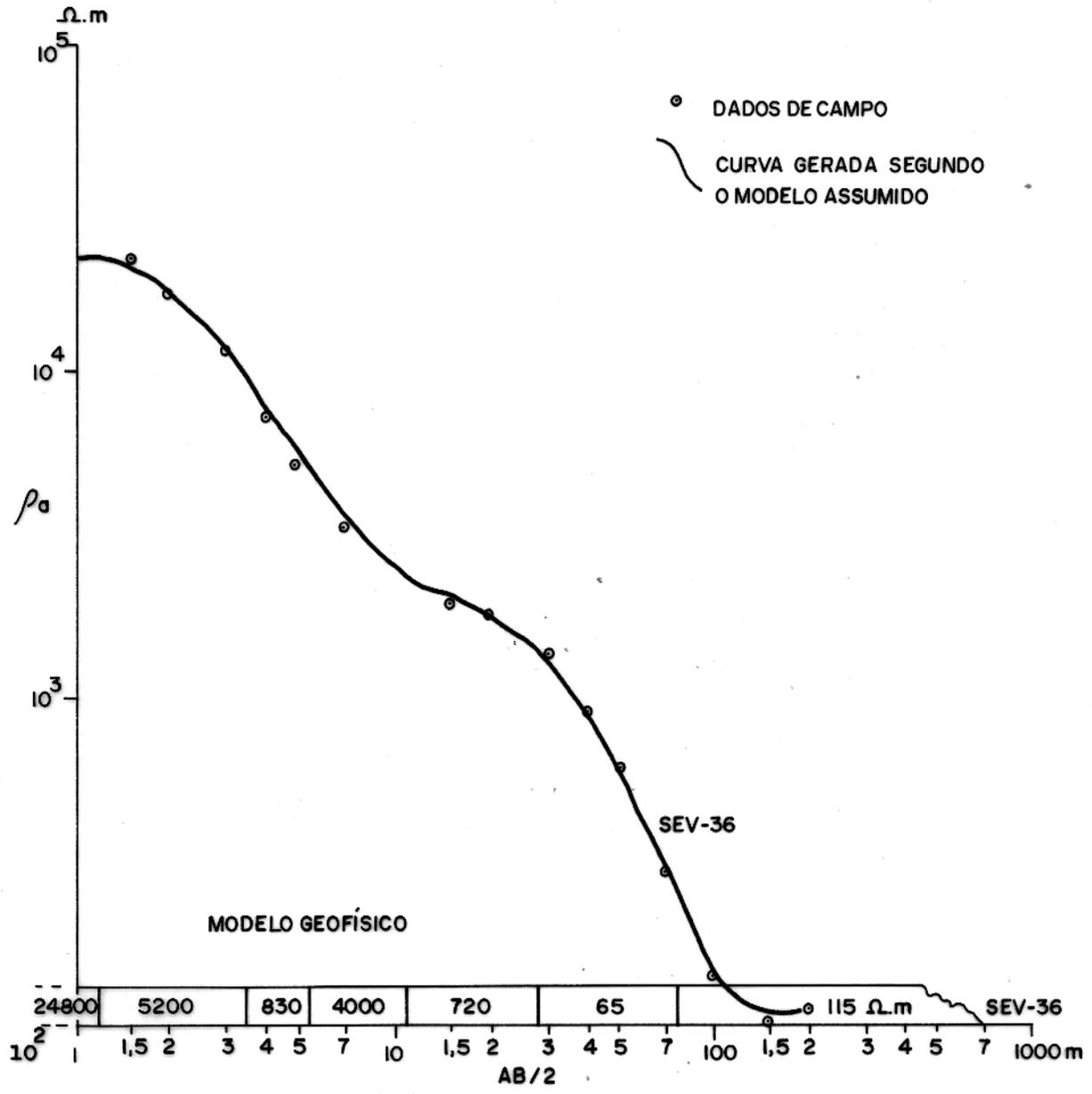


FIG. 14 - CURVA TÍPICA DO 1º SUB-GRUPO DO GRUPO I (SEV-36), COM A INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

