

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE POS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ESTUDO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA COM MÉTODOS ELÉTRICOS NA REGIÃO
DO SEMI-ÁRIDO DE PATOS-PB

Tese Apresentada por

SEBASTIÃO VITORINO FILHO

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

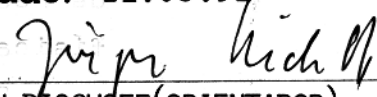
Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

Geociências da

Universidade Federal do Pará

Aprovado: 21.03.91

Comitê de Tese


JURGEN H. BISCHOFF (ORIENTADOR)


HANS DIETER MAX SCHUSTER


OM PRAKASH VERMA

A minha irmã Marleide
e aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Jürgen H. Bischoff pela aceitação da orientação deste trabalho.

Ao Dr. Hans Dieter Max Schuster pela co-orientação e sugestões na parte de interpretação.

A todos os professores do Departamento de Geofísica do Núcleo de Geociências da UFPA - Belém, Pará.

A todos os colegas de curso, especialmente a Jessé Carvalho, pela ajuda dentro e fora de Universidade.

A todos os funcionários do Núcleo de Geociências, especialmente aos bibliotecários.

Ao Departamento de Mineração e Geologia do CCT/UFPb - Campina Grande, Paraíba - por possibilitar a realização do Curso de Pós-Graduação na UFPA.

Ao Professor Eduardo Jorge Bonates pela colaboração na editoração deste trabalho.

A todos os funcionários do Departamento de Mineração e Geologia da UFPb, especialmente a Francis-Mary Nogueira de Lima pelo incentivo na conclusão deste trabalho.

Aos fazendeiros de Santa Luzia e Patos pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A Superintendência de Execução de Projetos (SUEP/UFPb) pelo apoio financeiro à pesquisa.

A todos os meus familiares que de forma direta ou indireta ajudaram na elaboração desta tese.

SUMARIO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMENTOS	II
SUMARIO	IV
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VII
RESUMO	01
ABSTRACT	03
1. INTRODUÇÃO	05
1.1. OBJETIVOS	05
1.1.1. Objetivos Gerais	08
1.1.2. Objetivos Específicos	08
2. GENERALIDADES DA AREA	09
2.1. LOCALIZAÇÃO E ACESSO	09
2.2. CLIMA	10
2.3. VEGETAÇÃO	10
2.4. ASPECTOS SOCIO-ECONOMICOS	11
2.5. GEOLOGIA	13
2.5.1. Morfologia e Hidrografia	13
2.5.2. Geologia Geral	14
2.5.3. Geologia Local	17

3. FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ADOTADOS	19
3.1. MÉTODO DE ELETRORESISTIVIDADE	19
3.2. TEORIA DE ANÁLISE DAS CURVAS DE ELETRORESISTIVIDADE ..	21
3.3. TEORIA DE ANISOTROPIA HORIZONTAL	24
3.4. MÉTODO DE ELETROMAGNETISMO	26
3.5. TEORIA DE ANÁLISE DE MEDIÇÕES ELETROMAGNÉTICAS	29
4. METODOLOGIAS GEOFÍSICAS ADOTADAS	31
4.1. METODOLOGIA DE ELETRORESISTIVIDADE	31
4.1.1. Aparelho de Eletroresistividade	31
4.1.2. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)	32
4.1.3. Interpretação Adotada para Curvas de Resistividade..	33
4.1.4. Sondagem Elétrica Vertical Radial (SEVR)	35
4.1.5. Interpretação Adotada para SEVR	36
4.1.6. Perfilagem Elétrica	39
4.1.7. Aparelho de Medição de Condutividade	40
4.2. METODOLOGIA DE ELETROMAGNETISMO	40
4.2.1. Aparelho Eletromagnético	40
4.2.2. Perfilagem Eletromagnética	41
4.2.3. Interpretação Adotada para os Perfis EM	42
5. AQUISIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO	45
5.1. RESULTADOS DA ÁREA I	45
5.1.1. Mapeamento de Eletroresistividade	45

5.1.2. Perfil Piloto P ₁	47
5.2. RESULTADOS DA AREA II	50
5.2.1. Direcção das Zonas Fraturadas	51
5.2.2. Detecção das Zonas Fraturadas	56
5.3. RESULTADOS DA AREA III	62
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
7. CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	74
APÊNDICE A	77
APÊNDICE B	80
APÊNDICE C	96

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Fig.1	- Mapa do Estado da Paraíba com as 3 Áreas de Estudo (I, II, III)	07
Fig.2	- Mapa Geológico da Região de Patos - Sta. Luzia, PB Carta Geológico da Província Scheelitífera da Borborema 1:250.000	15
Fig.3	- Esquema do Método de Eletroresistividade	19
Fig.4	- Esquema do Arranjo Schlumberger	21
Fig.5	- Esquema do Arranjo Wenner	21
Fig.6	- Esquema do Semi-Espaço Estratificado Inclinado ...	24
Fig.7	- Princípio do Método Eletromagnético	27
Fig.8	- Representação Gráfica da Função de Resposta Eletromagnética	29
Fig.9	- Fluxograma Esquemático do Programa de Interpretação para as SEVs	34
Fig.10	- Aproximação do Polígono pelo Tensor $[\rho_R^a]_{xy}$	37
Fig.11	- Diagrama de Argand de Sistema Horizontal para Semi-Plano Vertical	43
Fig.12	- Mapa de Isoresistividade (a = 75m) da Área I	46
Fig.13	- Perfil Piloto P1 a) Perfil Eletromagnético (f = 2640Hz, s = 50m) b) Perfil de Eletroresistividade (a = 25m) c) Perfil Geológico a partir das 7 SEVs	48
Fig.14	- Perfil Litológico para Calibração da SEV 02 do Perfil Piloto P1	49

Fig.15 - Sondagem Elétrica Vertical Radial na Area II-SEVR 01	
a) Polígono da Anisotropia Elétrica Horizontal	
b) Variação do Grau de Fraturamento versus Profundidade Relativa	
c) Ângulo Azimutal Médio da Zona Fraturada no Local 01	53
Fig.16 - Sondagem Elétrica Vertical Radial na Area II-SEVR 02	
a) Polígono da Anisotropia Elétrica Horizontal	
b) Variação do Grau de Fraturamento versus Profundidade Relativa	
c) Ângulo Azimutal Médio da Zona Fraturada no Local 02	54
Fig.17 - Sondagem Elétrica Vertical Radial na Area II-SEVR 03	
a) Polígono da Anisotropia Elétrica Horizontal	
b) Variação do Grau de Fraturamento versus Profundidade Relativa	
c) Ângulo Azimutal Médio da Zona Fraturada no Local 03	55
Fig.18 - Perfis Geoelétricos ao longo do Perfil P-01 na Area II	
a) Perfil Eletromagnético ($f = 2640\text{Hz}$ e $s = 50\text{m}$)	
b) Perfil Eletromagnético ($f = 880\text{Hz}$ e $s = 50\text{m}$)	
c) Perfil de Eletroresistividade ($a = 25\text{m}$)	57
Fig.19 - Compilação dos 12 Perfis Eletromagnéticos da Area II ($f = 2640\text{Hz}$)	59
Fig.20 - Compilação dos 12 Perfis Eletromagnéticos da Area II ($f = 880\text{Hz}$)	60
Fig.21 - Area II com os Locais das 3 SEVRs e os Alinhamentos Principais das Zonas Fraturadas	61
Fig.22 - Mapa Geológico da Area III e os Locais das SEVs Executadas	63
Fig.23 - Representação dos 4 Grupos Típicos das SEVs da Area III	64
Fig.24 - Mapa de Isoespessura da Cobertura na Area III baseada nas 60 SEVs	67

Fig.25 a 26 - 07 SEVs da Area I	78 a 79
Fig.27 a 38 - 12 Perfis Elétricos e Eletromagnéticos da Area II	84 a 95
Fig.39 - Calibração da SEV 10	97
Fig.40 - Calibração da SEV 25	98
Fig.41 - Calibração da SEV 38	99
Fig.42 - Calibração da SEV 51	100
Fig. 43 a 62 - 60 SEVs da Area III	101 a 120

TABELAS

Tab.1 - SEVR 01	81
Tab.2 - SEVR 02	82
Tab.3 - SEVR 03	83

RESUMO

O Nordeste do Brasil, em particular a região semi-árida do Estado da Paraíba, é muito castigada pelos períodos de grandes estiagens e escassez de recursos hídricos. A água de superfície não supre a demanda da região, portanto, a busca de água subterrânea e sua exploração é uma constante nos programas dos Governos Federal e Estadual.

Nesta região, ocorrem geralmente apenas aquíferos aluviais rasos e aquíferos nas fraturas do embasamento cristalino. Tradicionalmente, as fraturas no cristalino são prospectados através de estudos aerofotogramétricos e geoestruturais, com média de 30% de furos secos. O dimensionamento dos aquíferos aluviais é feito através de perfurações sistemática do subsolo, que é uma metodologia muito demorosa e cara.

O objetivo deste trabalho é mostrar que o emprego de métodos geofísicos, especialmente os métodos geoeletricos, são eficazes e econômicos para localizar e avaliar áreas promissoras de água subterrânea, tanto nos aquíferos aluviais como nos cristalinos.

Neste trabalho, foram aplicados o convencional método da eletroresistividade e o método eletromagnético, ainda pouco usado na prospecção de água subterrânea, em tres áreas

selecionadas na região semi-árida de Patos - Pb, sendo duas representantes dos aquíferos aluviais e uma representante dos aquíferos cristalinos.

Nos aquíferos aluviais, foi determinada a profundidade até o embasamento cristalino através de sondagens elétricas verticais (SEVs), e os respectivos limites laterais foram mapeados com perfilagens de eletroresistividade. Os resultados das SEVs são coerentes com as profundidades obtidas pelas sondagens mecânicas de confirmação mostrando, assim, a aplicabilidade desta metodologia na pesquisa deste tipo de aquífero.

No aquífero cristalino, inicialmente determinou-se a orientação geral das zonas fraturadas do embasamento cristalino pela técnica modificada da sondagem elétrica vertical (SEV Radial) e, em seguida, a localização exata em planta das mesmas foram determinadas com perfilagens de eletroresistividade e eletromagnéticas no sistema horizontal coplanar nas frequências 880 Hz e 2640 Hz.

Os resultados dos dois métodos utilizados foram satisfatórios, porém, a perfilagem eletromagnética é mais rápida, necessita de menos mão de obra, reduzindo assim os custos de prospecção de água subterrânea no embasamento cristalino.

ABSTRACT

The Northeast Brazil and the semi-arid region of the State of Paraíba in particular suffers frequent droughts and lack water resources. Surface water does not meet the demand resulting in the search for groundwater as an important item in the development programs of the federal and state governments.

In the semi-arid regions occur shallow aquifers and aquifers of fractured crystalline basement rocks. Fractures in crystalline rocks are mostly prospected using aerial photographs and geologic structure studies, resulting in on the average 30% of dry wells among the wells drilled in the region. The alluvial aquifer dimensioning is done by systematic drilling which becomes tedious and expensive in the long run.

The objective of this study is to show that geophysical techniques, geoelectrical in particular, are efficient and economical in finding and evaluating areas suitable for groundwater storage in alluvium or crystalline rocks.

The traditional resistivity and the less used eletromagnetic methods in groundwater prospecting were applied in this study. For this purpose three semi-arid areas were selected in

near the city of Patos, Paraíba, representing two alluvial and one crystalline aquifers.

In the case of alluvial aquifers the depth up to the crystalline basement was determined through vertical electrical soundings (VESs) and the lateral limits were mapped through electrical profiling. The results of the VESs are in agreement with the drilling depth values, thus proving the resistivity method as being suitable for study of shallow and narrow alluvial aquifers.

In the case of crystalline aquifers a preliminary determination of the general direction of fracture zones was performed through a modified vertical electrical sounding (radial VES). The exact location of these zones was done by electrical and electromagnetic profiling in horizontal loop technique operating with two frequencies of 880 Hz and 2640 Hz.

The results of both the methods applied in this study were found to be satisfactory, however, the electromagnetic profiling is faster and requires less manpower, thus, reducing the operating costs in groundwater prospecting in crystalline rocks.

1. INTRODUÇÃO

Na região do semi-árido paraibano (Fig. 01), o nível de precipitação pluviométrica é considerado muito baixo. A economia da região depende diretamente do nível de precipitação e do armazenamento anual de água. A construção de barragens de médio e grande porte é uma constante nos programas dos Governos Federal e Estadual. Entretanto, este tipo de armazenamento muitas vezes é impraticável, devido aos seguintes fatores:

- a. Inundação de grandes áreas férteis;
- b. Altos custos das obras;
- c. Incapacidade dos mananciais fluviais onde pequenas barragens secam a cada período de estiagem;
- d. Salinização.

ALBUQUERQUE (1984) afirma que poços tubulares nesta região apresentam vazão média de 4.000 litros/hora, fato que não deixa de ser bastante modesto em termos de agricultura irrigada. A prospecção e captação de água subterrânea muitas vezes apresenta-se como solução adequada para pequenos e médios produtores rurais.

Na região Pré-Cambriana, existem basicamente dois tipos de aquíferos: aquíferos aluviais e aquíferos nas fraturas das rochas cristalinas. Em geral, os aquíferos aluviais são

abertos e rasos, não chegando aos 15m de profundidade até embasamento cristalino. Contém água de boa qualidade, porém, em quantidade reduzida, podendo mesmo secar totalmente nos períodos de grandes estiagens. Os aquíferos cristalinos são o manancial de água subterrânea mais explorado na região. Embora não contenha água de boa qualidade, muitas vezes imprestável para o consumo humano, é aproveitada na irrigação e pecuária.

Entre os aquíferos aluviais, é possível distinguir-se dois tipos: aquíferos largos sem forma definida e aquíferos estreitos que acompanham a forma da calha dos rios e riachos. Três áreas, representativas de cada tipo, foram selecionadas para o estudo hidrogeológico, assim distribuídas:

Area I - Aquífero aluvial estreito;

Area II - Aquífero cristalino;

Area III - Aquífero aluvial largo.

Atualmente, as empresas locais que prospectam água no cristalino, localizam seus poços utilizando fotografias aéreas para identificar estruturas geológicas promissoras de água, tais como: regiões fraturadas e falhadas. Este método, embora venha sendo usado há décadas, apresenta a seguinte deficiência: impossibilidade de determinar a localização exata de estruturas favoráveis à existência de água subterrânea, quando estiverem mascaradas pela cobertura sedimentar e vegetal.

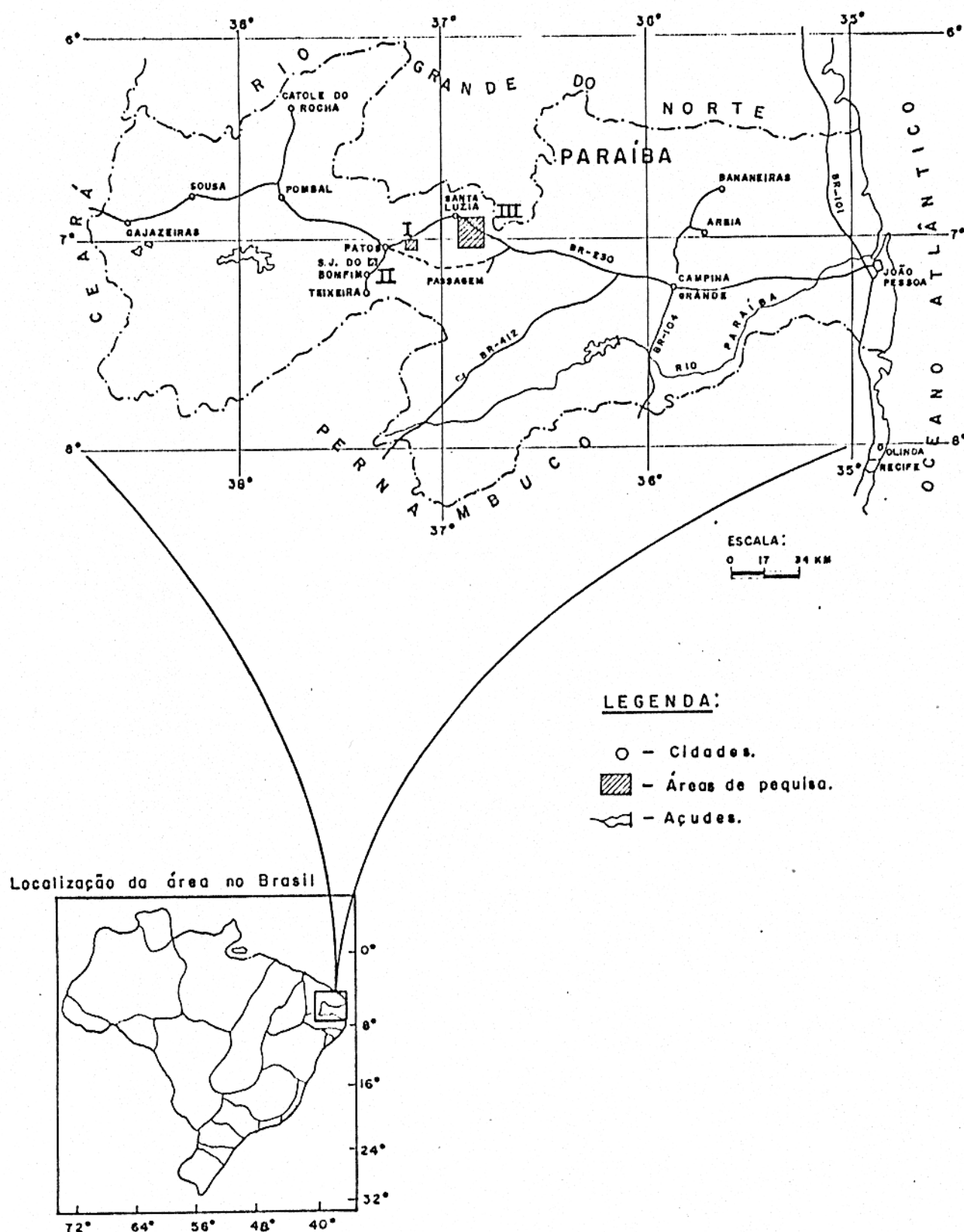


Fig.1 - Mapa do Estado da Paraíba com as 3 Áreas de estudo (I, II, III)

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - Objetivos Gerais

A finalidade deste trabalho é estudar os aquíferos típicos da região semi-árida da Paraíba através de métodos geofísicos, visando aumentar a eficiência da prospecção de água subterrânea, bem como diminuir seus custos operacionais.

1.1.2 - Objetivos Específicos

- a. Delimitação lateral e determinação da profundidade dos aquíferos aluviais (área I e III).
- b. Detecção de zonas fraturadas no embasamento cristalino (área II).
- c. Correlação dos resultados do tradicional método de eletroresistividade com o método eletromagnético.
- d. Comparação dos dois métodos geofísicos utilizados em termos de confiabilidade nos resultados obtidos, aplicabilidade instrumental e custos operacionais.

2. GENERALIDADES DA AREA

2.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

As áreas de pesquisa estão localizadas na região semi-árida do estado da Paraíba, nos municípios de Patos, São Jose do Bonfim e Santa Luzia.

As áreas I e II encontram-se na folha SB24-Z-D-I PATOS, sendo a primeira situada nas fazendas Pilões e Mirafram (distando 5km a leste da cidade de Patos) e a segunda situada na fazenda Santa Rosa 15km ao sul da cidade de Patos. As coordenadas geográficas destas áreas são: $37^{\circ}07'30''$ a $37^{\circ}21'25''$ de longitude oeste e $07^{\circ}00'00''$ a $07^{\circ}09'00''$ de latitude sul. A área III situada 5km a leste da cidade de Santa Luzia, acha-se na folha SB24-Z-B-V JARDIM DO SERIDO, delimitada pelas coordenadas geográficas $36^{\circ}48'42''$ a $36^{\circ}55'42''$ de longitude oeste e $06^{\circ}55'49''$ a $07^{\circ}03'00''$ de latitude sul.

Tendo João Pessoa - Pb como referência, o acesso às áreas I e III é tomado diretamente pela BR-230 (Transamazônica) que atravessa o estado, sendo que o acesso à área I situa-se na altura do km 324 e à área III no km 270. Tendo-se o acesso à área II, partindo-se da cidade de Patos pela BR-110 em direção a cidade de Teixeira na altura do km 12. Dentro das áreas, as vias de acesso são todas precárias, só sendo possível o trânsito normal de veículos durante o verão.

2.2 - CLIMA

Em todas as áreas, o clima predominante é o semi-árido, caracterizado pela desigualdade na distribuição pluviométrica, irregularidade interanual das chuvas, com média de 700mm e evapotranspiração de 1.700mm, portanto com um déficit de 1.000mm. O período de chuva inicia-se em fevereiro indo até junho, a insolação é de 3.000h/ano e a temperatura média anual é de 27.4° sendo a média das máximas 33.6° e das mínimas 22°. As temperaturas máximas mensais são registradas nos meses de novembro e dezembro e as mínimas em maio, junho e julho.

2.3 - VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal da região do semi-árido paraibano é caracterizada pela origem natural, relativamente aberta com amplo predomínio de caatinga, representada por formações arbustivas e herbáceas com grande número de cactáceos e remanescentes arbóreos. Os arbustos, de modo geral, são multigalhados, espinhosos e de folhas pequenas. Dentre a vegetação mais dominante destacam-se: aroeira, juazeiro, oitizeiro, pereiro, favela, catingueira e jurema; como representante xerófitas, temos: mandacaru, xique-xique, coroa de frade e facheiro. Estes tipos de vegetação, que fornecem alimentação para o gado e madeira para usos diversos, há ainda agricultura de feijão, milho e algodão, como também culturas cíclicas.

Na área I, destacam-se dois tipos de cobertura vegetal: patamar topográfico inferior (vale) do riacho Pilões onde as terras foram totalmente desmatadas, ficando apenas alguns remanescentes de juazeiro e oitizeiro dando lugar às culturas de frutas, capim, feijão e milho, e patamar superior, onde encontram-se a caatinga fechada, popularmente conhecida como "manga", destinada a engorda do gado quando o pasto está verde. Este patamar topográfico, as vezes é desmatado para dar lugar as culturas de milho e algodão. Na área II, a cobertura vegetal é apenas de capim destinado a ração animal. A área III é caracterizada por alto grau de produtividade nas culturas de frutas, feijão e algodão. Apenas uma percentagem reduzida desta área ainda não foi desmatada, correspondendo às encostas do "cinturão" de serras.

2.4 - ASPECTOS SOCIO-ECONOMICOS

A base econômica da região do semi-árido paraibano segue em ordem de importância: agricultura, pecuária e o extrativismo mineral.

Na agricultura, a principal cultura ainda é o algodão, embora venha sofrendo perdas devido às pragas, pois é deste produto que os agricultores esperam obter algum lucro. O feijão e o milho vêm em segundo lugar, sendo que estes produtos também funcionam como culturas de subsistência, uma vez

que os agricultores não os comercializam imediatamente, acumulando-os em grandes silos à espera da garantia da nova safra.

A pecuária assume importância de destaque na economia da região, porém, devido ao alto custo do investimento inicial e problemas com as secas, tem diminuído o rebanho de gado de corte, permanecendo o rebanho leiteiro. A região é auto-suficiente na produção de leite e seus derivados.

O extrativismo mineral apresenta importância considerável na economia da região, pois se trata de atividade que absorve parte da mão-de-obra desempregada oriunda da agricultura e pecuária durante os períodos de estiagens, diminuindo assim o êxodo para as grandes metrópoles. Os minerais extraídos na região são: scheelita, cassiterita, tantalita-columbita, água marinha e argilo-minerais, tais como: bentonita, caulinita e vermiculita.

Nestas atividades, que formam a base da economia da região, geralmente não existe pagamento de salário fixo. Os grandes latifundiários cedem suas terras aos trabalhadores e financiam uma feira semanal de produtos básicos para a sua sobrevivência até a colheita da safra, a qual é dividida ao meio; da metade que cabe ao trabalhador é subtraída sua dívida anual. Esta sistemática também funciona na pecuária, na proporção de três para um; na garimpagem desconta-se uma taxa de

10% para o proprietário.

2.5 - GEOLOGIA

2.5.1 - Morfologia e Hidrografia

A região, onde estão localizadas as três áreas de pesquisa, fica dentro de uma grande depressão entre as cidades de Junco do Seridó, ainda no Planalto da Borborema, e Patos, no sertão paraibano. O cinturão de serras estende-se para o norte e sul; ao centro forma-se uma grande planície com pequenas variações no relevo e com algumas interrupções do tipo "inselberg". Este cinturão de serras constitui-se em um divisor de água, onde nas épocas chuvosas, as nascentes de rios e riachos correm sobre rochas cristalinas em forma de gargantas com bastante violência, formando grandes quedas d'água.

A área I é caracterizada por dois patamares topográficos bem distintos: uma área plana imediatamente acima da calha do riacho Pilões e outro, afastado cerca de 300m, com cota superior de 15m a 20m. A calha do riacho Pilões é estreita (em média 20m de largura), não sendo suficiente para escoar as cheias, causando inundação no seu vale.

A área II é bastante plana, não tendo mais que 5m de variação do relevo. A hidrografia é representada pelo riacho Santa Rosa, tendo nascente nas proximidades da área de

pesquisa. O gradiente de escoamento é fraco e a calha muito aberta e rasa, confundindo-se com o vale.

A área III é a maior de todas sendo uma grande planície com cerca de 60km^2 limitada pelas serras do Fogo e Tubira, as quais chegam a medir 300m de diferença de cota. A hidrografia é representada pelos riachos do Saco, Chafariz e Barra, os quais unem-se a montante da barragem da cidade de Santa Luzia, tendo esta capacidade para armazenar 15 milhões de metros cúbicos. A jusante desta barragem, forma-se o rio Santa Luzia.

2.5.2 - Geologia Geral

As sequências de rochas metamórficas Pré-Cambrianas (Fig. 02) da área podem ser ordenadas em duas unidades: Unidade Pré-Ceará e Unidade Ceará (ANDRITZKY & BUSCH, 1975). Tectonicamente, a Unidade Pré-Ceará é caracterizada pelo forte dobramento Algoquiano e pela migmatização que mascaram os elementos das estruturas anteriores. Esta unidade compõe-se de gnaisses facoidal e flaser, gnaisses de biotita e muscovita homogêneo e de granulação fina até média, gnaisses arcósio e orto-gnaisses com intercalação de micaxistos de muscovita e biotita, quartzito e itabiritos. Além destes elementos, encontram-se incluídos mármore, gnaisses calco-silicático e anfibolitos, que podem estar

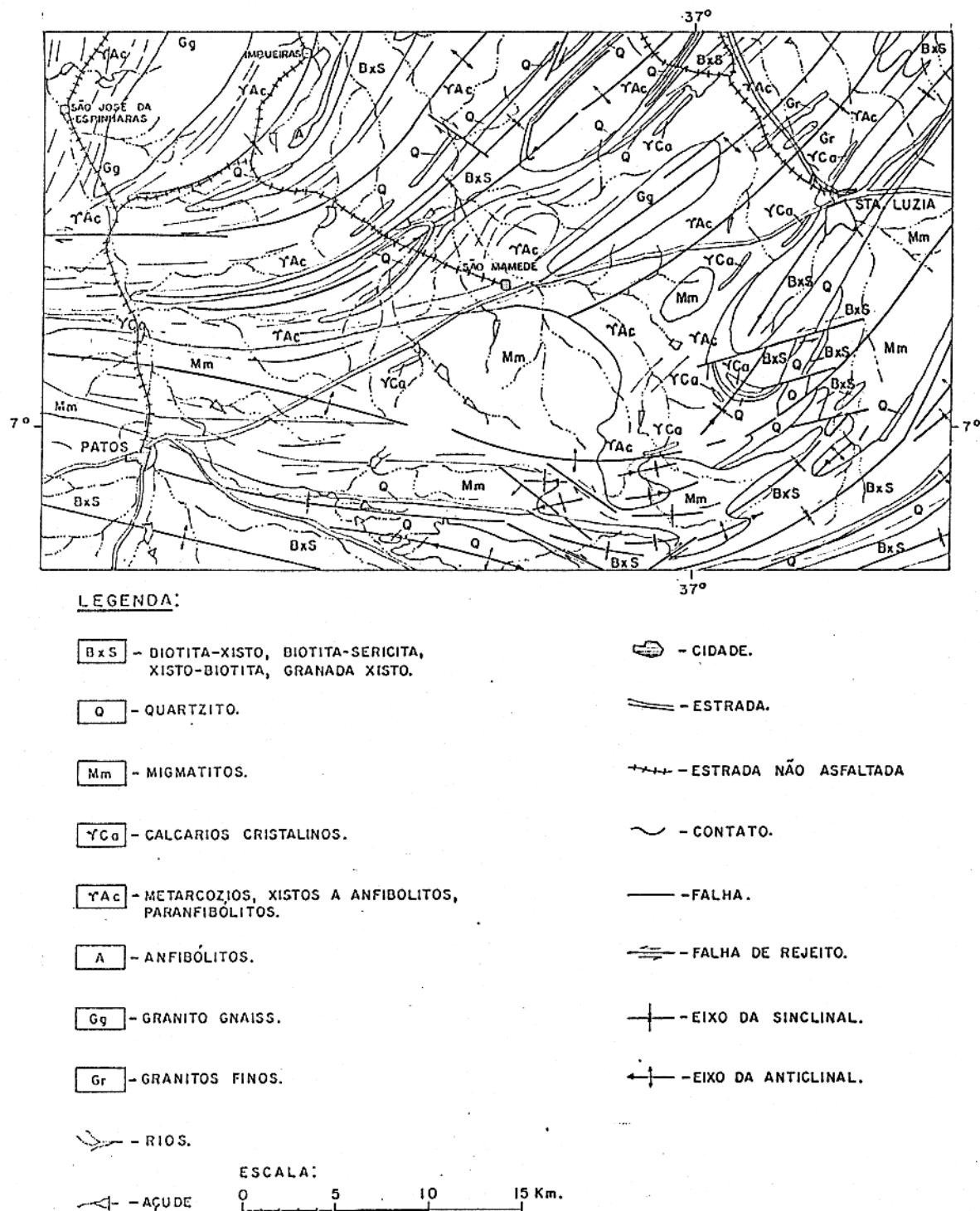


Fig.2 - Mapa Geológico da Região de Patos - Sta. Luzia PB
 Carta Geológica da Província Scheelitífera da Borborema 1:250.000 (MEDEIROS e ALBUQUERQUE, 1969)

transformados, parcialmente ou por inteiro, em tactitos. Em relação às rochas da Série Ceará, encontram-se os gnaisses da Série Pré-Ceará dobrados mais intensamente.

A Série Ceará, que tem em alguns pontos 2.000m de espessura, apresenta dois ciclos de sedimentação distintos. O primeiro chamado de Grupo Caicó e acima deste, o Grupo Seridó.

O Grupo Caicó contém as Formações Parelhas, Quixaba e Florânia. A Formação Parelhas começa a leste de nossa área de estudo com um quartzito de mais de 600m de espessura, que vai se transformando, na direção oeste e noroeste, numa sequência alternante de gnaiss arcósio e paragnaisse com intercalações de quartzito. A Formação Quixaba contém micaxistos e paragnaisse ricos em biotita, os quais podem conter intercalações de gnaiss calco-silicato e mármore. A Formação Florânia contém gnaiss arcósio bandeado em alternância com micaxistos e intercalações de quartzitos ferríferos, anfibolitos e zonas calco-silicáticas. O Grupo Caicó tem a forma de cunha, diminuindo fortemente sua espessura de leste para oeste e noroeste, chegando a extinguir-se na borda da área de estudo.

O Grupo Seridó contém as Formações Quartzito São José de Seridó e Micaxistos Seridó. O quartzito São José do Seridó é formado de quartzito na base, sobre os quais surgem

mármore de pouca espessura e tactitos dispersos. Os micaxistos Seridó são monótons e de grande espessura. Vale salientar que os limites entre estas formações são cronológicos e não limites de fácies.

2.5.3 - Geologia Local

De acordo com a descrição da geologia geral é de se esperar que localmente exista apenas o cristalino Pré-Cambriano; no entanto, outro litotipo, pouco expressivo para ser mencionado no item 2.5.2 (Geologia Geral), também está presente na área; são os sedimentos Quaternários.

Em todas as áreas, o comportamento geológico local é bastante semelhante, havendo mudança apenas na litologia, porém os elementos estruturais são os mesmos, tais como: direção preferencial de fraturamento cristalino sempre entre norte-nordeste, observada pela direção preferencial da correnteza dos rios e riachos, e direção principal da lineação das rochas sempre entre leste-nordeste, exceto onde houve intrusões localizadas, mascarando os elementos estruturais como no caso da área I. A área II é totalmente desprovida de cobertura sedimentar, apresentando apenas solo de pequena espessura acima do cristalino, onde pode ser observadas fissuras de até 15cm de largura. Nas áreas I e III

existe cobertura sedimentar sobre o embasamento cristalino com um máximo de 10m de espessura. Em ambas as áreas estes sedimentos apresentam-se bastante heterogêneos, contendo grandes blocos destacados do cristalino, até areia fina e intercalações de argila.

3.FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS ADOTADOS

3.1 - MÉTODO DE ELETRORESISTIVIDADE

O método de eletroresistividade consiste em enviar uma corrente elétrica contínua ao subsolo através dos eletrodos A e B, medindo-se em seguida a diferença de potencial elétrica gerada entre os eletrodos M e N (Fig. 3).

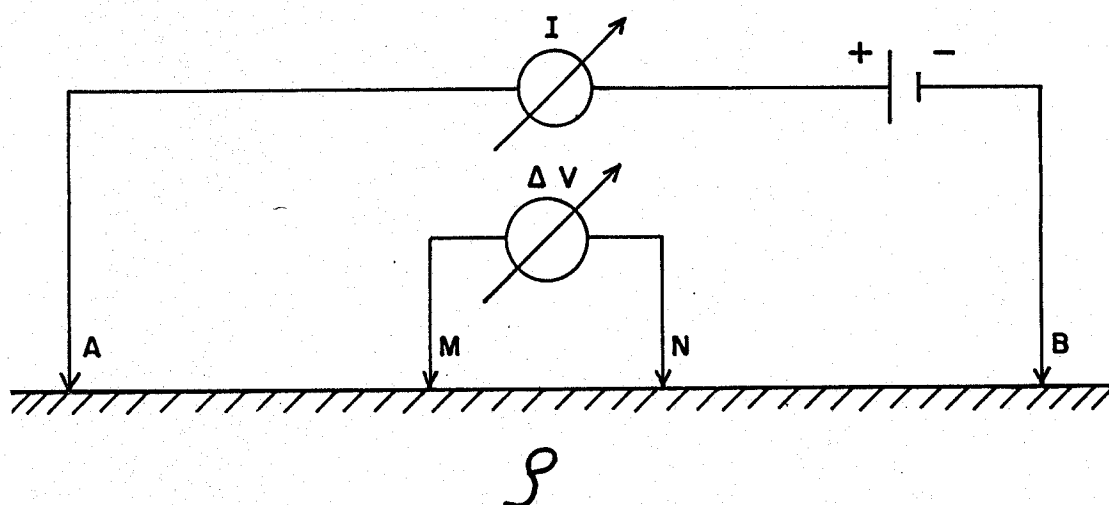


Fig.3 Esquema do Método de Eletroresistividade

De acordo com a lei de Ohm, a resistividade elétrica do semi-espaco homogêneo é dada pela seguinte fórmula:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad [\text{Ohm.m}] \quad (1)$$

onde:

ΔV - diferença de potencial elétrica entre M e N [V]

I - corrente contínua aplicada entre A e B [A]

ρ - resistividade elétrica [Ohm.m]

K - fator geométrico do arranjo geral do quadripolo

AMNB, dado por:

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

sendo AM, AN, BM e BN as distâncias entre os eletrodos.

Assumindo que o subsolo é constituído de várias camadas com resistividades $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ e espessuras $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$, a resistividade medida corresponde a resistividade elétrica aparente (ρ_a). Então, a equação (1) passa a ter a seguinte forma:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad [Ohm.m] \quad (3)$$

De acordo com a localização dos eletrodos na superfície, dois tipos de estudos são possíveis: sondagem elétrica vertical e perfilagem elétrica.

Na sondagem elétrica vertical, tratada daqui em diante por SEV, são investigadas as variações de resistividade em profundidade através do aumento da separação dos eletrodos A e B. Existem vários tipos de arranjo, porém, o de Schlumberger, que expande simetricamente a distância entre os eletrodos A e B em relação a um ponto central (o ponto de sondagem), é o mais usado, tendo o seguinte fator geométrico (Fig. 4):

$$K_s = \frac{\pi}{MN} (AB/2)^2 - (MN/2)^2 \quad (MN \ll AB) \quad (4a)$$

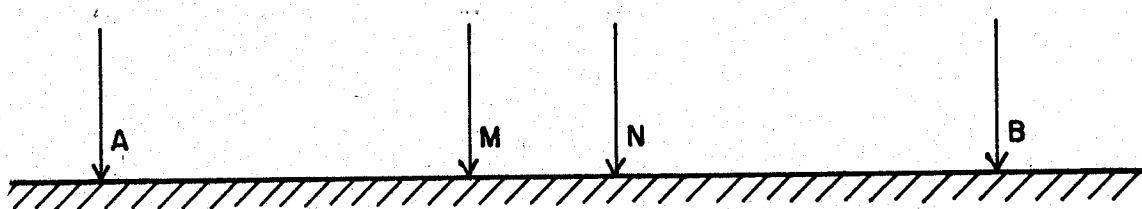


Fig. 4 Esquema do Arranjo Schlumberger

Quando se deseja estudar as variações laterais de resistividade do subsolo, utiliza-se a perfilagem elétrica, que consiste em deslocar sobre o terreno um quadripolo AMNB fixo, realizando leituras em estações regularmente espaçadas. Neste tipo de estudo, o arranjo mais usado é o Wenner:

$$K_w = 2\pi a \quad (4b)$$

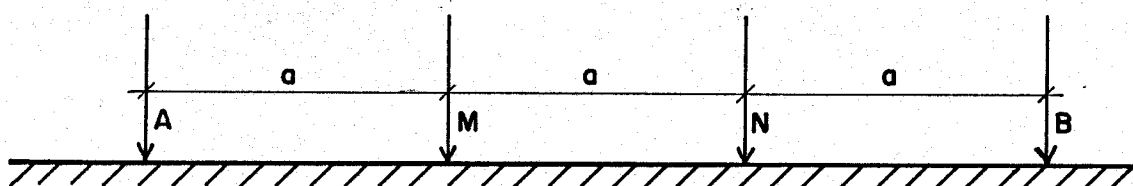


Fig. 5 Esquema do Arranjo Wenner

3.2 - TEORIA DE ANÁLISE DAS CURVAS DE ELETRORESISTIVIDADE

A interpretação das curvas de resistividade medida será feita inicialmente através do método das tentativas, visando-se obter-se um modelo geofísico racional como entrada no

método dos mínimos quadrados, conseguindo-se assim o melhor modelo final.