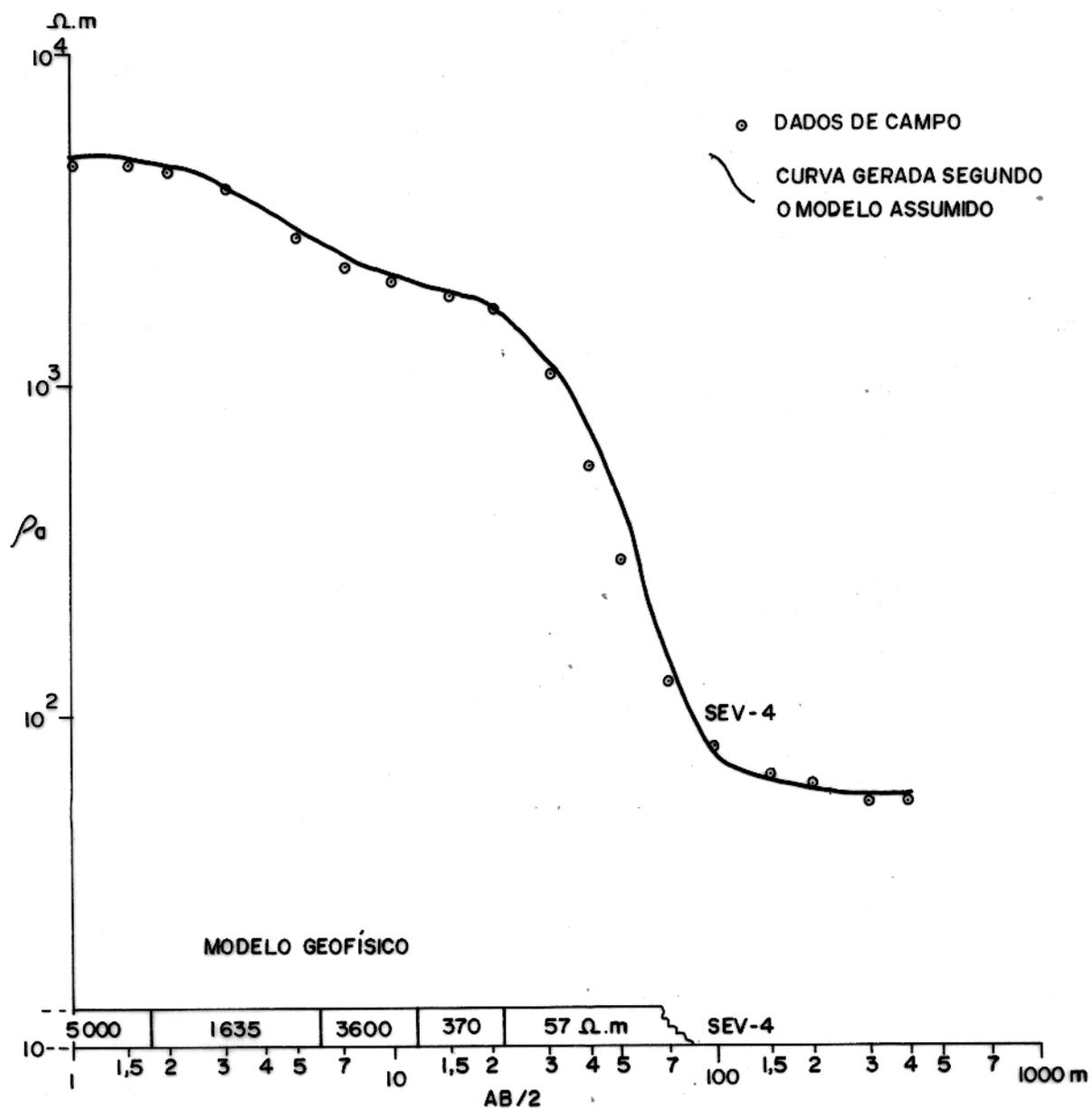


FIG. 15- CURVA TÍPICA DO 2º SUB-GRUPO DO GRUPO I ( SEV-4), COM A INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

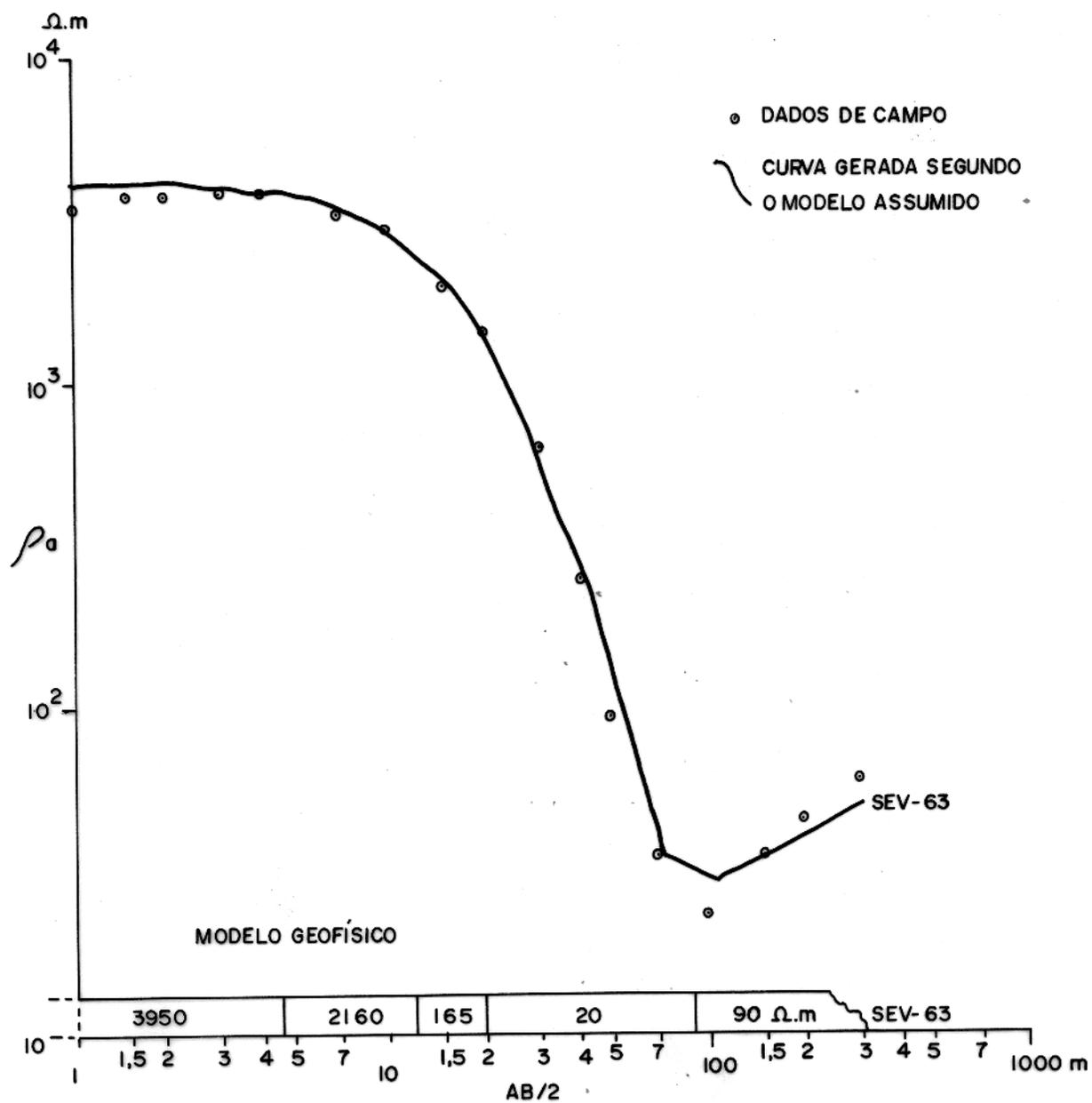


FIG. 16 - CURVA DO GRUPO II (SEV - 63), COM A INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

dos com as sondagens elétricas, dois deles (perfis 4 e 6) são apresentados nas Figuras 23 e 24 (ver localização na Fig. 8).

Estes dois perfis apresentam muitas irregularidades em escala pequena, e também grandes variações nas resistividades em escala maior.