A resistividade aparente da sondagem elétrica vertical de arranjo Schlumberger ($MN \ll AB$) é uma função da metade da separação dos eletrodos de corrente, $r=AB/2$, e é dada pela equação integral:

$$\rho_a(r) = r^2 \int T(\lambda, k, h) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (5)$$

onde λ é a variável de integração, J_1 a função de Bessel de primeira ordem e T a transformada da resistividade, a qual é calculada pela fórmula de recorrência para o modelo geofísico de n -camadas horizontais. A camada (ρ_{n-1}, h_{n-1}) acima do substrato ρ_n , calcula-se por:

$$T_{n-1}(\lambda) = \rho_{n-1} \frac{1 - k_{n-1} u_{n-1}}{1 + k_{n-1} u_{n-1}} \quad (6)$$

onde: $u_{n-1} = \exp(-2h_{n-1} \cdot \lambda)$ e $k_{n-1} = (\rho_{n-1} - \rho_n) / (\rho_{n-1} + \rho_n)$

O processo recursivo será iniciado a partir de $T_{n-1}(\lambda)$ para obter-se o valor da transformada $T_1(\lambda) = T(\lambda)$ da equação (5). A integral da equação (5) poderá ser transformada numa soma finita de convolução, utilizando-se uma série de coeficientes definidos deduzidos a partir do método de filtro linear (GOSH, 1971).

$$\rho_a(m\Delta\gamma) = \rho_a^m = \sum_{j=-3}^5 b_j T_{m-j} \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (7)$$

onde $\Delta\gamma$ é um intervalo equidistante, b_j os nove coeficientes de

filtro do programa usado e T_m o valor da equação (6).

O método dos mínimos quadrados fundamenta-se na soma dos quadrados das diferenças entre os dados observados (com índice o) e os dados calculados (com índice c), os quais são minimizados da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^k |\log \rho_a^o(r_i) - \log \rho_a^c(r_i, P_j)|^2 = \text{Mínimo} \quad (8)$$

onde:

$r_i = AB/2$ com $i=1, 2, \dots, k$ e $P_j = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n / h_1, h_2, \dots, h_{n-1})$.

O valor de ρ_a^c é calculado através da equação (7) para um dado modelo P_j . A dependência de ρ_a^c em função de P_j não é linear, por este motivo, a equação (8) é expandida numa série de Taylor em torno do modelo inicial P_j^* , obtido pelo método das tentativas até o termo de primeira ordem:

$$\sum_{i=1}^k |\log \rho_a^o(r_i) - \log \rho_a^c(r_i, P_j^*) - \sum_{j=1}^m \frac{\partial \log \rho_a^c}{\partial \log P_j} \Delta \log P_j|^2 = \text{Mínimo} \quad (9)$$

As derivadas parciais no terceiro termo da equação (9) podem ser calculadas pelo método de filtro linear (JOHANSEN, 1975) no ponto $P_j = P_j^*$. A minimização da equação (9) implica a correção $\Delta \log P_j$ em cada ciclo de iteração, reajustando o modelo de tal modo, que $\log P_j = \log P_j^* + \Delta \log P_j$. Este procedimento termina, quando o valor de mínimo não decresce mais, ou o número de ciclos interativos, previamente determinados, é atingido.

O modelo geofísico final não pode representar precisamente a situação geológica verdadeira do subsolo, pois, devem ser levados em conta as influências resultantes do princípio de supressão e do princípio de equivalência das camadas na interpretação quantitativa das curvas de sondagem elétrica vertical (KUNETZ, 1966).

3.3 - TEORIA DE ANISOTROPIA HORIZONTAL

O conceito de anisotropia elétrica horizontal (BHATTACHARYA & PATRA, 1968) baseia-se num modelo estratigráfico. Este pode ser modificado, de tal maneira, que permite o uso de rocha fraturada como modelo equivalente.

A Figura 6 abaixo mostra os parâmetros geométricos de uma formação homogênea e estratificada inclinada.

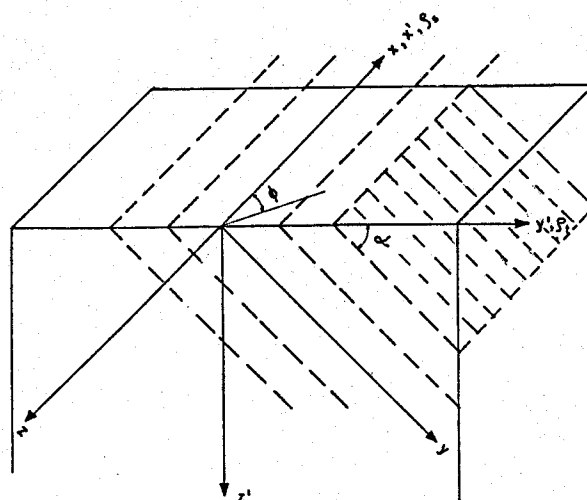


Fig.6 Esquema do Semi-Espaço Estratificado Inclinada

- x, y - plano de estratificação
- x', y' - interface terra - ar
- α - ângulo de mergulho
- ϕ - ângulo azimutal com direção de abertura de arranjo
- ρ_t - resistividade verdadeira transversal
- ρ_s - resistividade verdadeira longitudinal

Devido a orientação dos minerais e/ou sedimentação natural, a densidade de corrente J no plano de estratificação é sempre maior que a direção normal a este.

$$J_s = \frac{1}{\rho_s} E_s > J_t = \frac{1}{\rho_t} E_t \quad (10)$$

portanto:

$$\rho_s < \rho_t \quad (11)$$

O coeficiente de anisotropia verdadeiro é definido por:

$$\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_s} \quad (12)$$

e a resistividade média verdadeira é definida por:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t * \rho_s} \quad (13)$$

No semi-espaco homogêneo anisotrópico a resistividade aparente é dada por:

$$\rho_s^a = \frac{\rho_m}{\{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \phi \sin^2 \alpha\}^{1/2}} \quad (14)$$

Ao longo da direção de estratificação, ou seja, quando $\phi = 0$, tem-se:

$$\rho_s^a = \rho_m \quad (15)$$

Normal a direção de estratificação, ou seja, quando $\phi = \pi/2$, temos:

$$\rho_t^a = \frac{\rho_m}{\{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha\}^{1/2}} \quad (16)$$

Visto que $[1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha]$ é sempre maior que a

unidade, exceto, quando $\alpha = 0$ (fratura horizontal), conclui-se que:

$$\rho_t^a < \rho_s^a \quad (17)$$

e, quando $\alpha = \pi/2$ (fratura vertical), temos:

$$\rho_t^a = \frac{\rho_m}{\lambda} = \rho_s \quad (18)$$

Os resultados das equações (11) e (17) são contraditórios (Paradoxo de Anisotropia Elétrica Horizontal).

3.4 - MÉTODO DE ELETROMAGNETISMO

O método eletromagnético (EM) consiste em um transmissor (T), geralmente uma bobina transmissora, a qual emite ao subsolo um campo eletromagnético produzido por uma corrente alternada de frequência definida. Uma outra bobina receptora (R), numa certa distância afastada do transmissor, recebe um campo eletromagnético induzido, o qual é uma superposição do campo primário (H_p) do transmissor com o campo eletromagnético secundário (H_s), induzido por um condutor (C) no subsolo segundo a lei de Faraday.

A modificação do campo eletromagnético, medido no receptor em relação ao campo primário, depende da distribuição das condutividades elétricas dos diferentes meios na sub-superfície do terreno.

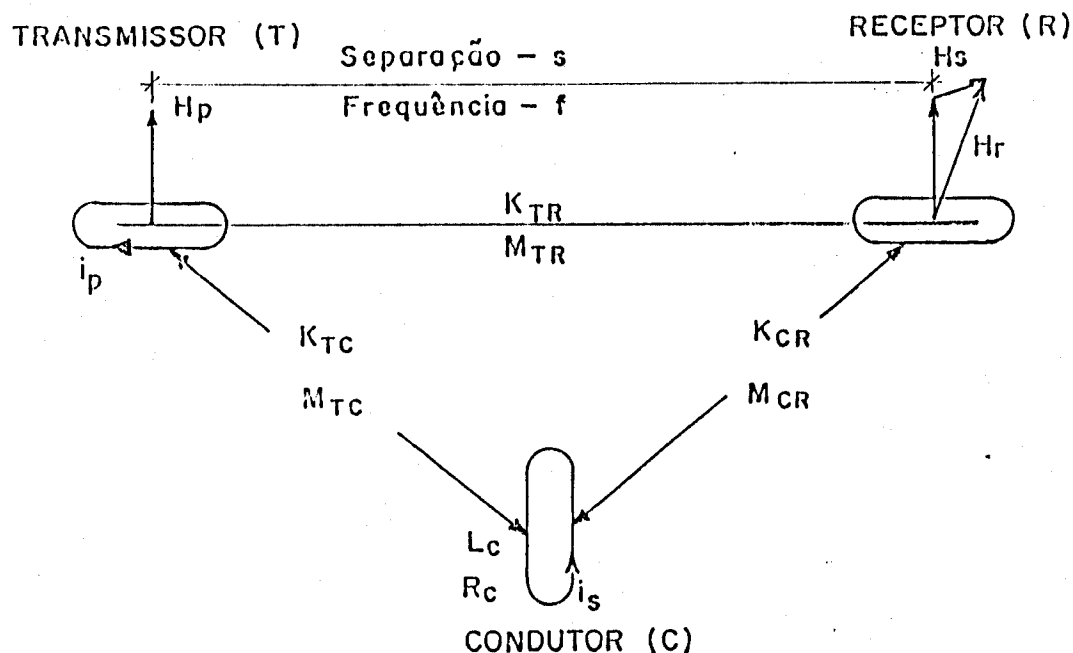


Fig. 7 Princípio do Método Eletromagnético

A relação entre o campo primário (H_p) e o campo secundário (H_s), na presença de um condutor no subsolo (Fig. 7), é dada por:

$$\frac{H_s}{H_p} = - \frac{K_{CR} K_{TR}}{K_{TC}} * \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2} \quad (19)$$

ou, então, na forma de função complexa (função de resposta eletromagnética):

$$f(Q) = \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2} \quad (20)$$

onde

Q - parâmetro de resposta eletromagnética

K_{ij} - coeficiente de acoplamento definido por:

$$K_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \quad \text{que depende da geometria do sistema EM, número de espiras do T e a atenuação eletromagnética}$$

L_i - indutância

M_{ij} - indutância mútua entre o sistema eletromagnético e o condutor ($i, j = T, R, C$ e $i \neq j$).

A variável independente Q das equações (19) e (20) é o parâmetro de indução ou parâmetro de resposta para um condutor de indutância L_c e de resistência R_c no campo eletromagnético de frequência (ω) e é adimensional, a qual é dada por:

$$Q = \omega \frac{L_c}{R_c}, \text{ onde } \omega = 2 \pi f \text{ [Hz]} \quad (21)$$

A atenuação eletromagnética nos meios rochosos define a profundidade de penetração, p , do campo eletromagnético primário no subsolo até um valor de $1/e$, ou seja, 37% da amplitude inicial.

$$p = \sqrt{2/\sigma\mu\omega} \quad \text{ou} \quad p \approx 503/\sqrt{\sigma f} \text{ [m]} \quad (22)$$

onde: ω - frequência do campo primário [Hz]

σ - condutividade elétrica do semi-espaco [S/m]

μ - permeabilidade magnética do semi-espaco [H/m]

Por outro lado, o valor de p é sempre maior que a profundidade de prospecção eletromagnética que determina a profundidade do condutor ainda detectável na resposta eletromagnética secundária no receptor. Estima-se esta profundidade como a metade da distância entre o receptor e o transmissor (WARD, 1967).

3.5 - TEORIA DE ANÁLISE DE MEDIÇÕES ELETROMAGNÉTICAS

O gráfico da Figura 8 reproduz qualitativamente a resposta indutiva do condutor no campo eletromagnético senoidal homogêneo e, portanto, regras simples podem ser obtidas a partir deste.

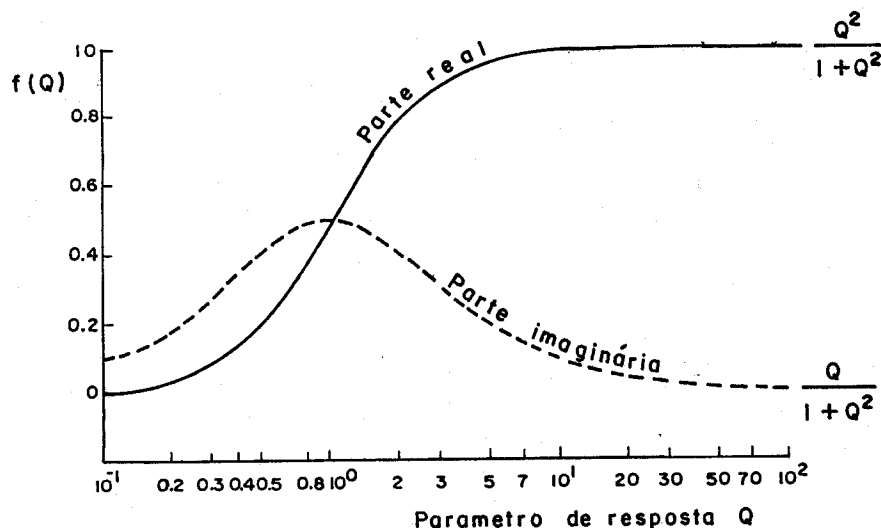


Fig. 8 Representação Gráfica da Função de Resposta Eletromagnética (GRANT & WEST, 1965).

- 1 - se o parâmetro de Q é muito pequeno ($Q \ll 1$, mau condutor), a função de resposta é diretamente proporcional à componente imaginária [$F(Q) \approx iQ$], e a razão entre o campo primário e secundário é dado por:

$$\frac{H_s}{H_p} = - \frac{K_{CR} K_{TC}}{K_{TR}} * \frac{iL_C}{R_C} \quad (23)$$

ou seja, para $Q \ll 1$, a resposta induzida mostra uma componente imaginária maior que a real.

2 - se o parâmetro Q é muito grande ($Q \gg 1$, bom condutor), a função de resposta tende ao valor limite de 1 [$F(Q)=1$], e a razão entre o campo primário e secundário é dado por:

$$\frac{H_s}{H_p} = - \frac{K_{CR} K_{TC}}{K_{TR}} \quad (24)$$

A razão é determinada pelos coeficientes de acoplamento, ou seja, a resposta induzida mostra a componente real atingindo o valor máximo e a imaginária tendendo a zero.

Observa-se na Figura 8 que para receber as melhores respostas induzidas no receptor, o parâmetro Q deverá ter um valor próximo a 1. Neste caso, registra-se uma maior resposta da componente imaginária e a maior variação da componente real. Para dadas propriedades elétricas do condutor (L e R), só uma variação operacional no instrumento eletromagnético, tais como: seleção da frequência adequada (ω) do campo primário e/ou da distância (s) entre as bobinas transmissora e receptora, pode-se chegar a este valor ideal.

4. METODOLOGIAS GEOFÍSICAS ADOTADAS

4.1 - METODOLOGIA DE ELETRORESISTIVIDADE

4.1.1 - Aparelho de Eletroresistividade

O aparelho de eletroresistividade usado, marca BODENSEEWERK GEOSYSTEM GGA 30, é composto de duas unidades galvanicamente separadas e eletro-oticamente acopladas. O transmissor tem capacidade para gerar voltagens de 60V, 120V e 300V com potência máxima de 60W, o qual envia impulsos de corrente de polaridade alternada para o subsolo por meio dos eletrodos A e B em três intervalos de tempo definido. O receptor controla todo o processo e mede a corrente enviada entre os mesmos e a diferença de potencial entre os eletrodos M e N.

A resistividade aparente, por este processo, é definida por:

$$\rho_a = K \frac{\int V(t)dt}{\int I(t)dt} \quad (25)$$

O tempo de integração é: $(t_6 - t_5) + (t_4 - t_3) + (t_2 - t_1) = 2.4s$ e o tempo total de medição $t_6 = 8.7s$.

O processo de medição deste aparelho suprime os ruídos de fontes telúricas e industriais, bem como, possibilita o uso de eletrodos metálicos.

4.1.2 - Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

As sondagens elétricas verticais (SEVs), que foram executadas em todas três áreas de estudo selecionadas, tiveram por finalidade a determinação da profundidade até o embasamento cristalino. Sondagens elétricas preliminares executadas no início do trabalho de campo, determinaram situações geológicas semelhantes em todas as partes pesquisadas, devido aos vários perfis litológicos perfurados nas três áreas de estudo, com a seguinte estrutura:

- 1ª - solo com espessura de 0.5m a 1.5m e média resistividade.
- 2ª - manto de intemperismo com espessura máxima de 15m e baixa resistividade.
- 3ª - embasamento cristalino de alta resistividade.

Devido a pouca profundidade até o cristalino, não é necessário um aumento de AB/2 acima de 80m no arranjo Schlumberger. Entretanto, as medições foram sempre feitas com AB/2 até 200m ou 300m, afim de observar ocasionalmente o surgimento de um dobramento irregular no ramo ascendente final da respectiva curva de resistividade, provocado por heterogeneidade do embasamento cristalino como no caso das fraturas.

Foram realizadas sete medições por década logarítmica ($AB/2 = 1.0m, 1.5m, 2.0m, 3.0m, 4.0m, 6.0m$ e $8.0m$, etc) com mudanças na distância fixa dos eletrodos de potencial ($MN = 0.5m, 2.0m$ e $5.0m$).

4.1.3 - Interpretação Adotada para Curvas de Resistividade

As interpretações das curvas de resistividade foram efetuadas por microcomputadores usando o algoritmo computacional proposto por JOHANSEN (1977). O programa usado, em linguagem BASIC, tem as seguintes subrotinas: DATA, MODEL, CALCUL e OPTIMIZE (Fig. 9).

A subrotine DATA permite a entrada dos dados, isto é, resistividades medidas e os respectivos valores de $AB/2$. Na subrotina MODEL, define-se o modelo geofísico e na subrotina CALCUL, calcula-se a curva de resistividade teórica a partir do modelo geofísico da subrotina MODEL segundo a equação (6) por meio de nove coeficientes de filtro em quatro pontos por década logarítmica. Caso a razão dos valores sucessivos de resistividade seja menor que 1.000, o erro na resistividade calculada não ultrapassa 2%. A subrotina OPTIMIZE usa o modelo geofísico ajustado como modelo inicial, obtido pelo método das tentativas através do uso sucessivo das subrotinas MODEL e CALCUL, e determina o melhor

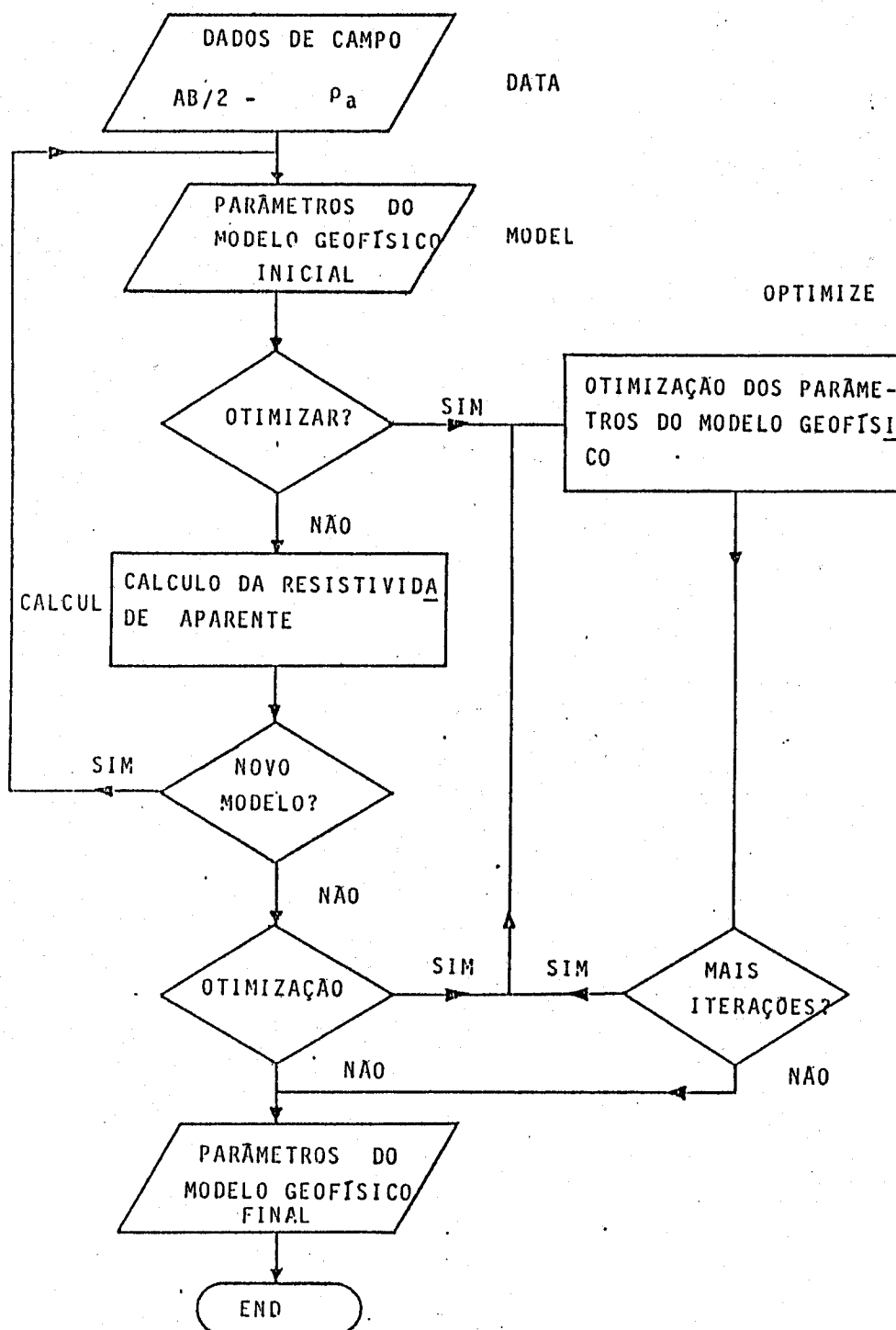


Fig.9 - Fluxograma Esquemático do Programa de Interpretação para as SEVs

modelo geofísico final pelo processo interativo do método dos mínimos quadrados.

4.1.4 - Sondagem Elétrica Vertical Radial (SEVR)

A detecção das zonas fraturadas no embasamento cristalino com cobertura sedimentar, os quais são aquíferos cristalinos promissores, baseia-se na teoria de anisotropia elétrica horizontal (Cap. 3, item 3.3) aproveitando o efeito, que a resistividade aparente perpendicular à direção da fratura é sempre menor que a resistividade aparente paralela a esta direção (vide Eq. 11).

A metodologia usada neste trabalho é uma modificação da sondagem elétrica vertical de arranjo Schlumberger (item 4.1.2), a qual consiste em executar SEVs em várias direção definidas tomando um determinado ângulo (adotou-se 45°). Esta técnica é conhecida como sondagem elétrica vertical radial, SEVR (MALLIK et al, 1983).

O plotamento das resistividades para cada separação do $AB/2$ em função da direção num diagrama polar, $\rho_a(\phi, AB/2)$, mostra um polígono simétrico de forma elíptica e indica a direção da anisotropia elétrica horizontal do subsolo.

A direção do maior eixo deste polígono, corres-

pondente a maior resistividade, define a direção principal da zona fraturada neste ponto de medição. Como consequência, as perfilagens geofísicas foram feitas na direção do menor eixo do polígono (menor resistividade), ou seja, transversal à direção da zona fraturada.

4.1.5 - Interpretação Adotada para SEVR

Foram executadas três sondagens elétricas verticais radiais (SEVR) nas direções E-W, N-S, NE-SW e NW-SE para cada AB/2, possibilitando assim a confecção do respectivo polígono, que representa a anisotropia elétrica horizontal do subsolo. A determinação exata da direção média principal da zona fraturada em cada ponto de medição necessita de uma análise matemática, que tome uma elipse como base de aproximação do polígono confeccionado.

O polígono de resistividade radial medido será descrito aproximadamente por um tensor de ordem dois $|\rho^a|_{xy}$ no sistema x,y e poderá ser aproximado pela superposição média dos tensores individuais (Fig.10), $\rho_1^a(x,y)$ - polígono medido na direção E-W, N-S e $\rho_2^a(x',y')$ - polígono medido na direção NE-SW, NW-SE.

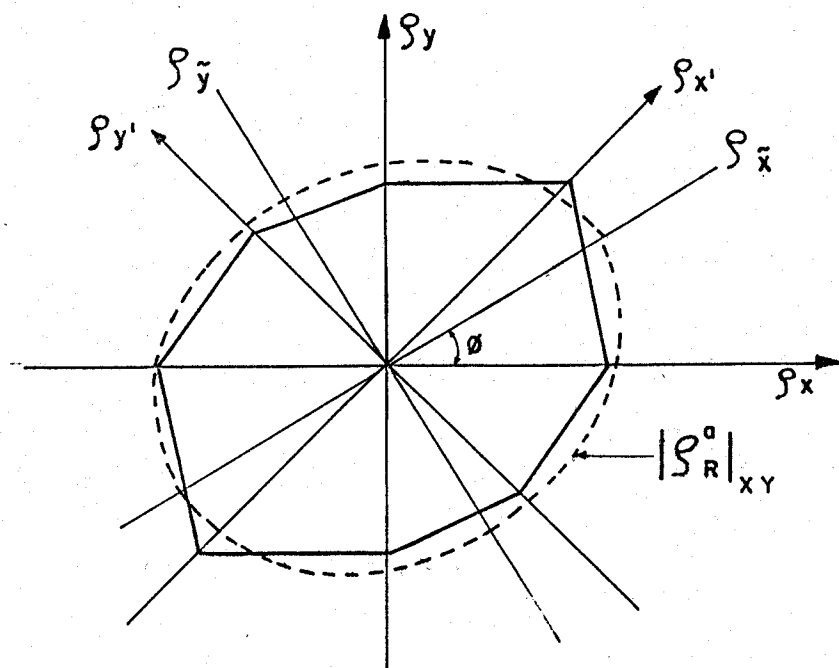


Fig.10 Aproximação do Polígono pelo Tensor $|\rho_R^a|_{xy}$

A superposição dos tensores $|\rho_1^a|$ e $|\rho_2^a|$ é possível devido a linearidade dos mesmos.

$$|\rho_R^a(x,y)| = \frac{1}{2} \{ |\rho_1^a(x,y)| + |R^T| |\rho_2^a(x',y')| |R| \} \approx |\rho_{xy}^a| \quad (26)$$

onde:

$|\rho_R^a|$ - é o tensor médio resultante no sistema (x,y)

$$|R| = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{matriz} \\ \text{de} \\ \text{transformação} \end{array} \quad (27)$$

$$|\rho_{xy}^a| = \begin{vmatrix} \rho_{xx}^a & \rho_{xy}^a \\ \rho_{yx}^a & \rho_{yy}^a \end{vmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{tensor de} \\ \text{resistividade} \\ \text{aparente} \end{array} \quad (28)$$

$\theta = 45^\circ$ - ângulo de rotação entre os sistemas (x,y) e (x',y') .

A anisotropia eletroresistiva é descrita pela

equação geral de segunda ordem:

$$\rho_{xx}x^2 + 2\rho_{xy}xy + \rho_{yy}y^2 = C \quad (29)$$

ou na forma matricial:

$$\{X^T\}|\rho|\{x\} = C \quad (30)$$

onde:

$$|\rho| = \begin{vmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{xy} & \rho_{yy} \end{vmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{tensor simétrico} \\ \text{de resistividade} \end{array} \quad (31)$$

$$\{X^T\} = (x, y) \quad \begin{array}{l} \text{vetor transposto com} \\ \text{componentes } x \text{ e } y \end{array} \quad (32)$$

e

$$C = \det |\rho| \quad \text{determinante do tensor } |\rho| \quad (33)$$

O cálculo dos autovalores $\lambda_{\max}$ e $\lambda_{\min}$ do tensor $|\rho|$ através do determinante característico:

$$\begin{vmatrix} \rho_{xx} - \lambda & \rho_{xy} \\ \rho_{xy} & \rho_{yy} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (34)$$

$$\lambda_{\max}^{\min} = \frac{\rho_{xx} + \rho_{yy}}{2} \pm \left\{ \frac{[\rho_{xx} - \rho_{yy}]^2}{4} - C \right\}^{1/2} \quad (35)$$

possibilita a determinação da resistividade aparente ao longo da fratura $\rho_s^a = \sqrt{C/\lambda_{\min}}$ e normal a fratura $\rho_t^a = \sqrt{C/\lambda_{\max}}$. As direções de ρ_s^a e ρ_t^a são respectivamente os autovetores

dados pelas relações:

$$\operatorname{arctg} 2\phi_1 = \frac{2\rho_{xy}}{\rho_{xx} - \rho_{yy}} \quad (36)$$

e

$$\phi_2 = \phi_1 - \pi/2 \quad (37)$$

A anisotropia eletroresistiva no sistema dos eixos principais (x,y) é dado por:

$$\lambda_{\min} x^2 + \lambda_{\max} y^2 = C \quad (38)$$

ou

$$\frac{x^2}{[\rho_s^a]^2} + \frac{y^2}{[\rho_t^a]^2} = 1 \quad (39)$$

onde ρ_s^a e ρ_t^a são semi-eixos de uma elipse ($\rho_s^a > \rho_t^a$).

O grau de fraturamento é definido pelo coeficiente de anisotropia aparente dado por:

$$\lambda_a = \rho_s^a / \rho_t^a > 1 \quad (40)$$

4.1.6 - Perfilagem Elétrica

Para mapear as variações laterais da resistividade elétrica do subsolo, foram realizadas nas áreas I e II, perfilagens elétricas em linhas perpendiculares a direção de fratura com arranjo Wenner.

Foram inicialmente testadas várias equidistâncias $a = AB/3$ (8.3m, 16.7m e 25m). A melhor resolução nos perfis elétricos verificou-se com a equidistância entre os eletrodos de $a = 25m$ ($AB = 75m$).

O procedimento de campo foi realizado em perfis

previamente demarcados, em estações de 25m e cada medição repetida duas vezes. Para se obter uma melhor cobertura geofísica, a separação entre os perfis sucessivos foi de 50m.

4.1.7 - Aparelho de Medição de Condutividade

A condutividade elétrica (Mhos/cm ou S/cm) em função da temperatura foram medidas com um condutivímetro portátil, marca: YELLOW SPRING INSTRUMENT 33, e a salinidade (equivalente quantidade de NaCl dissolvida em mg/l) foi estimada.

4.2 - METODOLOGIA DE ELETROMAGNETISMO

4.2.1 - Aparelho Eletromagnético

O aparelho eletromagnético usado, marca: ABEM DEMINGUM, baseia-se no método Slingram e consiste num sistema móvel de duas bobinas lineares, como transmissor e receptor, conectadas por um cabo com sinal de referência do campo primário de distância operacional variável entre estas ($s = 25m$ a $150m$).

O sistema opera em duas frequências: 880 Hz e 2640 Hz, no sistema horizontal coplanar (HLEM - horizontal loop EM).

As grandezas medidas no receptor, componente real ou em fase e componente imaginária ou em quadratura, são

magnitudes relativas e lida em percentual pelo quociente do campo secundário induzido pelo campo primário.

4.2.2 - Perfilagem Eletromagnética

Para possibilitar uma comparação direta com os perfis elétricos, a perfilagem eletromagnética utilizou os mesmos trechos da perfilagem elétrica, anteriormente demarcados.

Antes de executar-se o procedimento de campo, foi feito a calibração do aparelho ABEM DEMINGUN para as componentes (real 100% e imaginária 0%) em cada frequência num local de maior resistividade possível em cada área de estudo.

Operando em duas frequências ($f = 880 \text{ Hz}$ e 2640 Hz) e distância $s = 50\text{m}$ entre as bobinas transmissora e receptora, foi medida, em cada estação, a componente real e imaginária, utilizando o sistema horizontal coplanar.

Sabe-se, que a componente real é muito sensível às variações do relevo do terreno, ao contrário da componente imaginária, por isso, se fazem necessárias correções na componente real observada. Neste trabalho, as duas áreas de estudo não mostraram variações topográficas consideráveis, portanto, foi dispensada a correção de terreno na componente real.

Um mal alinhamento horizontal das bobinas e/ou uma diferença, introduzida na distância entre estas, provoca-

rão um erro significativo nos valores observados, por isso, cada medição foi repetida.

4.2.3 - Interpretação Adotada para os Perfis EM

Para interpretar semi-qualitativamente as anomalias eletromagnéticas, se faz uso dos diagramas padrão de resposta eletromagnética (Diagrama de Argand - Fig. 11). Estes diagramas existem para sistemas eletromagnéticos de bobinas horizontais coplanares para condutores de forma geométrica simples (GRANT & WEST, 1965).

A situação hidrogeológica da área II (zonas fraturadas no cristalino Pré-Cambriano) possibilita o uso dos seguintes modelos geométricos para aproximar a respectiva geologia nesta área.

- 1 - Plano horizontal - aproxima o manto de intemperismo com respectivo parâmetro de resposta : $Q_1 = \mu\omega\sigma_1 h_s$
- 2 - Semi-plano inclinado - aproxima largo veio ou fratura, com parâmetro: $Q_2 = \mu\omega\sigma_2 l$
- 3 - Semi-espço - embasamento cristalino encaixante com parâmetro: $Q_3 = \mu\omega\sigma_3 s^2$

O produto $\sigma \cdot h$ ou $\sigma \cdot l$ é a condutância τ [S], que

pode ser determinada fora do diagrama padrão.

μ - permeabilidade magnética [H/m]

σ - condutividade elétrica [S/m]

h - espessura do plano horizontal [m]

l - largura do semi-plano inclinado [m]

z - profundidade do semi-plano inclinado [m]

s - distância entre T e R [m]

τ - condutância elétrica [S]

Ângulo de mergulho: 90°

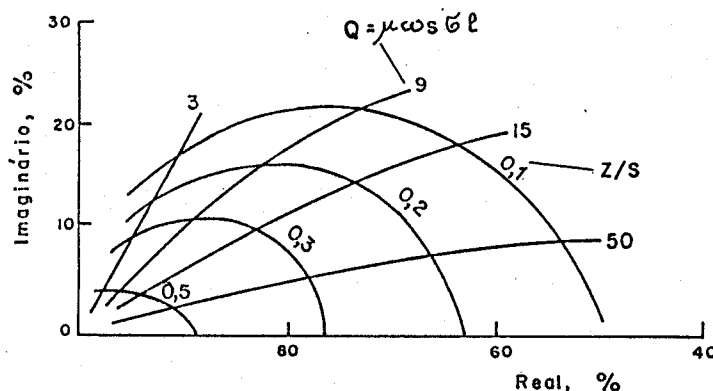


Fig. 11 Diagrama de Argand de Sistema Horizontal Coplanar para Semi-Plano Vertical (GRANT & WEST, 1965)

Para determinar a profundidade (z) até o condutor (topo do semi-plano), toma-se a diferença máximo-mínimo das anomalias EM (pico-a-pico), tanto da componente real como da imaginária do perfil medido, interpola-se no diagrama de Argand o parâmetro de resposta (Q) e o parâmetro de profundidade (z/s). Junto com os valores conhecidos de

frequência (ω) e da distância (s), calcula-se facilmente a profundidade (z) e a condutância, $\tau = \sigma * l$, do semiplano condutivo.

5. AQUISIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

5.1 - RESULTADOS DA AREA I

A área I, na fazenda Mirafram, 5km a leste da cidade de Patos, representa o tipo de aquífero aluvião estreito e raso no riacho Pilões. O objetivo foi um mapeamento geral com métodos geoeletricos comparativos, para se avaliar a situação hidrogeológica deste tipo de aquífero. A topografia geral deste aquífero foi descrita no item 2.5.1.

5.1.1 - Mapeamento de Eletroresistividade

Foram executados seis perfis de eletroresistividade em arranjo Wenner com $a = 25m$, transversal ao leito do riacho e extensão de 500m a 700m (de 250m a 350m desde o centro para cada lado da calha). As medições foram feitas a cada estação de 25m em 25m e assim mapeando $0.5 km^2$.

O total dos dados coletados possibilitaram a confecção do mapa de isoresistividade aparente com boa resolução (Fig. 12). Deixa-se distinguir facilmente uma zona com resistividade inferior a 80 Ohm.m, correspondendo ao vale do riacho Pilões e uma com resistividade superior a 80 Ohm.m, correspondendo a parte topográfica mais elevada, onde o cristalino está aflorando localmente. Verifica-se subzonas isoladas com resistividade inferior a 40 Ohm.m, distribuídas

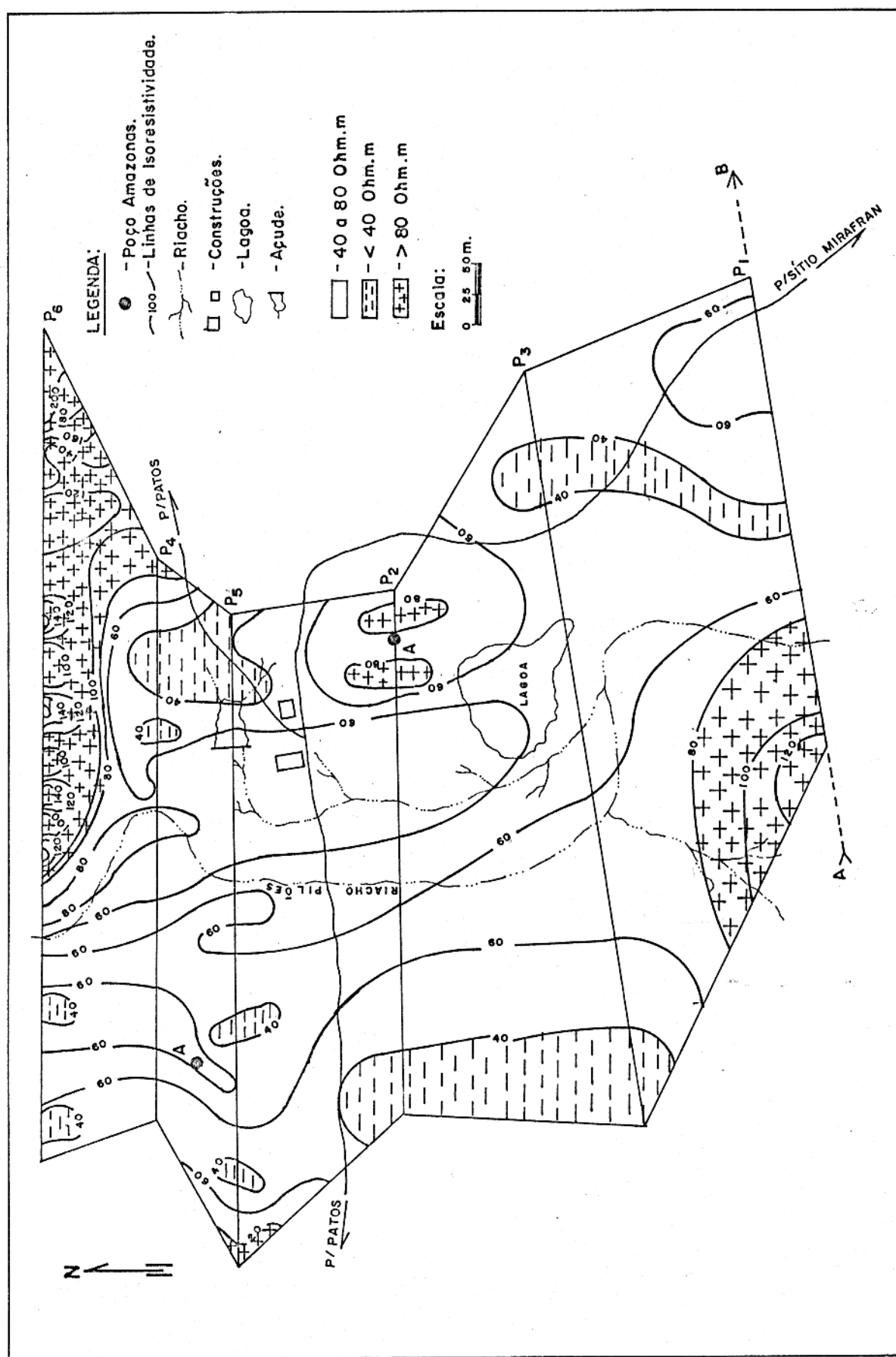


Fig.12 - Mapa de Isoresistividade (a = 75m) da Área I

irregularmente e com tamanhos variados. Estas indicam a ocorrência de material argiloso, utilizados pelos moradores na produção de tijolos manuais.