PERFIL Nº 4  
ARRANJO WENNER  
ESPACAMENTO  $a = 50m$   
DATA - 31/05/78

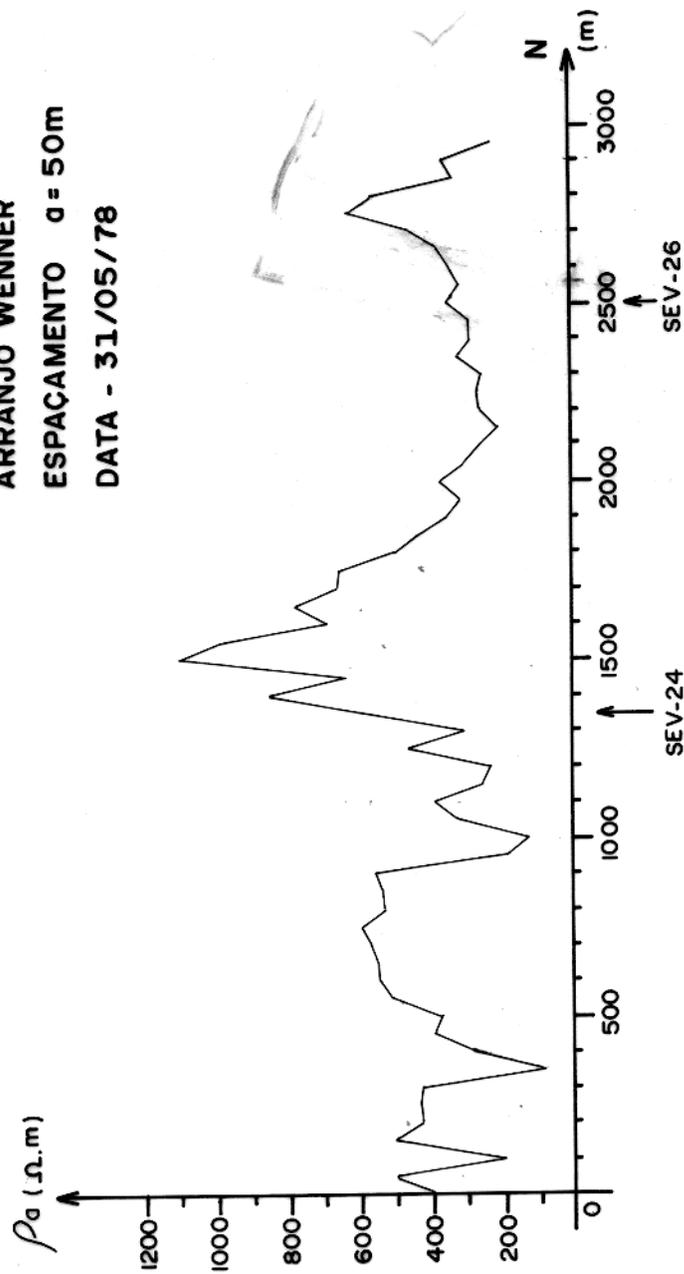


FIG. 23 - PERFIL DE ELETRORESISTIVIDADE HORIZONTAL Nº 4, REALIZADO AO LONGO DA ESTRADA SALVATERRA - JUBIM.

PERFIL Nº 6  
 ARRANJO WENNER  
 ESPAÇAMENTO  $a = 50\text{m}$   
 DATA - 03/06/78

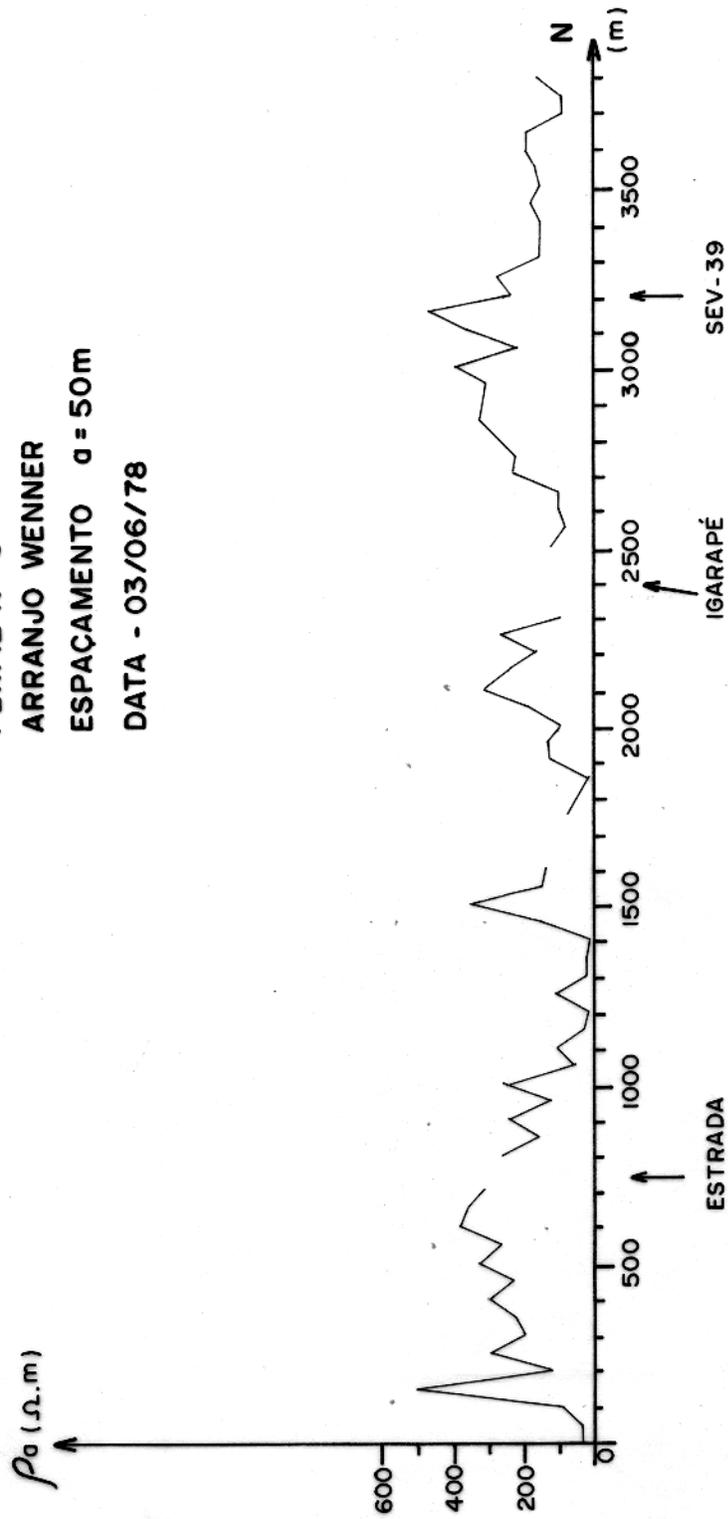


FIG.24 - PERFIL DE ELETRORESISTIVIDADE HORIZONTAL Nº 6, QUE INICIA-SE PRÓXIMO DA SEV-9, E DESENVOLVIDO AO LONGO DA TRILHA QUE DÁ ACESSO A LOCALIDADE DE "PINGO D'ÁGUA".

## CAPÍTULO 5

### LEVANTAMENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

#### 5.1 - Levantamento dos Poços Escavados.

Visando obter informações gerais sobre a qualidade e disponibilidade das águas usadas pelas populações do município de Salvaterra, foi feito o levantamento de alguns poços e outros mananciais que servem às populações da área.

Foram amostrados 16 poços espalhados pelas vilas e lugares da região, sendo um deles localizado na sede do município, e ainda um "olho-d'água" e um igarapé na localidade de Cururú, bem como colhidas amostras do poço e caixa de distribuição que servem à sede do município (ver localização dos poços no mapa base, Fig. 8).

As medidas feitas nos poços (nível da água e profundidade do poço) apresentam variações de local para local (ver Tab. 1). A altura do nível da água relativamente ao solo, por exemplo, apresenta-se numa faixa que varia de 1,3 até 7,0 metros, situando-se a média em torno de 3,7 metros.