5.1.2 - Perfil Piloto P_1

Para se estudar mais detalhadamente a estrutura geológica do aquífero, foi selecionado um perfil transversal (P_1) com 400m de extensão, representativo para esta área de estudo e, ao longo deste, foram executados: um perfil de eletroresistividade, um perfil eletromagnético com as duas respectivas frequências, sete sondagens elétricas verticais, e foi perfurado um perfil litológico com trado de percussão, com a finalidade de calibrar as sondagens elétricas.

As Figuras 13a e 13b mostram a respectiva perfilagem eletromagnética com frequência de melhor resolução ($f=2640\text{Hz}$) e o perfil de eletroresistividade ($a = 25\text{m}$) e as figuras do Apêndice A, as sete SEVs feitas ao longo do P_1 .

A SEV-02 executada no local do perfil litológico perfurado (Fig. 14), serviu como sondagem elétrica de calibração e, assim, possibilitou a interpretação racional das demais seis SEVs.

A Figura 13c reflete o resultado final de todos os três métodos geofísicos integrados e mostra uma secção

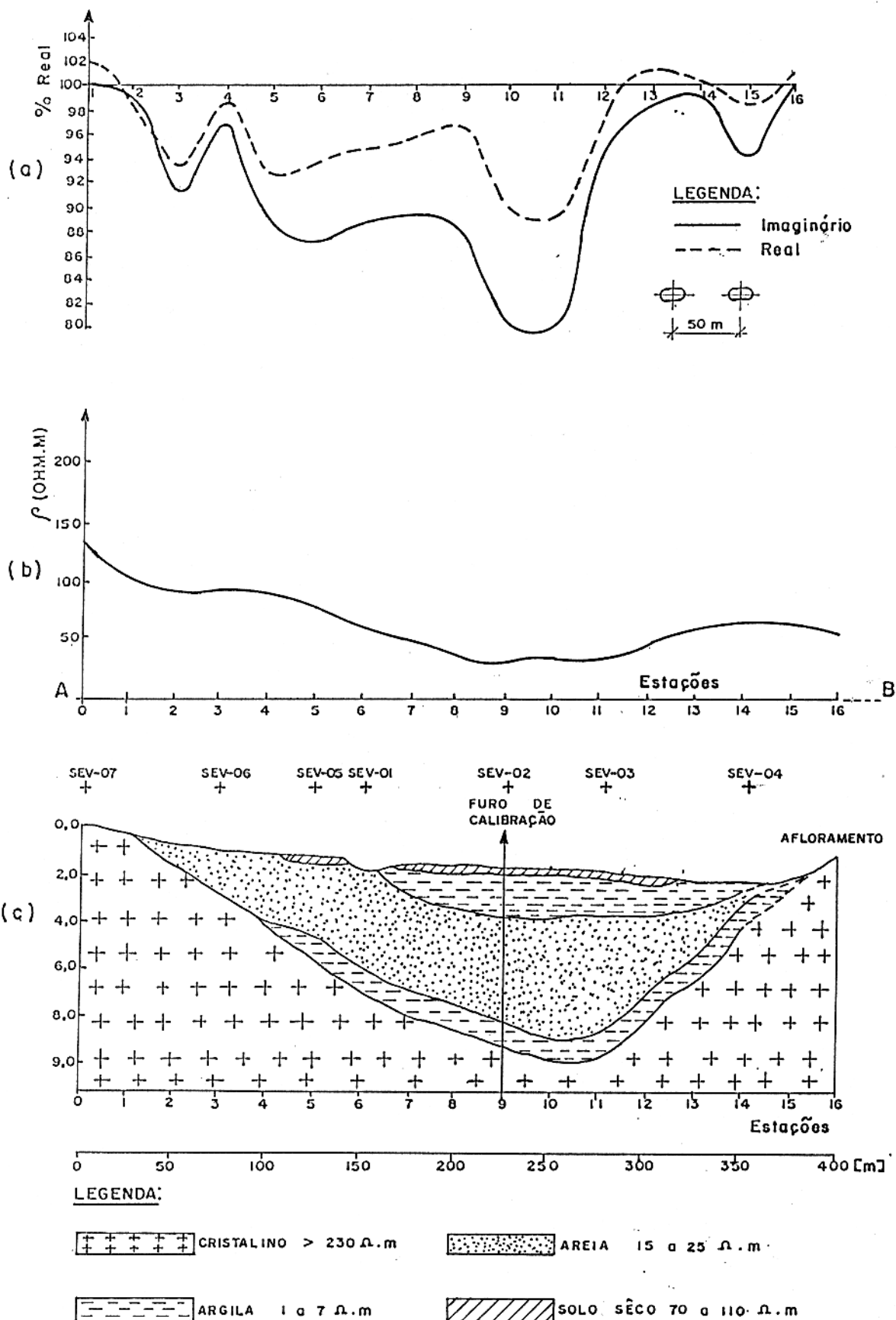
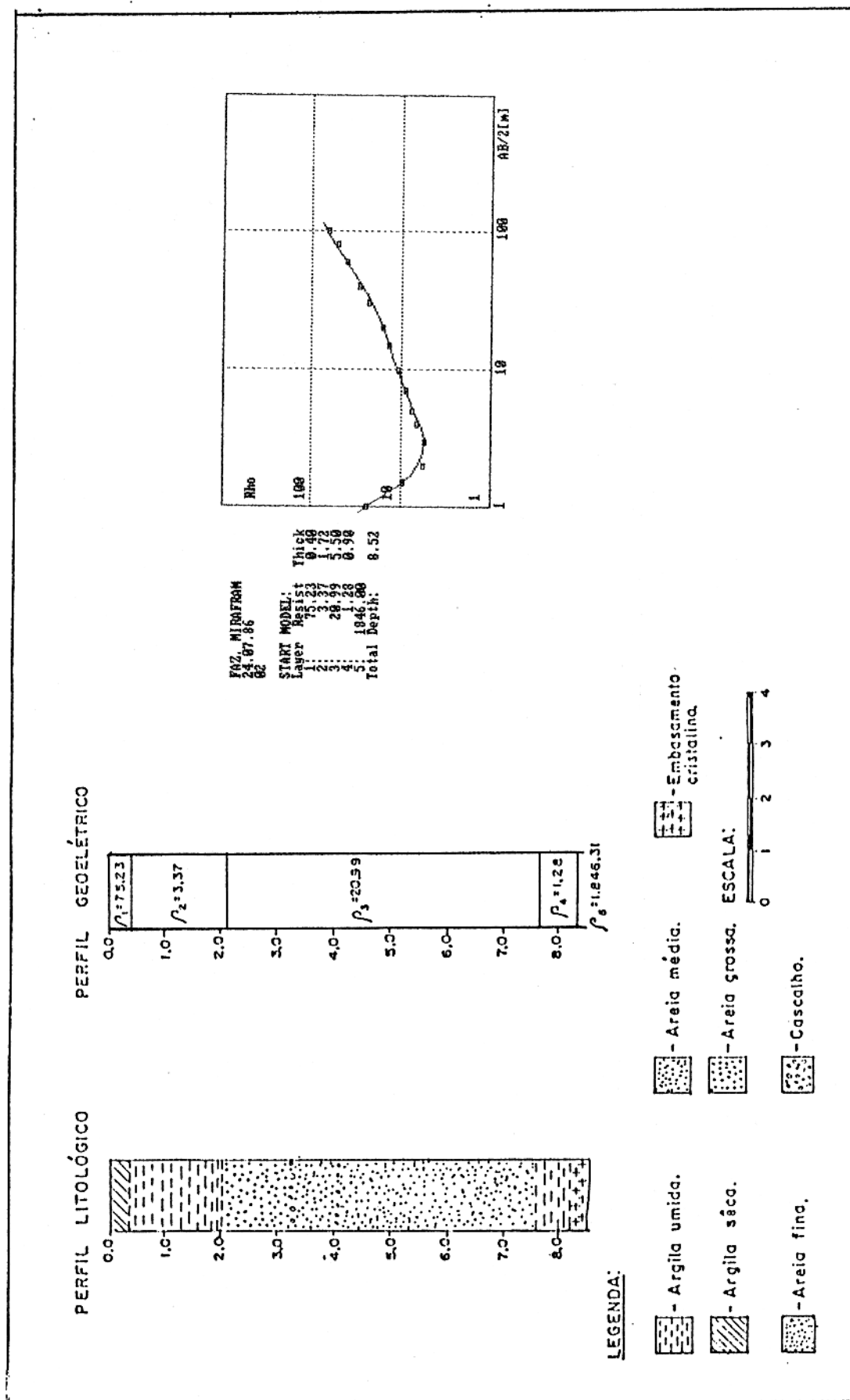


Fig.13 - Perfil Piloto P1

a) Perfil Eletromagnético ($f = 2640\text{Hz}$, $s = 50\text{m}$)b) Perfil de Eletroresistividade ($a = 25\text{m}$)

c) Perfil Geológico a partir das 7 SEVs

Fig.14 - Perfil Litológico para Calibração da SEV 02 do Perfil Piloto P₁

geológica com as seguintes características:

- 1 - Aluvião sedimentar assimétrica de 300m de extensão com profundidade máxima de nove metros encravada no embasamento cristalino.
- 2 - O leito atual do riacho Pilões, no local da SEV-01, não está localizado no ponto mais profundo da calha.
- 3 - A forma do aluvião se mostra claramente nos dois perfis geoeletricos numa comparação direta (Fig. 13a, b e c). São notáveis as grandes ondulações sobrepostas à tendência geral da resposta eletromagnética induzida, as quais não ocorrem no respectivo perfil eletroresistivo, provavelmente são provocados pelos lençóis argilosos condutivos, tanto na superfície como na sub-superfície.

5.2 - RESULTADOS DA AREA II

A área II, na fazenda Santa Rosa, 15km ao sul da cidade de Patos, é uma grande planície e representa o tipo de aquífero cristalino, onde foi perfurado, a cerca de 10 anos, um poço com aproximadamente 50m de profundidade, o qual fornece uma vazão constante de $2.5m^3/h$ durante todos estes anos, tendo água de qualidade razoável.

Esta área de estudo selecionada possibilita favoráveis condições topográficas e hidrogeológicas para se estudar a ocorrência de zonas fraturadas, provavelmente saturadas com água cristalina, usando-se métodos geoeletricos.

Um outro objetivo deste estudo foi, testar a confiabilidade dos resultados e a aplicabilidade dos dois métodos, em comparação direta, na detecção das zonas fraturadas no embasamento com cobertura sedimentar.

5.2.1 - Direção das Zonas Fraturadas

Para definir a direção das perfilagens geoeletricas, fez-se necessário determinar a direção principal das zonas de fraturamento das rochas cristalinas devido a falta de afloramento das mesmas nas proximidades. Para este fim, determinou-se em três locais diferentes desta área a anisotropia elétrica horizontal através de sondagem elétrica vertical radial, SEVR, como explicado no item 4.1.4.

Os resultados das SEVRs dos três locais selecionados são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 do Apêndice B e plotados como polígonos nas Figuras 15a, 16a e 17a, mostrando claramente a anisotropia elétrica horizontal do subsolo cristalino nestes pontos de medição.

A análise seguinte destes polígonos foi feita através do algoritmo descrito no item 4.1.5 e plotada nas

Figuras 15c, 16c e 17c, e possibilitou assim a determinação da direção média principal das zonas fraturadas. São estas:

SEVR 01 - 105°

SEVR 02 - 160°

SEVR 03 - 150°

mostrando assim uma tendência geral na direção NW-SE.

Nota-se nas Figuras 15c e 17c a influência das camadas superiores do subsolo (AB/2 de 10m a 30m), que causa uma direção da anisotropia elétrica máxima totalmente diferente.

SEVR 01 - 165°

SEVR 03 - 70°

O conhecimento do eixo máximo-mínimo da elipse, aproximada no polígono a partir desta análise numérica, facilita determinar o grau de fraturamento do cristalino em função da profundidade relativa (AB/2), como mostrado nas Figuras 15b, 16b e 17b.

Observa-se, especialmente nas Figuras 15b e 16b, um grau de fraturamento significativo na profundidade relativa, AB = 50m e em AB/2 = 200m, enquanto que na Figura 17b, o grau de fraturamento está crescendo linearmente a partir de AB/2 = 40m, concluindo-se daí, que o local da terceira sondagem é mais fraturado que as demais.

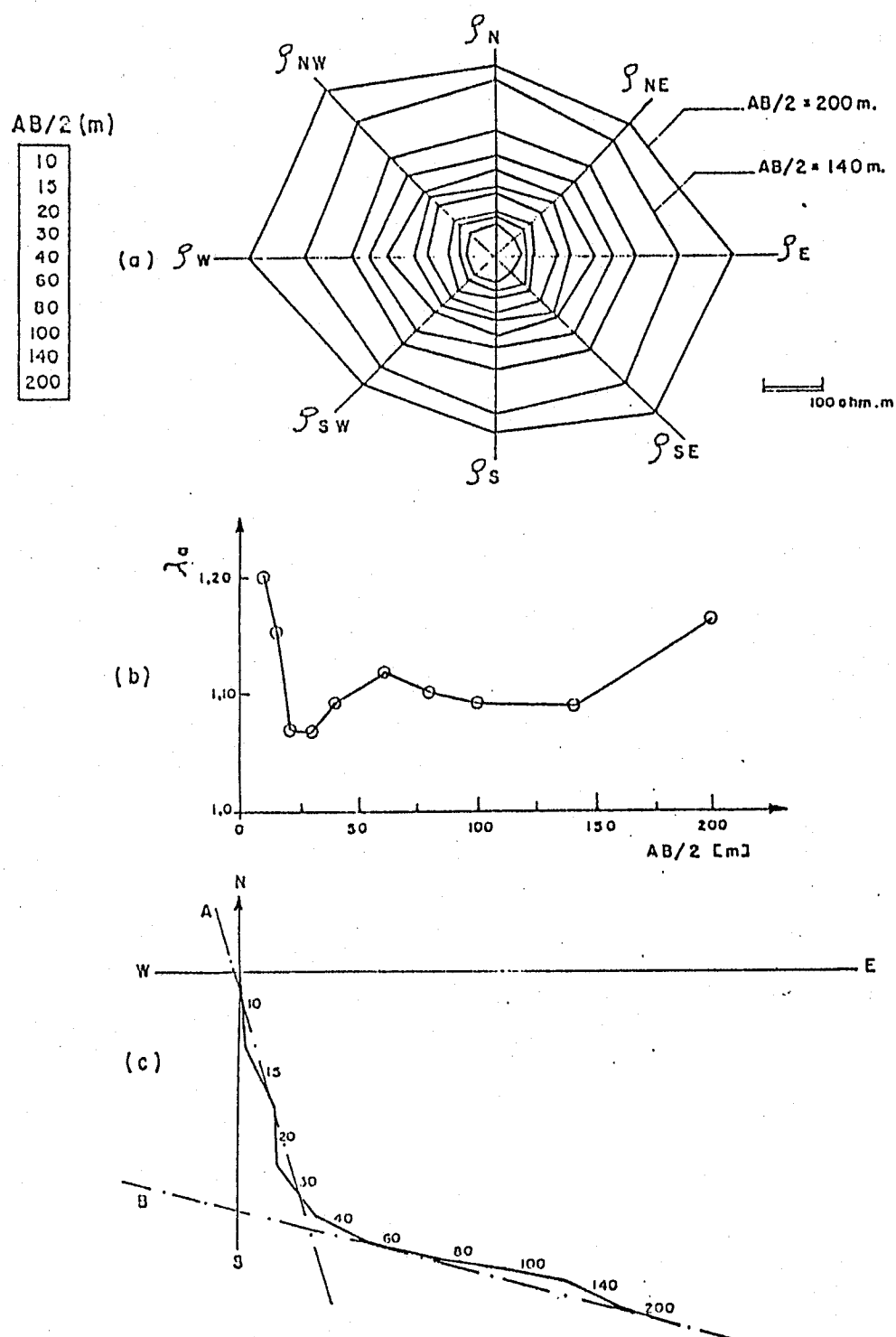


Fig.15 - Sondagem Elétrica Vertical Radial na Area II-SEVR 01

a) Polígono da Anisotropia Elétrica Horizontal

b) Variação do Grau de Fraturamento versus Profundidade Relativa

c) Ângulo Azimutal Médio da Zona Fraturada no Local 01

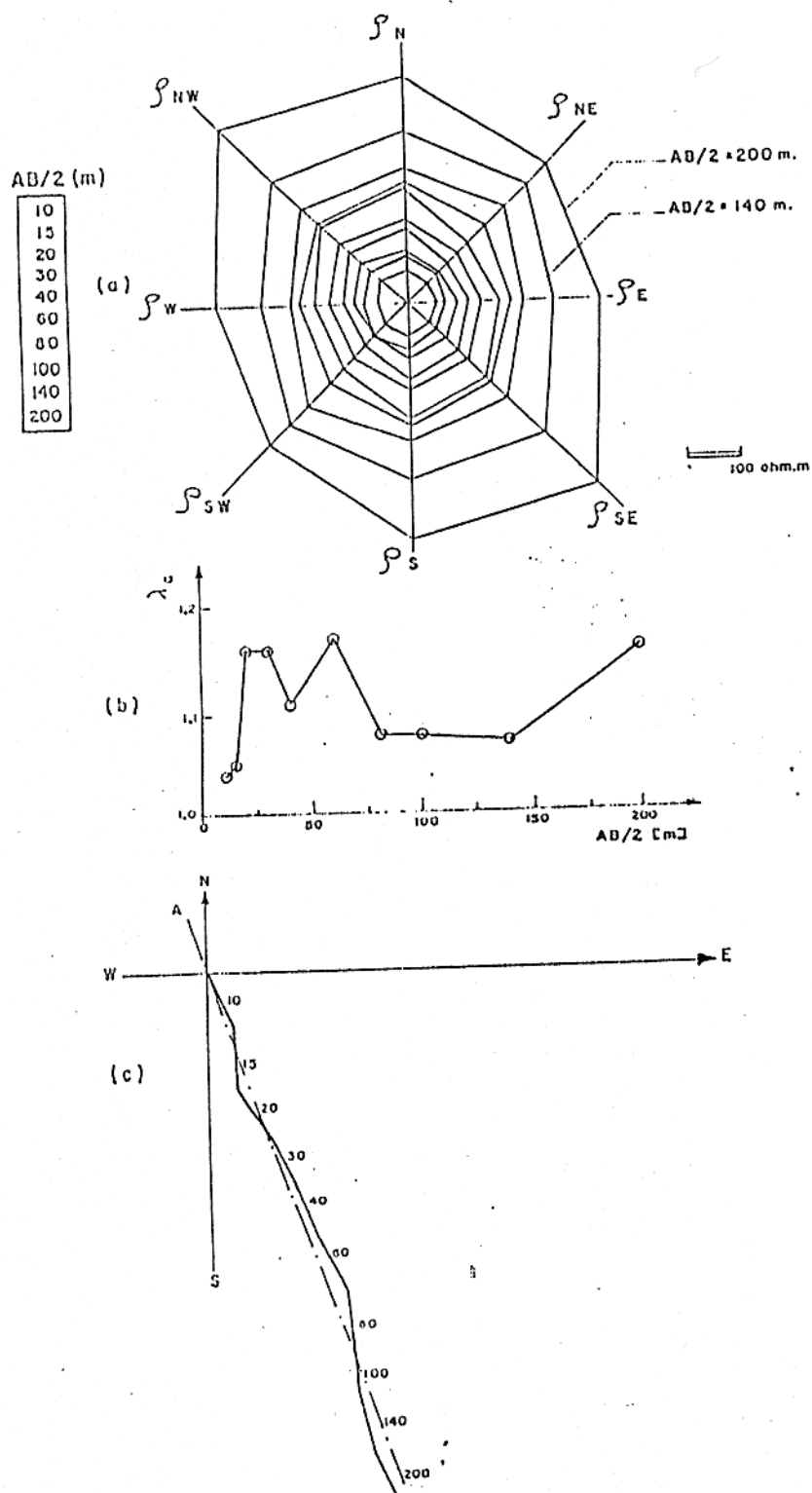


Fig.16 - Sondagem Elétrica Vertical Radial na Área II-SEVR 02

a) Polígono da Anisotropia Elétrica Horizontal

b) Variação do Grau de Fraturamento versus Profundidade Relativa

c) Ângulo Azimutal Médio da Zona Fraturada no Local 02

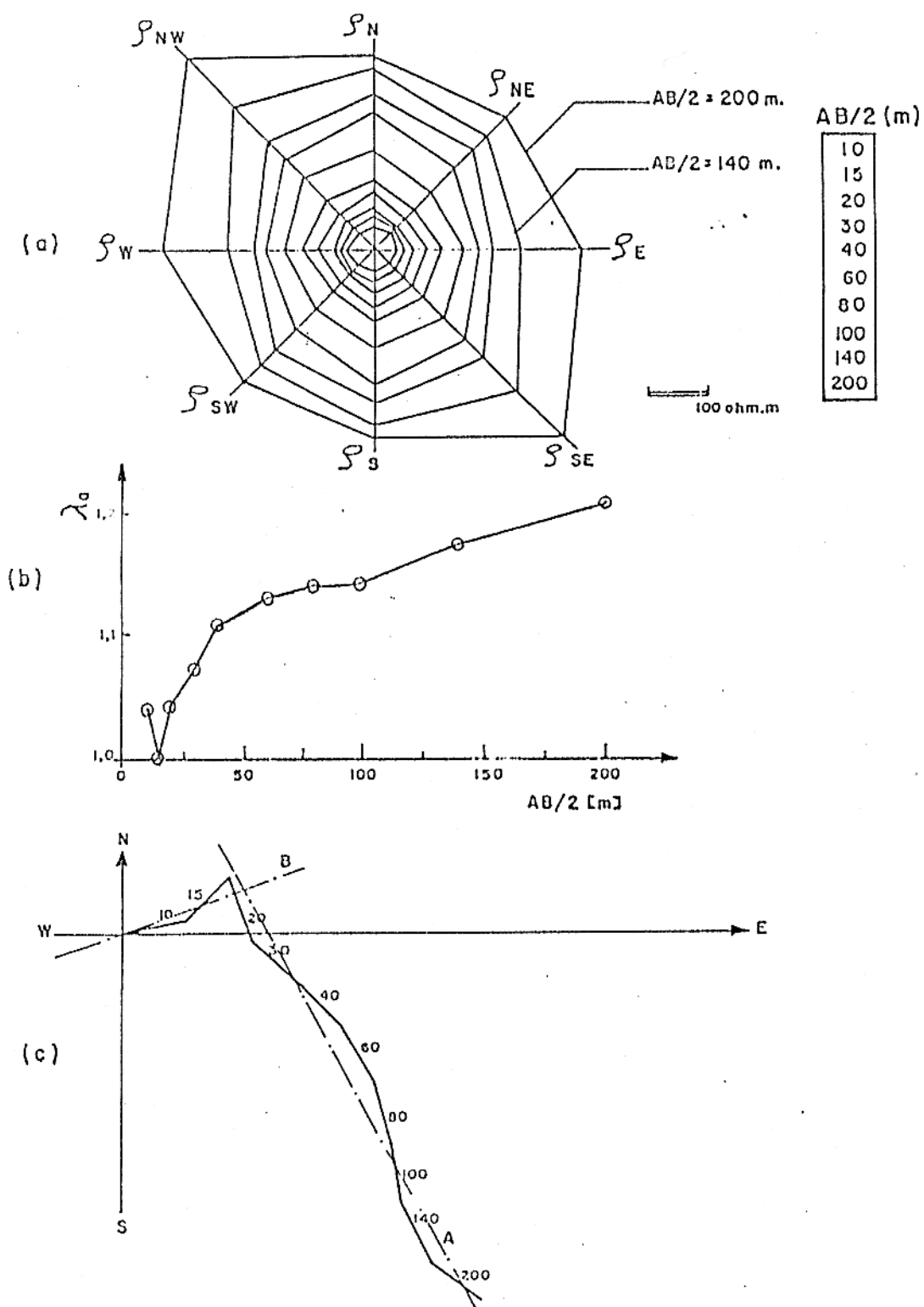


Fig.17 - Sondagem Elétrica Vertical Radial na Area II-SEVR 03
 a) Polígono da Anisotropia Elétrica Horizontal
 b) Variação do Grau de Fraturamento versus Profundidade Relativa
 c) Ângulo Azimutal Médio da Zona Fraturada no Local 03

5.2.2 - Detecção das Zonas Fraturadas

Após as investigações preliminares, foi executada uma perfilagem elétrica e eletromagnética combinadas, num total de doze perfis (descritos nos itens 4.1.6 e 4.1.2). As medidas foram feitas a cada 25m até um perfil máximo de 600m.

A Figura 18 mostra um perfil típico (P_1), obtido pelo método eletromagnético com duas frequências, e o respectivo perfil de eletroresistividade. Este perfil foi executado nas proximidades do poço de produção já existente para confirmar a sua localização adequada. Ambos os métodos apresentam diversas anomalias negativas, as quais podem ser associadas, com grande probabilidade, às zonas fraturadas.

Analizando os três gráficos da Figura 18, pode-se distinguir claramente uma sequência de quatro anomalias eletromagnéticas de frequência mais alta ($f = 2640\text{Hz}$). Comparando-se com o perfil de eletroresistividade, nota-se que especialmente a anomalia C tem, em relação as demais, uma mudança brusca na resistividade relativamente alta. Pode-se concluir com certeza que a anomalia C é uma zona fraturada, e que, provavelmente, as anomalias B e D também o sejam. A anomalia significativa no perfil eletromagnético mostra no perfil de eletroresistividade um mínimo suave que pode ser deduzido como efeito, causado pela variação da espessura do manto de intemperismo.

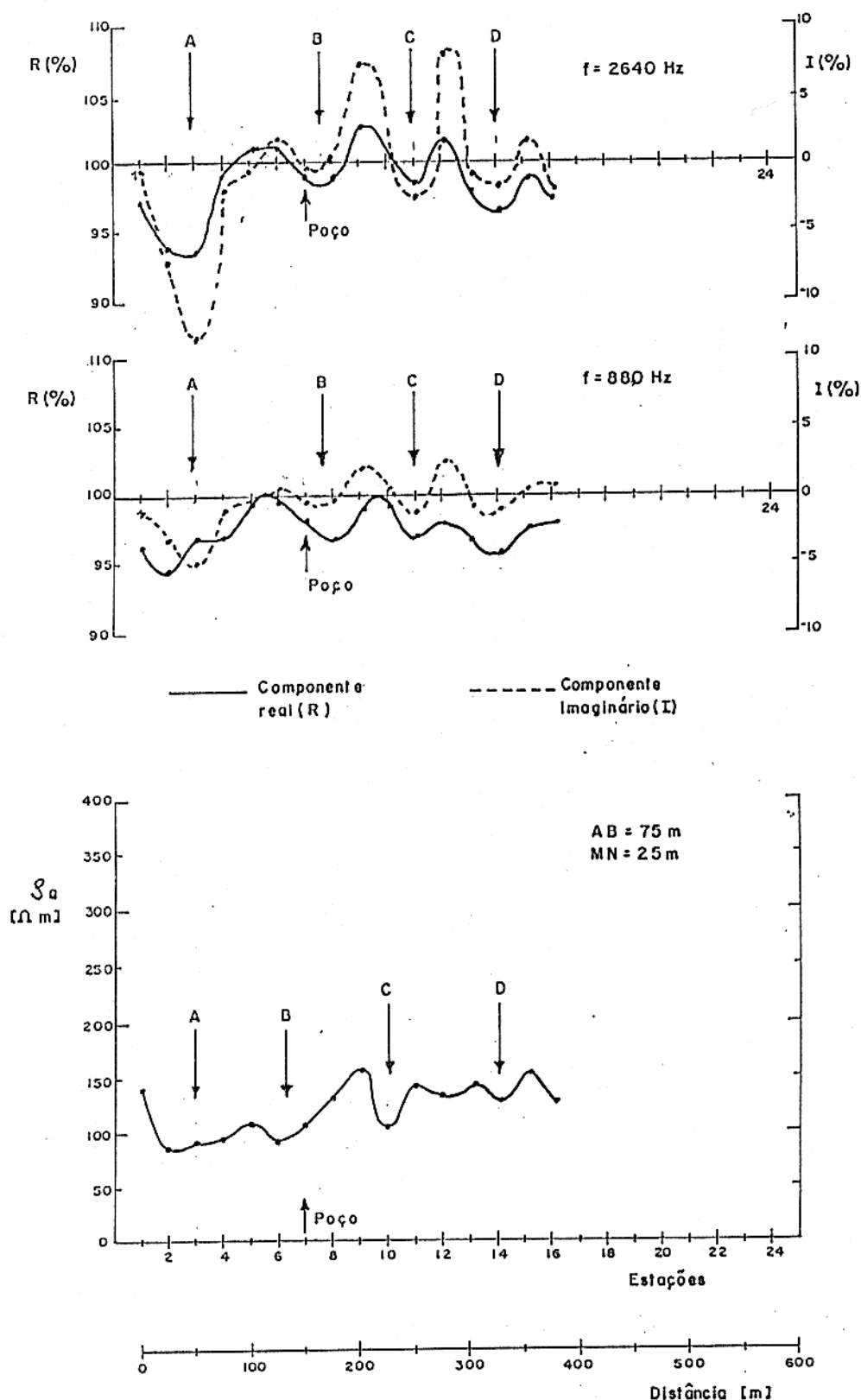


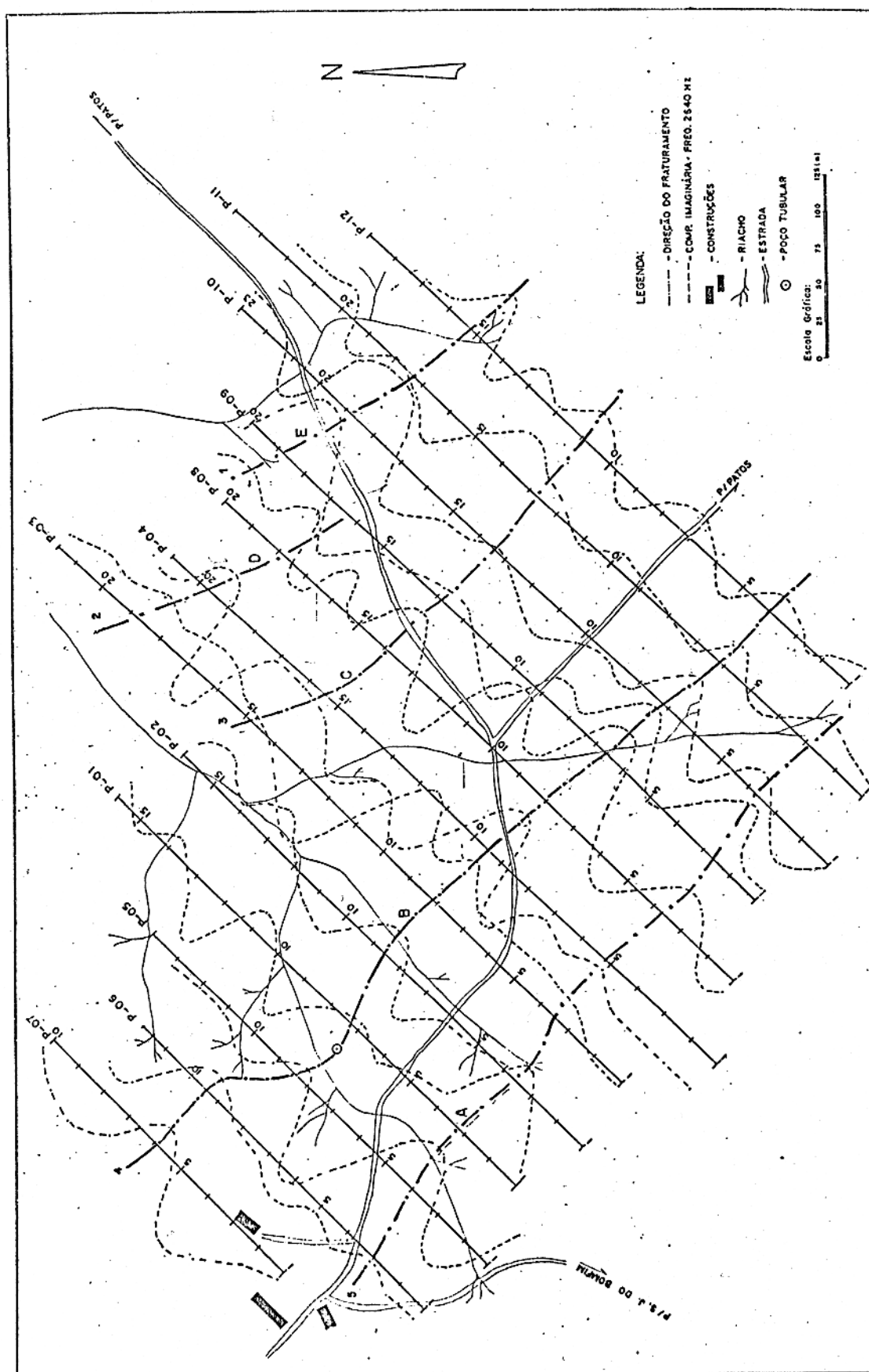
Fig.18 Perfis Geoeletricos ao longo do Perfil P-01 na Area II
 (As Setas indicam as Zonas Fraturadas)
 a) Perfil Eletromagnetico ($f = 2640\text{Hz}$ e $s = 50\text{m}$)
 b) Perfil Eletromagnetico ($f = 880\text{Hz}$ e $s = 50\text{m}$)
 c) Perfil de Eletroresistividade ($a = 25\text{m}$)

O poço de produção existente localiza-se à altura da estação 07 do perfil P_1 , mas segundo este perfil, tal poço seria de melhor vazão, se fosse perfurado à altura da estação 11.

Numa tentativa de interpretação semi-quantitativa, feita através do diagrama de Argand (Fig. 11) para a anomalia C (5% componente real e 10% componente imaginária para $f = 2640$ Hz e $s = 50$ m), estimou-se um parâmetro de resposta, $Q \approx 3$, e um parâmetro de profundidade, $z/s \approx 0.25$. Isto é uma condutância da zona fraturada, $T = 2.8$ (S), e profundidade, z , até o topo do condutor de 12.5m, os quais são com certeza valores razoáveis para esta região, mas, que deverão ser melhor analisados. com diagramas, que levam em consideração o efeito de intemperismo condutivo (SILVA et al, 1985).

Para mapear o alinhamento das zonas fraturadas na área de estudo, somente as componentes em quadratura dos doze perfis eletromagnéticos (Apêndice B) foram compiladas para frequências baixas (Fig. 19) e para frequências altas (Fig. 20). As duas figuras mostram a tendência geral das zonas fraturadas na direção NW - SE.

Todos os resultados deste capítulo são mais uma vez apresentados numa figura final (Fig. 21).



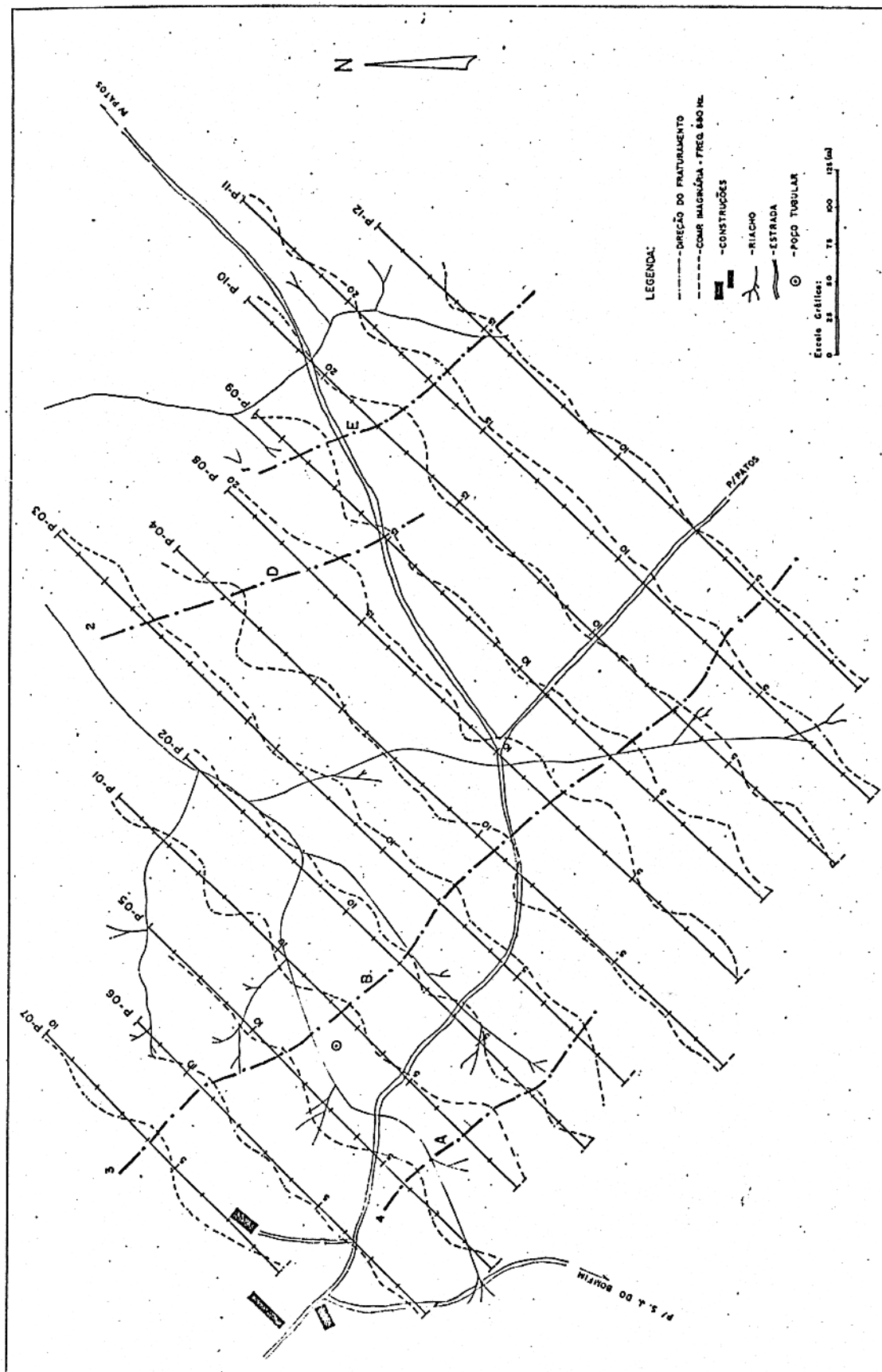


Fig. 20 - Compilação dos 12 Perfis Eletromagnéticos da Área II ($f = 880 \text{ Hz}$)