Segundo CUTRIM & SAUCK (1978), os aquíferos rasos (até 20 metros) do lado Este da Ilha de Marajó, sofrem muito pouca ou nenhuma influência da salinidade das águas dos rios ou da Baía do Marajó. No município de Salvaterra (parte Este da ilha), com exceção de dois poços escavados a cerca de 50 metros do litoral, que apresentam-se contendo água mais salobra durante o verão, não existem na área poços com problemas de salinização. As condutividades das amostras colhidas vão desde 170  $\mu\text{mho/cm}$  (próximo do litoral) até 10  $\mu\text{mho/cm}$ , sendo 30  $\mu\text{mho/cm}$  o valor médio. Essas águas também mos

TABELA 1 - NÍVEL DA ÁGUA E PROFUNDIDADE DOS POÇOS ESCAVADOS LEVANTADOS NA ÁREA, E ALGUNS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DAS AMOSTRAS.

POÇOS (PE) PARÂMETROS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
DATA	12/07/77	12/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	13/07/77	14/07/77	14/07/77	14/07/77	15/07/77
NÍVEL DA ÁGUA (m)	4.30	4.90	3.90	3.20	1.50	1.30	3.70	7.00	3.20	4.60	1.80	2.90	6.70	4.20	3.20	5.00
PROFUND. DO POÇO (m)	5.70	6.20	5.50	5.30	4.10	3.00	5.50	6.00	5.30	6.00	3.30	4.20	9.30	5.60	5.20	6.70
TEMP. DA AMOSTRA NO CAM- PO (°C)	26.70	26.60	27.10	27.90	26.10	26.50	27.30	28.20	26.20	27.60	27.10	27.70	28.60	27.70	27.80	28.20
COR (mg/l Pt)	2.50	<2.50	<2.50	<2.50	<2.50	2.50	2.50	2.50	<2.50	5.00	<2.50	5.00	<2.50	<2.50	<2.50	<2.50
TURBIDEZ (mg/l SiO <sub>2</sub> )	5.00	9.75	4.50	10.75	26.00	7.50	7.50	51.00	20.50	51.00	10.75	33.25	15.50	15.50	13.25	18.00
pH (LABORATÓRIO)	6.00	5.50	5.10	5.40	5.30	5.60	6.00	6.20	5.10	5.50	5.20	5.20	5.60	6.00	6.30	5.10
CLORETO (mg/l Cl)	38.92	6.49	14.22	5.49	5.74	2.49	31.44	4.49	6.48	12.47	6.49	4.75	3.74	7.48	4.49	8.48
DUREZA TOTAL (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	23.50	4.00	5.50	12.00	3.00	3.50	23.50	14.00	4.50	4.50	5.00	4.00	3.00	17.50	3.00	6.00
CÁLCIO (mg/l Ca)	6.00	<0.05	<0.05	3.00	<0.05	<0.05	7.20	5.20	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	6.00	<0.05	<0.05
MAGNÉSIO (mg/l Mg)	4.25	<0.05	<0.05	2.19	<0.05	<0.05	3.96	2.14	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2.80	<0.05	<0.05
ALCALINIDADE AO METIL ORANGE (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	25.00	15.00	10.00	10.00	10.00	10.00	20.00	20.00	10.00	10.00	10.00	5.00	15.00	20.00	5.00	10.00
FERRO TOTAL (mg/l Fe)	1.20	0.40	0.15	0.15	0.15	0.20	0.15	0.60	0.10	0.70	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
SÓDIO (mg/l Na)	31.49	3.05	5.64	2.82	2.35	0.47	22.09	1.41	2.82	1.88	2.35	1.41	1.88	2.82	0.94	4.70
POTÁSSIO (mg/l K)	1.96	0.98	1.96	0.98	0.49	0.49	1.47	0.98	0.98	0.98	0.98	0.49	0.98	0.98	0.49	1.47
CONDUTIVID. (µmhos/cm)	170	25	47	44	20	10	140	35	30	54	21	15	11	51	13	42

traram um elevado índice de acidez (pH 5,0 - 6,2), enquanto que o ferro aparece na maioria das amostras com teor sempre inferior ao máximo exigido (0,3 mg/litro) para consumo humano.

A Tabela 1 apresenta algumas características físicas e químicas das amostras colhidas nos 16 poços levantados, bem como informações sobre os níveis das águas e profundidades desses poços.

## 5.2 - Sondagens Mecânicas

Quatro furos de sondagem foram realizados na área, sendo utilizados para aferição da interpretação geoeétrica.

Escolheu-se os pontos onde estão localizadas as sonda—gens elétricas verticais números 24, 21, 39 e 4 para estas perfura—ções (ver localização dos poços na Fig. 8).

O poço perfurado sobre a SEV n° 24 (PP 14) apresenta ini—cialmente uma camada de 4 metros de argila arenosa, vindo depois uma camada de 2 metros de blocos de "grês do Pará" que aparecem mis—turados com sedimentos constituídos de argila com areia, seguindo—se areia de cor branca e vermelha, que já atingia uma espessura de 7 metros quando a perfuração foi interrompida (Fig. 25).

O poço número 15, sobre a SEV n° 21, mostrou-se bem mais argiloso, começando com uma camada de argila arenosa que vai até 6 metros, cuja cor muda de amarela para vermelha quando na profundi—dade de 4,5 metros. Depois vem uma camada de argila com "grês do Pa—rá" de 1,5 metros, uma areia argilosa branca também com espessura de 1,5 metros, seguindo-se uma sucessão de camadas argilosas soman—do 6 metros de espessura, de cores marrom e vermelha. A uma profun—didade de 15 metros, atingiu-se uma placa de concreção bem mais com