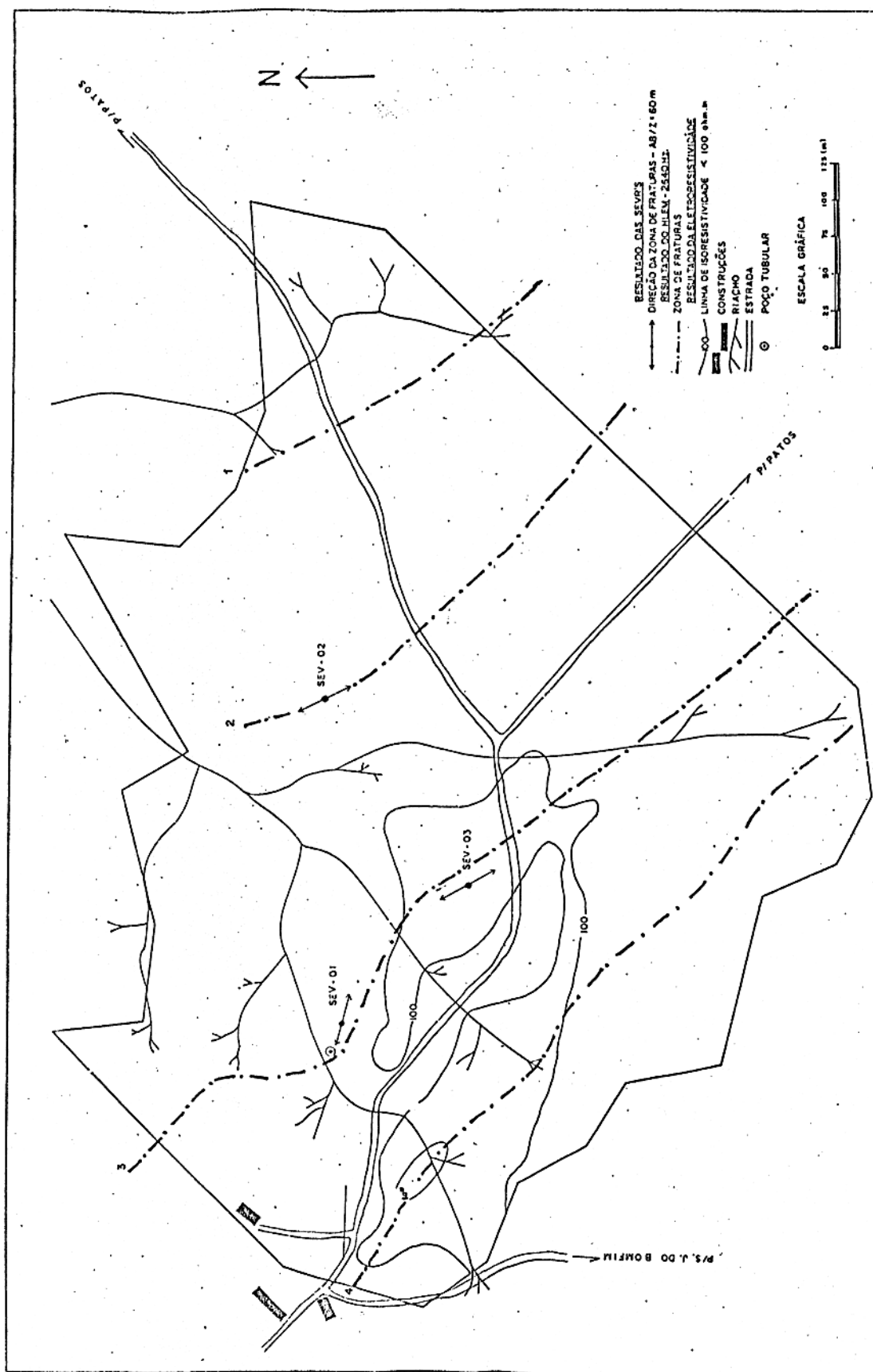


Fig. 21 - Área II com os Locais das 3 SEVRs e os Alinhamentos Principais das Zonas Fraturadas

5.3 - RESULTADOS DA AREA III

A área III, localizada a 5km ao leste da cidade de Santa Luzia, se apresenta no mapa geológico da Figura 22 (ANDRITZKY & BUSCH, 1975) como um aquífero aluvial largo e área de aproximadamente 60km². O objetivo geral foi a determinação da profundidade até o embasamento cristalino através de sondagens elétricas verticais. Foram feitas 60 SEVs (a distribuição destas podem ser vista na respectiva Figura 22) que podem ser classificadas em quatro grupos de curvas eletroresistivas dependentes do número de camadas (Fig. 23). A interpretação destas se fez possível através de calibração e quatro perfis litológico perfurados (ver Apêndice C).

Grupo I - 8% das SEVs aplicadas mostram duas camadas eletroresistivas distintas e foram executadas no leito do riacho.

Grupo II - 57% das SEVs mostram três camadas eletroresistivas distintas e foram calibradas através dos perfis litológicos A3-1 e A3-2

Devido a grande variação da resistividade da segunda camada de 4 Ohm.m a 80 Ohm.m, este grupo foi ainda subdividido em três subgrupos:

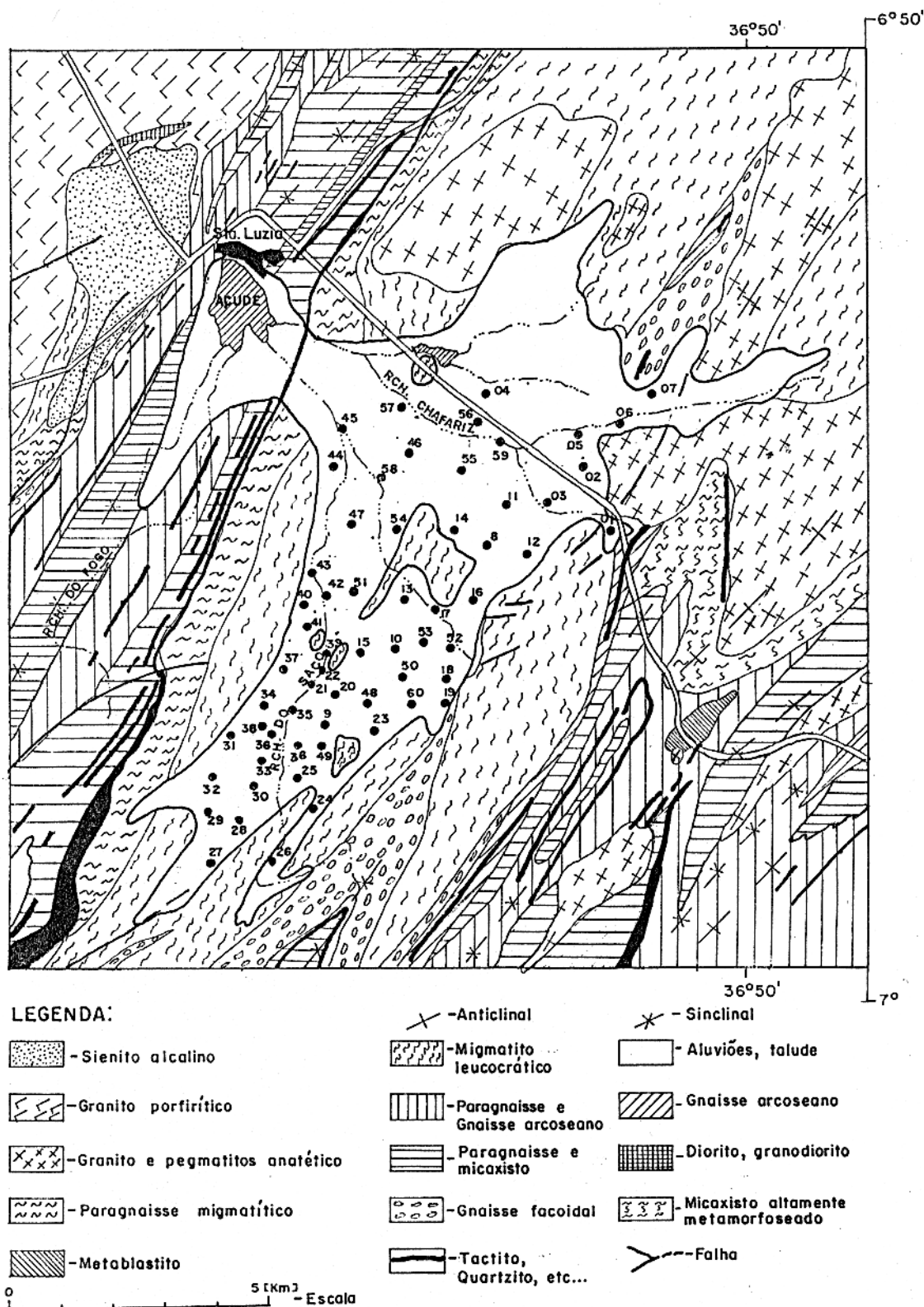


Fig.22 - Mapa Geológico da Area III e os Locais das SEVs Executadas

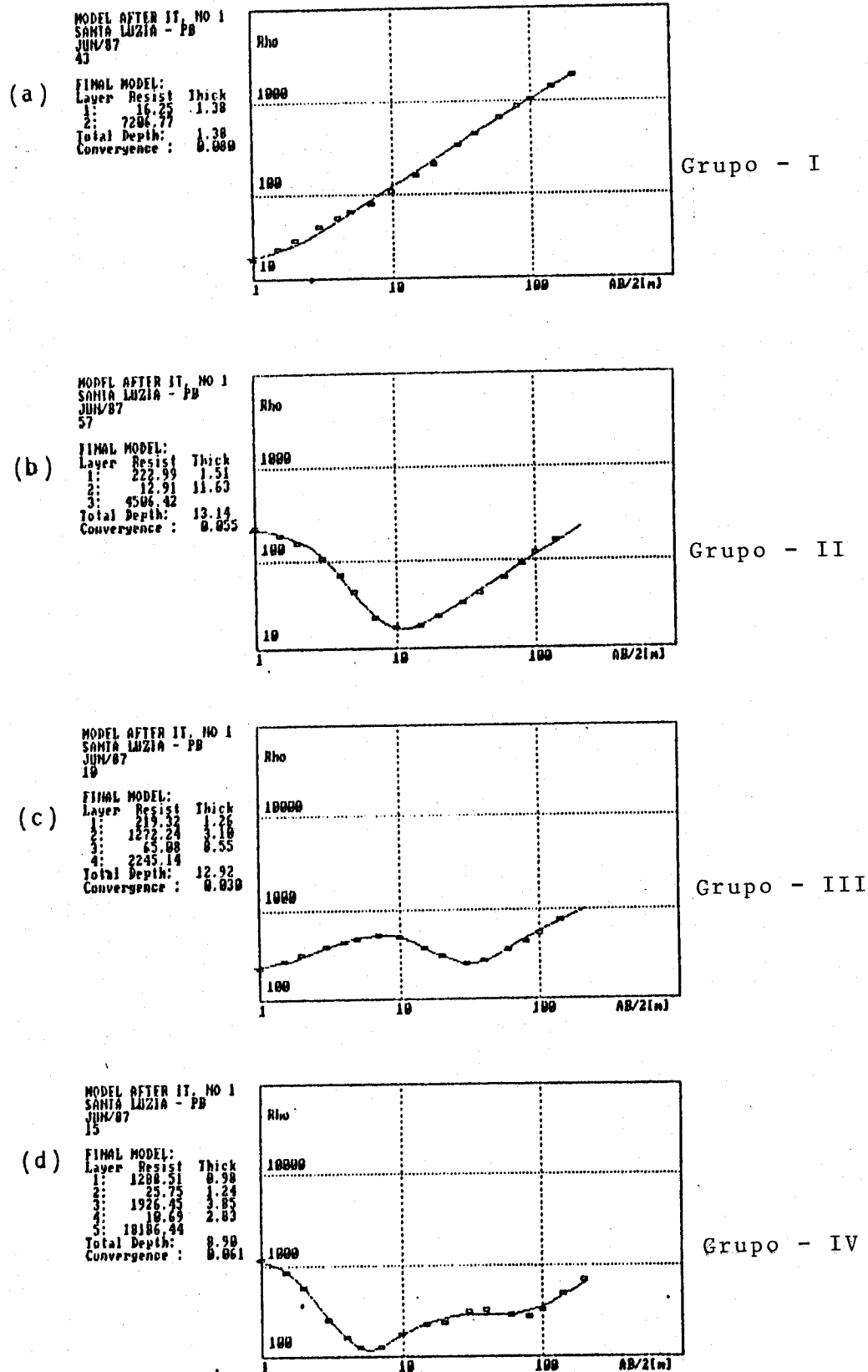


Fig.23 - Representação dos 4 Grupos Típicos da
Area III

IIA - Este subgrupo corresponde a zona, onde há predominância de argila e não deve conter água potável.

IIB - Este subgrupo corresponde a zona com predominância de areia, e há possibilidade de conter água potável.

IIC - Este subgrupo corresponde a zona, onde o manto de intemperismo é composto de cristalino fortemente alterado.

Grupo III - 7% das SEVs mostram quatro camadas eletroresistivas distintas e foram calibradas através do perfil litológico A3-1.

O perfil litológico mostrou, que a baixa resistividade da terceira camada corresponde ao alto grau de fraturamento do embasamento cristalino.

Grupo IV - 28% das SEVs mostram cinco camadas eletroresistivas distintas e foram calibradas através do perfil litológico A3-3.

A baixa resistividade da camada dois e quatro está associada a concentração de argila, enquanto, a alta resistividade está associada a concentração de areia seca.

A resistividade da primeira camada de qualquer dos grupos de curva de resistividade é muito variável devido a variação da salinidade no solo.

As profundidades das 60 sondagens elétricas verticais até o embasamento cristalino são plotadas em forma de curvas de isoespessuras da cobertura e são apresentadas como resultado final na Figura 24. Nota-se que a profundidade geral até o cristalino, exeto em poucos locais, não supera 5m.

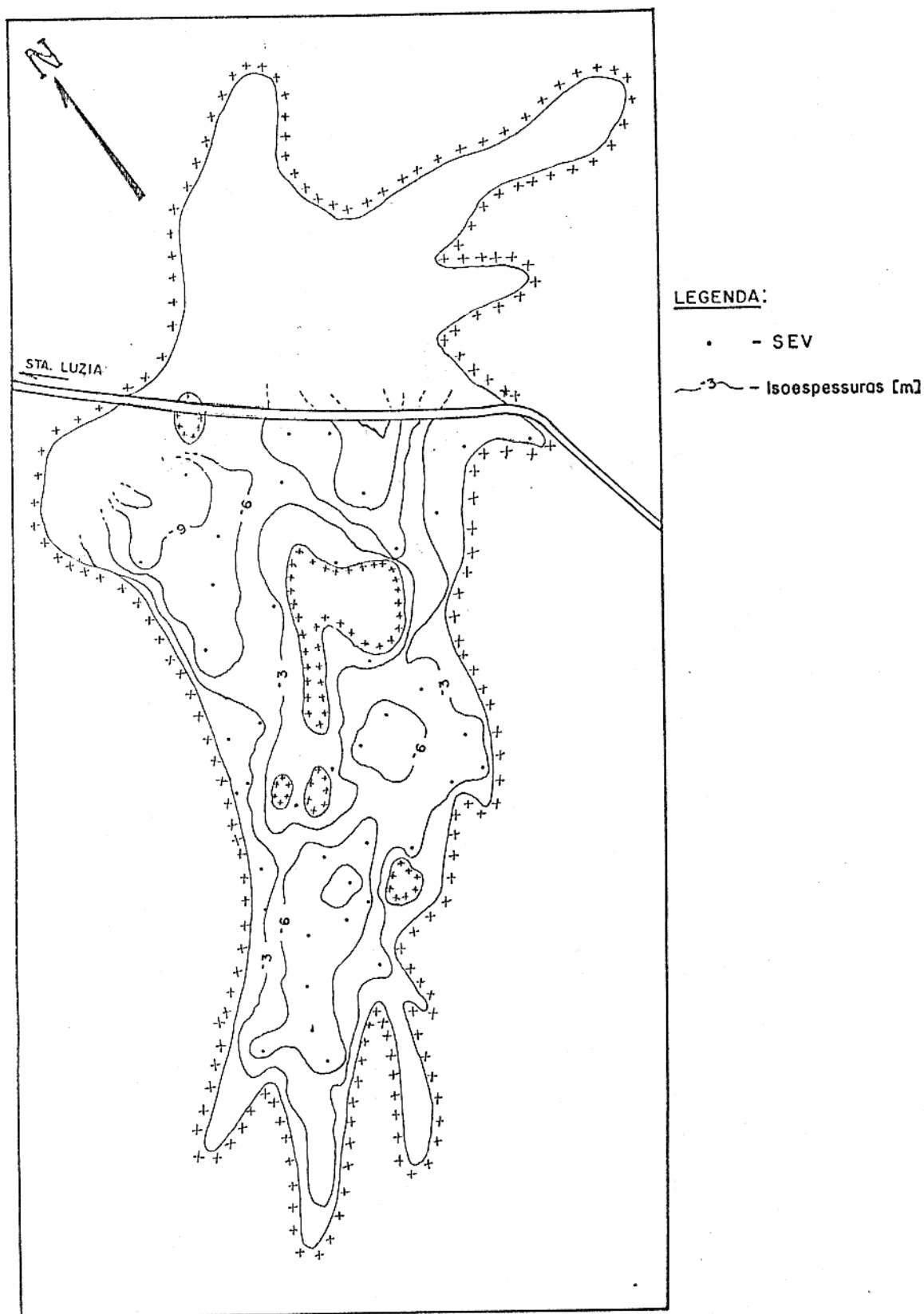


Fig.24 - Mapa de Isoespessura da Cobertura na Area III
Baseada nas 60 SEVs

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Três áreas de estudo, representando tipos diferentes de aquíferos, típicos do semi-árido do estado da Paraíba, foram investigados pelos métodos geoeletricos com a finalidade de pesquisar as suas propriedades hidrogeológicas em maiores detalhes.

O tipo de aquífero aluvial estreito foi pesquisado com perfilagem de eletroresistividade e comparado com o perfil eletromagnético para delimitar as margens do aquífero contido no embasamento cristalino. A metodologia teve uma certa semelhança com a detecção de paleocanais na Ilha de Marajó, feita por vários grupos de pesquisadores do Centro de Ciências da UFPa - Belém, PA (PORSANI, 1981; GUIMARAES, 1983 e VERMA & BISCHOFF, 1989).

Em Marajó, os paleocanais de material menos condutivo são encaixados em sedimentos mais condutivos (argilosos). Enquanto os aquíferos aluviais estreitos da região semi-árida paraibana consistem de material mais condutivo e são delimitados pelo cristalino Pré-Cambriano muito resistivo.

Um perfil piloto medido transversalmente ao aquífero aluvial raso, tanto pelo método da eletroresistividade como pelo método eletromagnético, revelou principalmente o mesmo formato geológico, provando assim o emprego possível da perfilagem eletromagnética rápida no mapeamento deste tipo de

aquífero. Por isso, este procedimento eletromagnético foi adotado na detecção das zonas fraturadas no cristalino Pré-Cambriano da área II.

Uma vez determinada a direção principal das zonas fraturadas nesta área de estudo através da técnica de sondagem elétrica vertical radial, uma ampla perfilagem elétrica e eletromagnética realizada revelou anomalias significantes de boa resolução, especialmente anomalias eletromagnéticas da componente imaginária em alta frequência, que podem ser interpretadas como sendo zonas fraturadas (BISCHOFF et al, 1988).