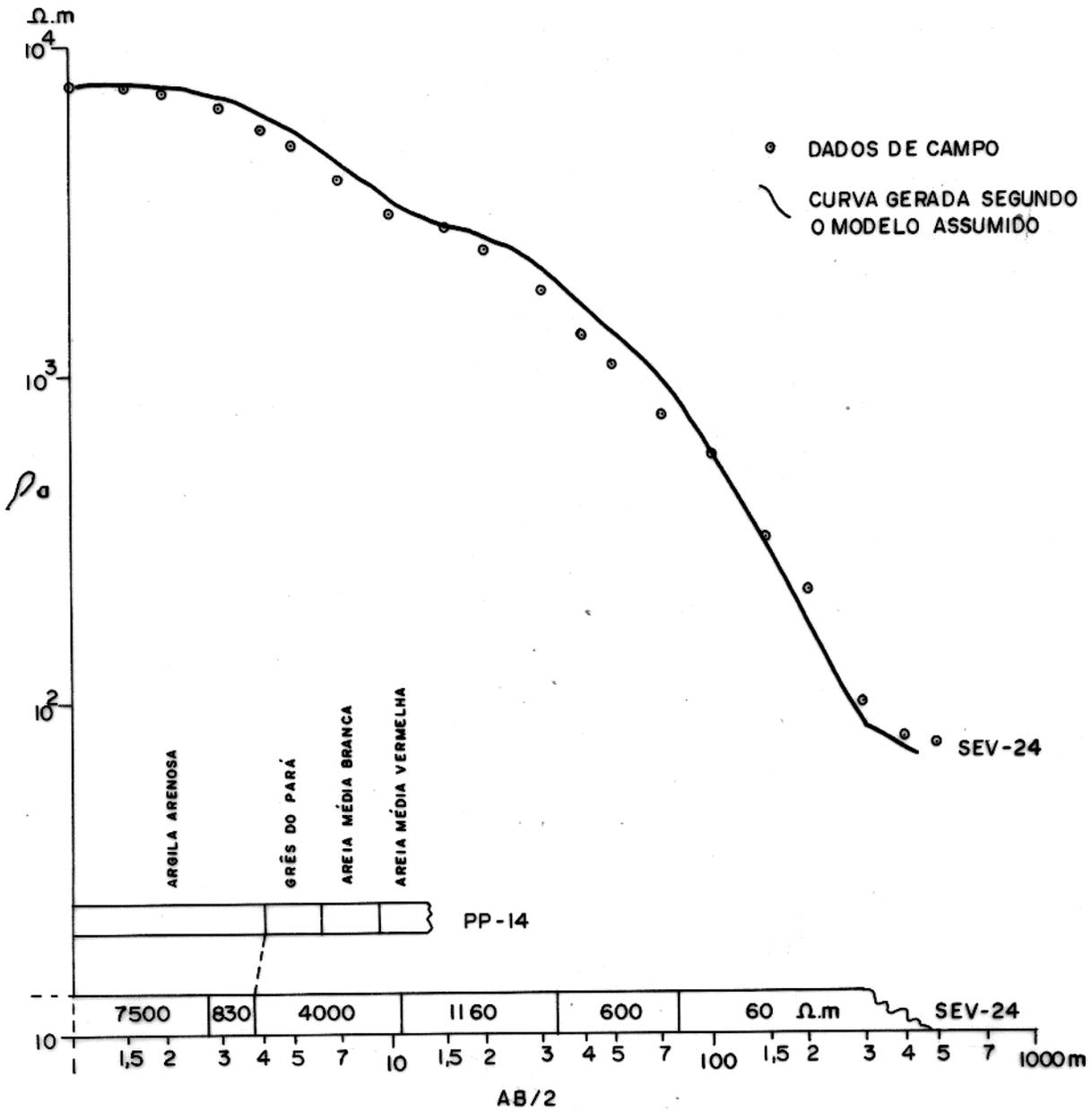


FIG. 25 - DESCRIÇÃO LITOLÓGICA DOS SEDIMENTOS DO POÇO PERFURADO Nº14. E A CURVA DA SEV-24 COM SUA INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

pactada, não atravessada pelo equipamento (Fig. 26).

Já o poço perfurado sobre a SEV nº 39 (PP 16), mais arenoso, inicia-se com uma camada de argila arenosa de 2 metros de espessura, seguindo-se camadas de areias médias de cores branca, vermelha e marrom-claro, que já chegavam a somar 11 metros de espessura quando da interrupção da perfuração do poço, devido ter-se atingido uma concreção compacta, novamente não atravessada pela sonda. O "grês do Pará" também aparece em meio a essa camada de areia, a partir da profundidade de 5,5 metros, com uma espessura de cerca de 30 centímetros (Fig. 27).

O poço 17, realizado sobre a SEV nº 4, mostrou uma camada de argila amarela com areia fina até 5,5 metros de profundidade, seguindo-se uma camada de 20 centímetros de argila vermelha com areia fina, quando novamente aparece uma camada de 60 centímetros de concreção laterítica. Segue-se uma sucessão de areias finas e médias, de cores marrom e vermelha, somando 6 metros de espessura. Uma camada de 10 centímetros de concreção laterítica bastante compacta sucede a uma camada de 20 centímetros formada por lentes de argila amarela, branca e vermelha. A partir daí, observa-se uma sequência de sedimentos nitidamente argilosos, de cores variadas, que já somavam 9 metros de espessura quando se interrompeu a perfuração do poço, intercalados por duas finas camadas de areia argilosa (Fig. 28).

As Figuras 25, 26, 27 e 28 mostram as espessuras e descrições litológicas dos sedimentos atravessados pelos quatro furos de sondagem (PP 14, PP 15, PP 16 e PP 17), e também as curvas e interpretações geofísicas das sondagens elétricas de número 24, 21, 39 e 4.

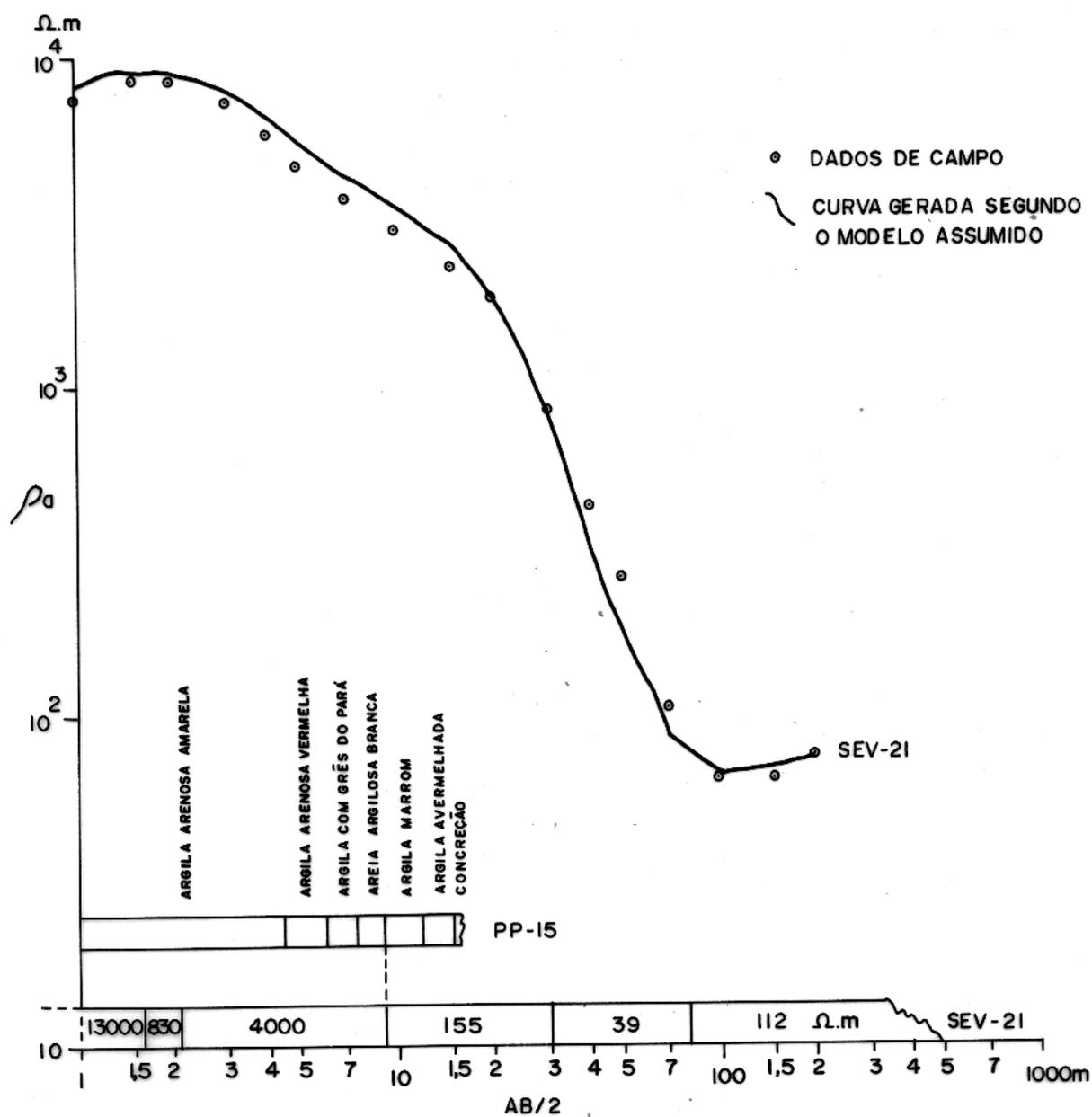


FIG. 26- DESCRIÇÃO LITOLÓGICA DOS SEDIMENTOS DO POÇO PERFURADO Nº 15,  
 E A CURVA DA SEV-21 COM SUA INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

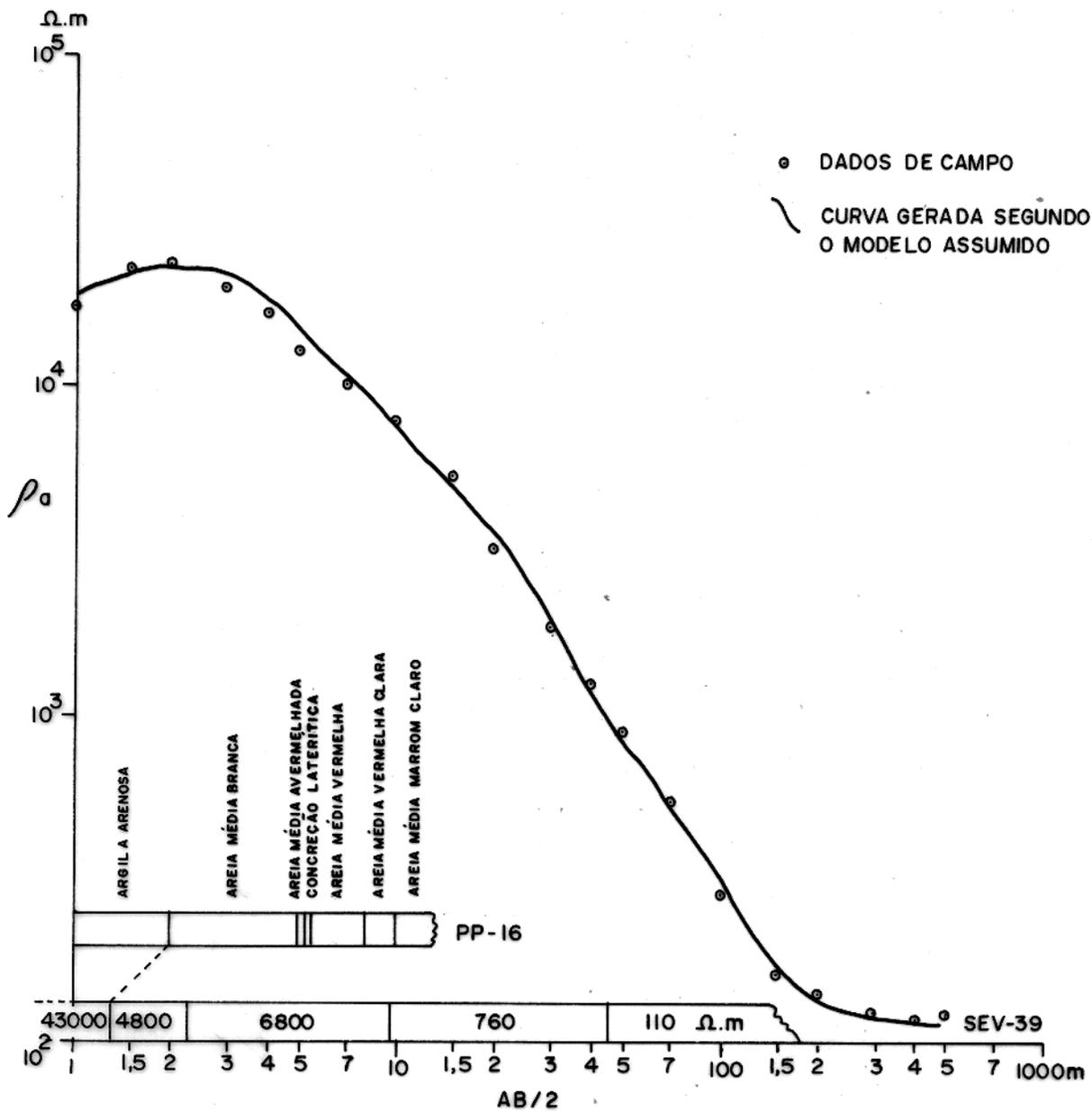


FIG. 27 - DESCRIÇÃO LITOLÓGICA DOS SEDIMENTOS DO POÇO PERFURADO Nº 16, E A CURVA DA SEV-39 COM SUA INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

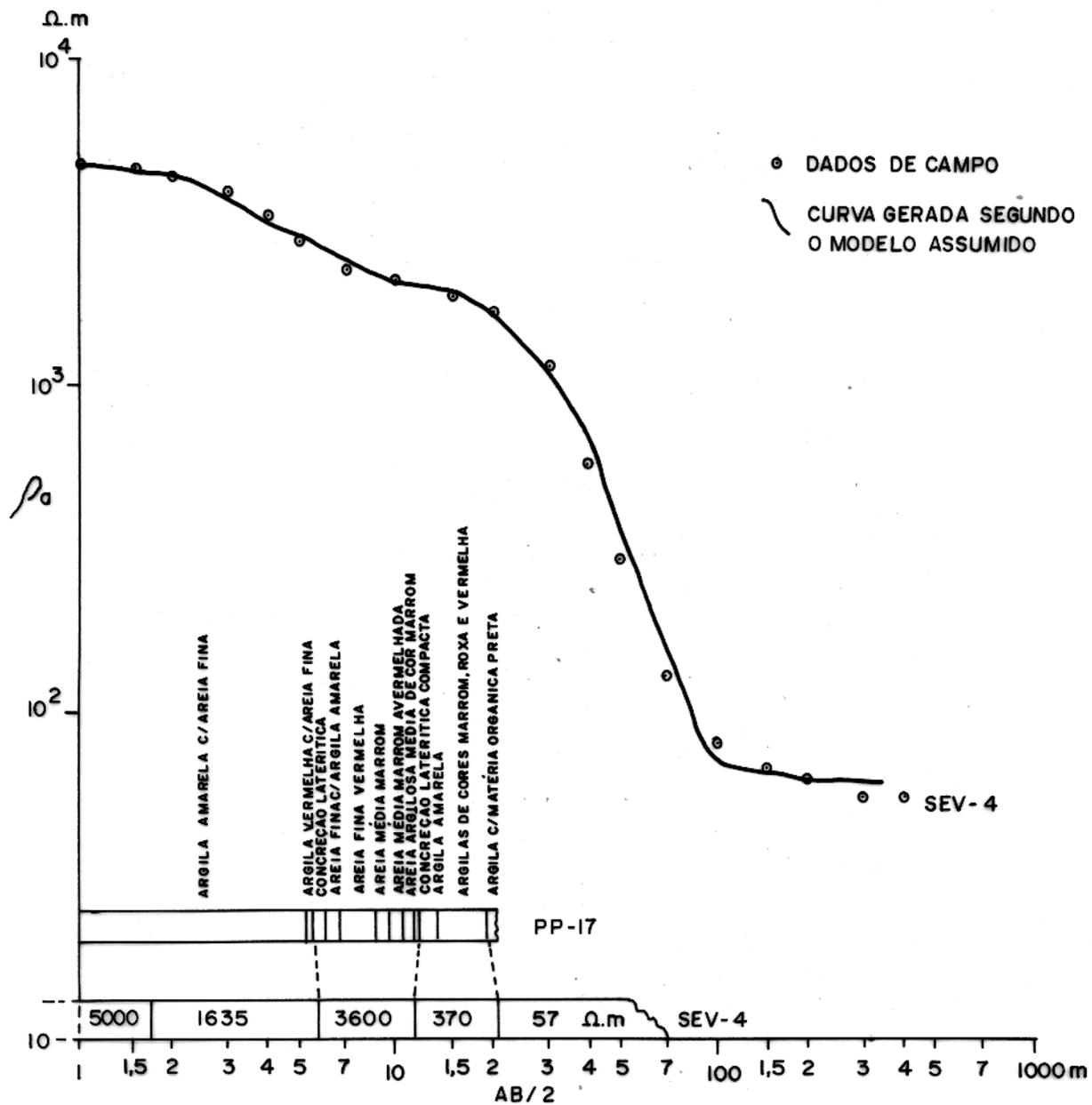


FIG. 28 - DESCRIÇÃO LITOLÓGICA DOS SEDIMENTOS DO POÇO PERFORADO Nº 17 E A CURVA DA SEV-4 COM SUA INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA.

CAPÍTULO 6

## INTERPRETAÇÃO E CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o tratamento integrado com grupo de curvas, indicaram existir na área camadas com resistividades que variam desde 5 até 43000  $\Omega$ .m.

Esse tratamento integrado dos resultados geofísicos levou-nos a delimitar um horizonte superior que apresenta-se bastante diversificado em toda a área estudada, com as resistividades das camadas formadoras deste horizonte tendo valores entre 830 e 43000  $\Omega$ .m. Este horizonte constitui-se de solo (altos valores de resistividade), e também argila ou areia com argila em alguns locais (valores de resistividade intermediários). Sua espessura também varia de local para local, situando-se sua média em torno de 5,0 metros. Devido os valores da resistividade das camadas mais superficiais mudarem segundo as variações sazonais no nível hidrostático e grau de umidade do solo, não se pode correlacionar precisamente a espessura do horizonte superior com o nível piezométrico. Mas, aparentemente, esse valor médio (5,0 metros) para a profundidade da base desse horizonte mais superficial é maior que o nível hidrostático observado na maior parte da área.

Subsequente a esse primeiro horizonte mais superficial, ocorre uma sucessão de camadas com resistividades entre 4000 e 500  $\Omega$ .m, formando um pacote que foi interpretado como constituído de sedimentos arenosos (ou areia com um pouco de argila) contendo água doce, ou seja, um aquífero. Curvas de contorno construídas a partir das espessuras dessa estrutura geofísica nos pontos de locali-

zação das sondagens elétricas, levou-nos a delimitar três sub-áreas (A, B e C) para as quais se considerou arbitrariamente valores de espessura iguais ou superiores a 20 metros (Fig. 20). Estas três sub-áreas assim delimitadas, chegam a cobrir cerca de 40% da área total estudada.

Destas três sub-áreas apontadas como as mais favoráveis para exploração de água subterrânea de todo o município, duas delas (A e B) estendem-se no sentido E-W, com cerca de 35 e 40 Km<sup>2</sup> de superfície, estando respectivamente localizadas no norte e no centro da área. A outra (C), cobrindo uma superfície de aproximadamente 5 Km<sup>2</sup>, situa-se no Sul do Município, perto de Condeixa (ver Fig. 20).

Considerando-se toda a área estudada, a profundidade até o topo desse aquífero varia de 1,0 a 17,0 metros (Fig. 21).

Em termos gerais, as três sub-áreas coincidem com as estruturas de maiores resistividades definidas a partir dos mapas com curvas de isoresistividade para as profundidades de 10, 25 e 50 metros (Figuras 17, 18 e 19), e também no mapa com curvas de contorno dos valores de T (Fig. 22).

Sucedendo esse aquífero, estão as camadas de baixa resistividade (entre 500 e 5  $\Omega$ .m), interpretadas como sendo predominantemente argilosas, e/ou constituídas de sedimentos com água salobra.

Os quatro furos de sondagens comprovaram a interpretação até à profundidade máxima de 21 metros. Dois destes furos (PP 14 e PP 16), realizados nas sub-áreas A e B, interpretadas como bons aquíferos (Fig. 20), mostraram terrenos bem mais arenosos (Figuras

25 e 27). Os outros dois (PP 15 e PP 17), alocados fora daquelas três sub-áreas, apresentaram uma parcela considerável de sedimentos argilosos com algum material orgânico, tendo camadas de areia com apenas 1,5 e 6,0 metros de espessura, respectivamente (ver Figuras 26 e 28).

Dos perfis horizontais de resistividades mostrados nas Figuras 23 e 24, o perfil 4, realizado na sub-área A, apresenta maiores valores de resistividade que o perfil 6, que corta apenas uma parte da sub-área B (ver localizações dos perfis na Fig. 8). Observa-se ainda que não ocorrem bruscas descontinuidades de resistividade nas bordas dos corpos mais resistivos (A e B), com as mudanças nas resistividades se efetuando de modo gradual. As irregularidades nos perfis podem sugerir que os corpos resistivos têm estrutura interna, sendo não-homogêneos e/ou tendo espessuras variáveis. Uma justificativa alternativa para essas irregularidades poderia ser os efeitos de superfície.

Já os perfis 1 e 2, desenvolvidos a partir do igarapé de Jubim nos sentidos Sul-Norte (Perfil 1) e Norte-Sul (Perfil 2), não mostraram efeitos nítidos de infiltração de água salinizada. Embora eles iniciem-se com valores mínimos de resistividade nos locais adjacentes ao rio, isto pode ser explicado pela baixa topografia dos terrenos imediatamente próximos ao rio.

O perfil 2, realizado quase inteiramente sobre terrenos altos, apresenta valores de resistividade 10 vezes maiores que o perfil 1, feito sobre terrenos baixos e alagados.

O valor médio de resistividade da camada resistiva superior do aquífero ( $\rho = 4000 \Omega.m$ ), e também a resistividade média das águas das amostras colhidas nos poços escavados na área ( $\rho_w = 400$

$\Omega.m$ ), possibilitou-nos estimar a porosidade ( $\phi$ ) dos sedimentos da parte mais rasa do aquífero através da Lei de Archie (GRANT & WEST, 1965). Usou-se a relação  $\rho = \rho_w a \phi^{-m}$ , onde  $\rho$  e  $\rho_w$  são as resistividades da formação e da água nela contida, com  $a$  e  $m$  sendo constantes empíricas. Como a formação que continha água era arenosa, assumimos os valores de  $m = 1,5$  e  $a = 0,8$ , obtendo, assim, um valor de 19% para a porosidade ( $\phi$ ) desta formação.

Trabalho anterior de geofísica realizado na ilha do Marajó (IDESP, 1974), aponta como sendo da ordem de 1000  $\Omega.m$  os maiores valores das resistividades das camadas nas regiões de Cachoeira do Arari, Ponta de Pedras, Soure e, inclusive, Salvaterra. Em nossa interpretação das sondagens elétricas, as camadas apresentaram valores de até 43000  $\Omega.m$ , sendo vários os locais em que se obteve valores superiores a 15000  $\Omega.m$  para as resistividades das camadas mais superficiais.

Considerando os valores das resistividades das camadas interpretadas como formadoras do aquífero em Salvaterra (de 4000 a 500  $\Omega.m$ ), nota-se que também são superiores aos observados para os aquíferos de Ponta de Pedras (de 1000 a 200  $\Omega.m$ ) e Rio Paracauari (de 300 a 20  $\Omega.m$ ), conforme os trabalhos de KOBAYASHI (1978) e CAVALCANTI et alii (1978), já mencionados no Capítulo 2.

Estas maiores resistividades observadas para os sedimentos arenosos de Salvaterra, provavelmente deve-se ao fato de a área de Salvaterra ser geologicamente mais velha que as outras duas regiões (Ponta de Pedras e Rio Paracauari). Pode-se também sugerir que a drenagem, bem mais desenvolvida em Salvaterra (a área mais alta da ilha) que nas outras duas regiões, seja responsável pela lavagem e transporte de íons, o que resultaria em valores mais ele

vados para as resistividades das camadas da área estudada.

O relatório do IDESP (1974) descreve ainda um substrato resistente a uma profundidade de 100 metros, existente em toda a ilha. Porém, nas 63 interpretações das nossas 65 sondagens elétricas verticais realizadas na área, a última camada tem resistividade quase sempre menor que 200  $\Omega$ .m, com apenas 4 delas apresentando valores de resistividade superiores a 200  $\Omega$ .m para a última camada, e a profundidades de 30, 42, 64 e 84 metros, sendo pouco provável ser bom aquífero.

Em resumo, este trabalho proporcionou a descoberta e delimitação de três sub-áreas cobrindo uma superfície total de 80 Km<sup>2</sup>, nas quais o aquífero tem espessura superior a 20 metros. Além disso, quase toda a área restante também dispõe de aquífero raso, embora menos espesso. Quanto à qualidade, concluímos que o município de Salvaterra apresenta a melhor água subterrânea das regiões já estudadas na ilha, sem os problemas de salinização que são comuns em algumas áreas da parte leste da Ilha do Marajó.

A descoberta desses recursos de água subterrânea de maior porte (sub-áreas A, B e C) também possibilitará uma melhor orientação para a localização de futuros projetos agrícolas ou industriais, que venham a exigir exploração em larga escala dos recursos de água subterrânea do município de Salvaterra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAM (1974). Folha SA.22 Belém; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. V.5 (Levantamento de recursos minerais, 5).
- CAVALCANTI, G.M.L.; SAUCK, W.A.; RIJO, L.(1978). Geofísica Aplicada à prospecção de água subterrânea na área do Rio Paracaurí, Ilha de Marajó, Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, 1978. Resumos das Comunicações. Boletim (1) :p.354.
- CUTRIM, Elen & SAUCK, William A. (1978). Condutividade das águas da parte oriental da Ilha e da Baía do Marajó. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, 1978, Resumos das Comunicações. Boletim (1):p.354-5.
- GHOSH, D.P. (1971). The Application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. Geophysical Prospecting, 19(2):p.192-217, June.
- GRANT, F.S. & WEST, G.F. (1965). Interpretation theory in applied geophysics. New York, McGraw-Hill. 584 p. (International Series in the Earth Science).
- IDESP (1974). Estudos integrados da Ilha de Marajó; relatório. Belém. 332 p.
- KELLER, George V. & FRISCHKNECHT, Frank C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford; New York; Toronto, Pergamon Press. 517 p.

- KOBAYASHI, Carmelina Nobuko (1979). Métodos geofísicos aplicados à prospecção de água subterrânea no Município de Ponta de Pedras - Ilha de Marajó - Pará. Belém, UFPa.-NCGG. 93 p. ( Tese de mestrado).
- MERCADO, Abraham (1974). Isotopes in hydrology; relatório. s.l, International Atomic Energy Agency. 10 p.
- O.E.A. (1974). Marajó, um estudo para o seu desenvolvimento. Washington, Departamento de Desenvolvimento Regional. 124.p
- ORELLANA, Ernesto & MOONEY, Harold M. (1966). Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Madrid, Interciência
- PIUCI, Jacyro & FENZL, Norbert (1978). Características físico-químicas das águas subterrâneas rasas de Ponta de Pedras (Ilha de Marajó) e suas consequências para uso humano e agrícola. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, 1978. Resumo das Comunicações. Boletim (1): p.353.
- RIJO, Luiz; PELTON, W.H.; FEITOSA, E.C.; WARD, S.H. (1977). Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brazil. Geophysics, 42 (4):p.811-22, June.
- SCHALLER, Hannfried; VASCONCELOS, Djalma; CASTRO, Joel (1971). Estratigrafia preliminar da bacia sedimentar da foz do Rio Amazonas. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, 25, São Paulo, 1971. 3:p.189, setembro. (Anais).
- ZOHDY, Adel A.R. (1965). The Auxiliary point method of electrical sounding interpretation, and its relationship to the dar zarrouk parameters. Geophysics, 30 (4):p.644-60, August.