Um levantamento eletromagnético semelhante, com a finalidade de explorar água subterrânea para o consumo humano, foi feito numa região semi-árida no Burkina Faso (África) pelo PALACKY et al (1981) mostrando perfis eletromagnéticos análogos. Perfurações nos locais das anomalias eletromagnéticas significantes provaram a ocorrência de água subterrânea nas zonas fraturadas do embasamento cristalino.

Tais resultados reforçam a confiabilidade do levantamento eletromagnético realizado na área II. Nesta, um poço de produção existente há alguns anos com vazão de $2.5\text{m}^3/\text{h}$, localizado nas proximidades de uma anomalia significativa, indica a existência de zonas fraturadas saturadas com água subterrânea.

O levantamento eletromagnético, fazendo uso do sistema móvel de Slingram, que é rápido e de fácil execução, mesmo em

terrenos de vegetação densa, mostra uma boa resolução, especialmente em alta frequência. Na investigação das zonas fraturadas no embasamento cristalino, pode acontecer que uma anomalia eletromagnética seja interpretada como sendo ocorrência de zona fraturada, revelando-se posteriormente, numa análise mais detalhada, como uma variação na espessura do manto de intemperismo condutivo. Esta interpretação enganosa pode ser evitada. Para isso, um perfil de eletroresistividade executado neste local, mostrando uma variação repentina na alta resistividade, confirma a existência de uma zona fraturada.

Ambos os métodos apresentam a mesma deficiência em não permitir a distinção entre fraturas preenchidas de material argiloso e fraturas saturadas com água de salinidade variável. Um engano deste ocorreu num trabalho de consultoria, realizado pelo autor numa ocasião posterior em área semelhante desta região. Uma perfuração, feita por empresa local, constatou este fato.

O estudo da extensa área III foi uma investigação, que usou o tradicional método de eletroresistividade para determinar a profundidade até o embasamento cristalino. A finalidade foi, avaliar as propriedades hidrogeológicas de um dos poucos aquíferos largos, existente na região semi-árida do estado da Paraíba.

O procedimento de campo e a interpretação das curvas de

resistividade medidas se orientou no amplo estudo geofísico, realizado no vale do Apodi - RN (RIJO et al, 1977). O resultado, a partir de sessenta sondagens elétricas verticais efetuadas na área III, revelou que este aquífero, aparentemente largo, consiste de um sistema de vários riachos aluviais estreitos, distribuídos numa grande área de cobertura sedimentar com espessura máxima de seis a oito metros, portanto, não mostra boas características hidrogeológicas para o aproveitamento na agricultura e/ou pecuária.

7. CONCLUSÃO

O trabalho mostra que métodos geofísicos, particularmente de eletroresistividade e eletromagnético, podem ajudar na prospecção de água subterrânea na região semi-árida.

Embora, todos os métodos geofísicos sejam principalmente métodos indiretos e geralmente não possibilitam a localização direta dos depósitos de água subterrânea, o emprego destes, junto com os estudos geológicos e hidrológicos, facilitam a prospecção de água subterrânea, fornecendo informações importantes sobre a sua possível ocorrência de maneira rápida e com menores custos do que todos os outros métodos de prospecção não geofísicos.

Métodos geofísicos aplicados à hidrogeologia de aluvião têm a finalidade de determinar a espessura e os limites laterais de um aquífero aluvial. Um trabalho geofísico deste tipo foi realizado nas áreas I e III, executando numerosas sondagens elétricas verticais e perfis de eletroresistividade para mapear as dimensões geométricas dos respectivos aquíferos aluviais.

Por outro lado, a geofísica aplicada tenta detectar locais promissores para a ocorrência de água subterrânea em zonas fraturadas no embasamento cristalino. Tradicionalmente, o método de eletroresistividade é amplamente utilizado devi-

do ao fácil manejo operacional no procedimento de campo. Este trabalho mostra num estudo detalhado na área II, que o método eletromagnético, bem sucedido na prospecção de minério, poderá ser empregado na detecção de zonas fraturadas com bom êxito, quanto aos custos operacionais, à rapidez de execução e a exatidão e resolução das medições.

Este estudo hidrogeológico conclui que o emprego do método eletomagnético é mais vantajoso que o demorado e penoso método da eletroresistividade na hidrogeologia do cristalino das regiões semi-áridas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. do P.T. 1984. Os Recursos Hídricos de Água Subterrânea do Trópico Semi-Arido do Estado da Paraíba. Campina Grande - Pb, 191 p. (Tese de Mestrado, UFPb/CCT/DEC).
- ANDRITZKY, G. & BUSCH, K. 1975. Mapa Geológico da Região de Santa Luzia, Pb 1:100000. Recife - Pe, SUDENE - DRN, Divisão Geologia.
- BHATTACHARYA, P.K. & PATRA, H.P. 1968. Direct Current Geoelectric Sounding. Amsterdam, Elsevier, 133 p. (Methods in Geochemistry and Geophysics, 9)
- BISCHOFF, J., VITORINO, S.F., SCHUSTER, H.D. & PLAUMANN, G. 1988. Electromagnetic Prospecting for Groundwater in the Semi-Arid Region of Paraíba. In : CONGR. BRAS. GEOLOGIA, 35, Belém - Pa, 1988. Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém - Pa, SBG. V. 4, p. 1539-1550.
- GHOSH, D.P. 1971. The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Sounding Measurements. Geophysical Prospecting, 19: 192-217.
- GRANT, F.S. & WEST, G.F. 1965. Interpretation Theory in Applied Geophysics. New York, McGraw-Hill, 584 p. (International Series in the Earth Sciences).

- GUIMARÃES, P.P.D. 1983. Métodos Sísmicos de Refração e Eletromagnético Aplicado ao Estudo de um Paleocanal na Ilha de Marajó. Belém - Pa, 83 p. (Tese de Mestrado. NCGG/UFPa).
- JOHANSEN, H.K. 1975. An Interactive Computer/Graphic Display-Terminal System for Interpretation of Resistivity Sounding. Geophysical Prospecting, 23: 335-362.
- JOHANSEN, H.K. 1977. A Man/Computer Interpretation System for Resistivity Sounding over a Horizontally Stratified Earth. Geophysical Prospecting, 25: 667-671.
- KUNETZ, G. 1966. Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. Stuttgart, Gebrueder Borntraeger, 103 p.
- MALLIK, S.B., BHATTACHARYA, D.C. & NAG, S.K. 1983. Behaviour of Fractures in Hard Rocks. A Study by Surface Geology and Radial VES Method. Geoexploration, 21: 181-189.
- MEDEIROS, J.A.F. & ALBUQUERQUE, J. do P.T. 1969. Carta Geológica da Província Scheelitífera da Borborema 1:250000. Recife - Pe, SUDENE/DRN.
- PALACKY, G.J., RITSEMA, I.L. & DE JONG, S.J. 1981. Electromagnetic Prospecting for Groundwater in Precambrian Terrains in the Republic of Upper Volta. Geophysical Prospecting, 29: 932-955.

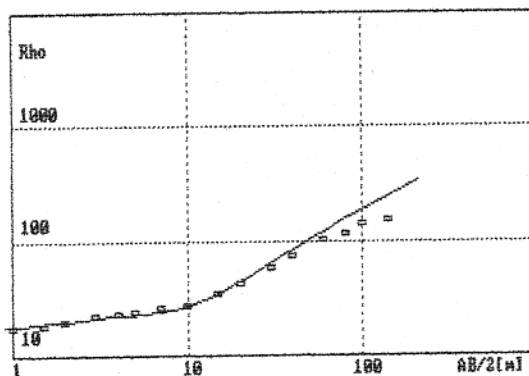
- PORSANI, M.J. 1981. Paleocanais, uma opção para a prospecção de água subterrânea rasa na Ilha de Marajó. Belém - Pa, 109 p. (Tese de Mestrado, NCGG - UFPa).
- RIJO, L., PELTON, W.H., FEITOSO, E.C. & WARD, S.H. 1977. Interpretation of Apparent Resistivity Data from Apodi Valley, Rio Grande do Norte, Brazil. Geophysics, 42: 811-822.
- SILVA, L.M.C., VERMA, O.P. & GALVAO, M.V.G. 1985. Curvas de Interpretação Eletromagnética (HLEM) para Corpos Tabulares sob Manto de Intemperismo. Belém, NCGG/UFPa. 91 p.
- VERMA, O.P. & BISCHOFF, J. 1989. Laboratory and Field Studies of the Application of Electromagnetic Prospecting for Groundwater on Marajó Island, Brazil. Geophysics, 54: 23-30.
- WARD, S.H. 1967. - Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In: Mining Geophysics. Tulsa, Soc. of Exploration Geophysicists, V.2, p. 10-196.

APENDICE A (AREA I)

07 SEVs

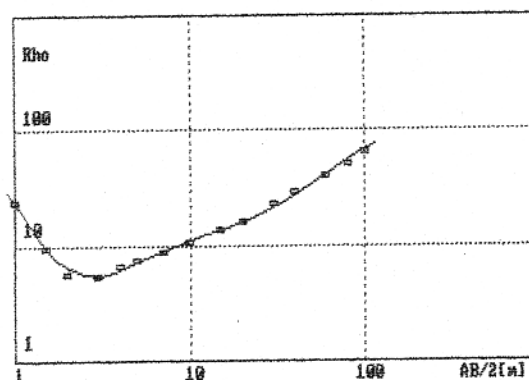
FAZ, MIRAFRAM
24.07.86
01

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 17.00 1.00
2: 25.00 3.50
3: 3.50 0.90
4: 1000.00
Total Depth: 5.40



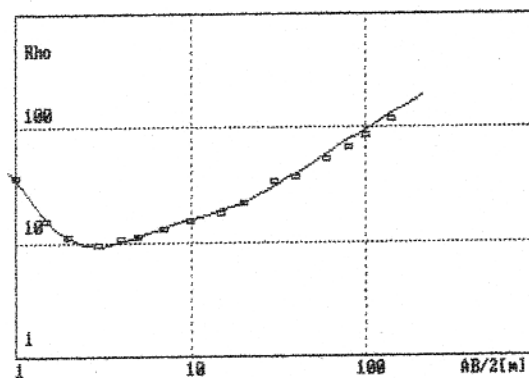
FAZ, MIRAFRAM
24.07.86
02

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 75.23 0.40
2: 3.37 1.72
3: 20.99 5.50
4: 1.20 0.90
5: 1046.00
Total Depth: 8.52



FAZ, MIRAFRAM
24.07.86
03

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 103.99 0.40
2: 6.62 1.95
3: 23.30 5.40
4: 1.80 0.90
5: 1383.56
Total Depth: 8.65



FAZ, MIRAFRAM
26.07.86
04

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 3.19 0.40
2: 16.93 0.60
3: 1.60 0.90
4: 230.00
Total Depth: 1.90

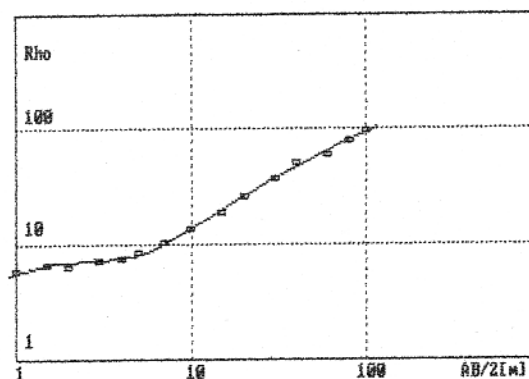
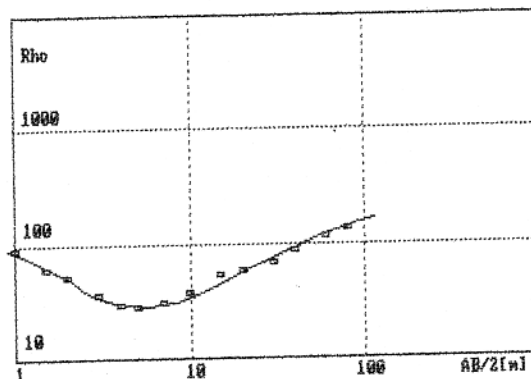


Fig.25 - SEVs da Area I

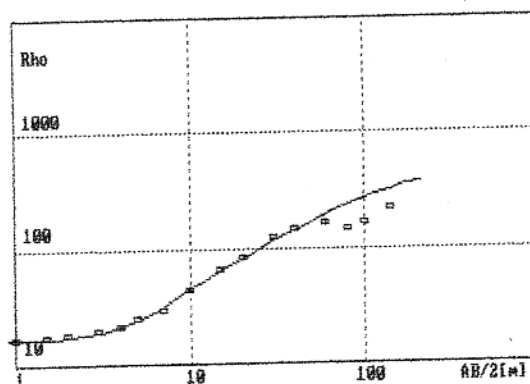
FAZ. MIRAFRAM
16-07-86
05

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 100.00 0.70
2: 25.26 4.00
3: 6.00 0.80
4: 230.00
Total Depth: 5.50



FAZ. MIRAFRAM
27-07-86
06

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 16.00 3.50
2: 500.00
Total Depth: 3.50



FAZ. MIRAFRAM
28-07-86
07

START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 134.00 1.00
2: 40.00 4.88
3: 500.00
Total Depth: 5.88

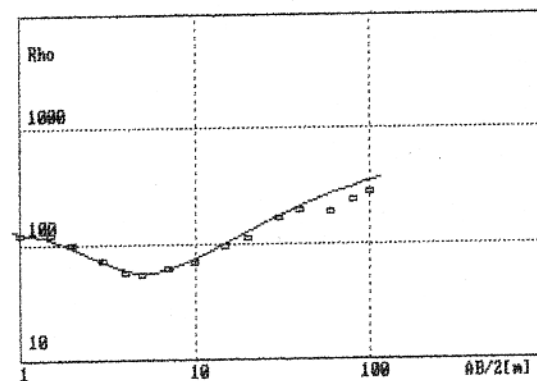


Fig.26 - SEVs da Area I

APENDICE B (AREA II)

03 Tabelas das SEVR

12 Perfis Elétricos e Eletromagnéticos

TABELA I - SEVR 01

AB/2	DIREÇÃO DAS MEDIDAS DE RESISTIVIDADE				COEFICIENTE DE ANISOTROPIA λ_a	AZIMUTE DA FRATURA ϕ
	N-S	E-W	NE-SW	NW-SE		
10	47	66	50	52	1,20	177,0
15	60	70	68	82	1,13	153,0
20	73	85	93	94	1,07	177,6
30	111	115	109	125	1,07	142,1
40	135	120	133	152	1,09	115,9
60	177	145	144	159	1,12	102,6
80	207	172	193	203	1,10	97,9
100	245	207	225	239	1,09	100,1
140	320	288	280	318	1,09	114,9
200	412	320	332	390	1,16	106,1

TABELA II -SEVR 02

AB/2	DIREÇÃO DAS MEDIDAS DE RESISTIVIDADE				COEFICIENTE DE ANISOTROPIA λ_a	AZIMUTE DA FRATURA ϕ
	N - S	E - W	NE - SW	NW - SE		
10	61	64	59	63	1,04	153,5
15	78	86	83	84	1,05	176,5
20	94	106	82	108	1,16	147,4
30	115	141	107	134	1,16	156,9
40	136	159	138	160	1,11	158,1
60	177	215	160	206	1,17	154,8
80	191	221	208	215	1,08	173,4
100	215	253	254	260	1,08	175,5
140	267	302	321	339	1,07	166,4
200	350	433	378	468	1,16	156,3

TABELA III - SEVR 03

AB/2	DIREÇÃO DAS MEDIDAS DE RESISTIVIDADE				COEFICIENTE DE ANISOTROPIA λ_a	AZIMUTE DA FRATURA ϕ
	N-S	E-W	NE-SW	NW-SE		
10	42	39	38	37	1,04	80,8
15	54	54	50	50	1,00	45,0
20	65	69	59	62	1,04	161,6
30	91	95	76	88	1,07	144,2
40	114	117	94	116	1,11	138,9
60	144	162	134	167	1,13	149,3
80	179	225	183	210	1,14	164,8
100	197	257	235	256	1,14	170,4
140	240	296	266	335	1,17	154,5
200	343	315	308	450	1,23	129,4

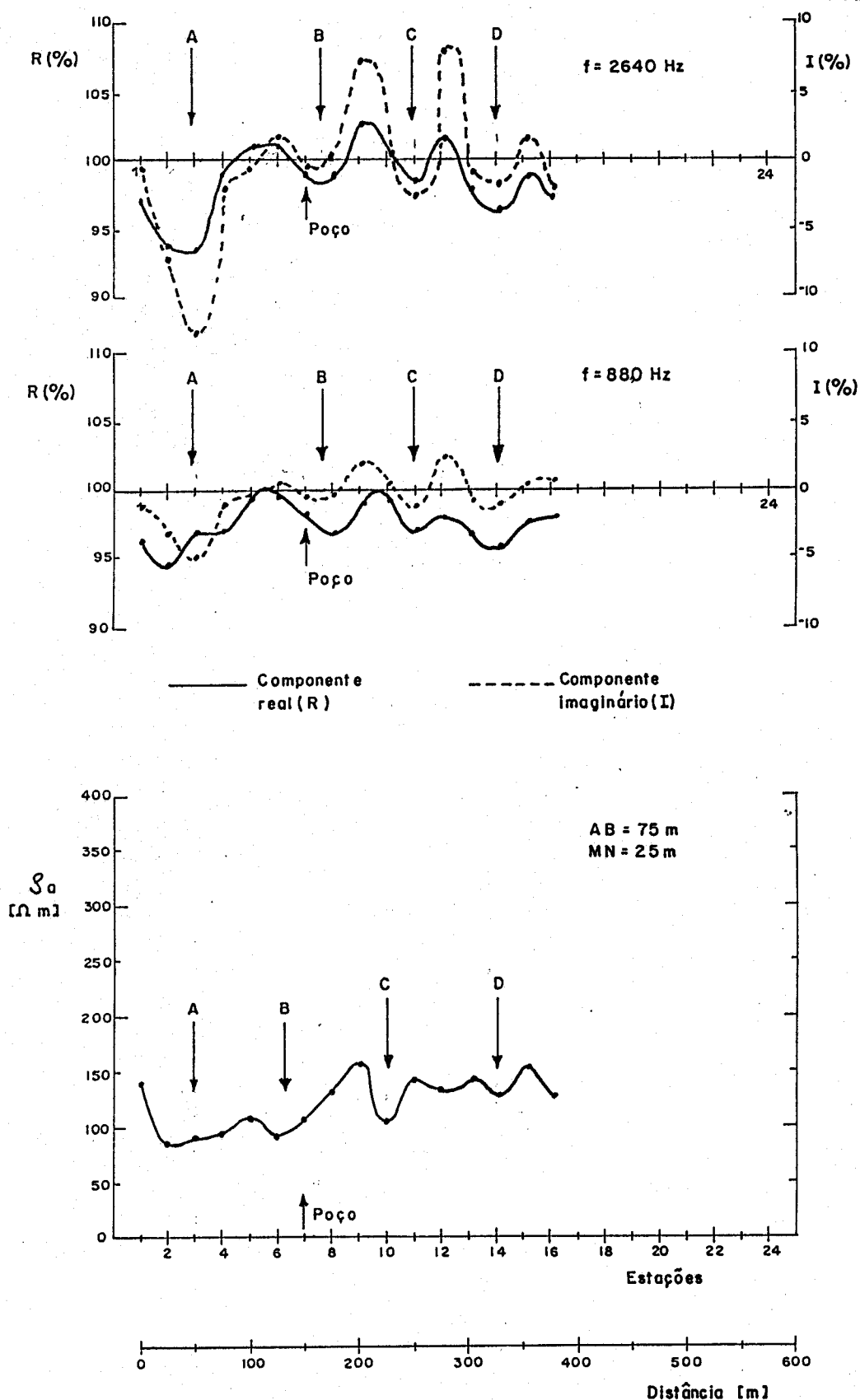


Fig.27 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_1 - Area II
 Fazenda Santa Rosa - Patos PB

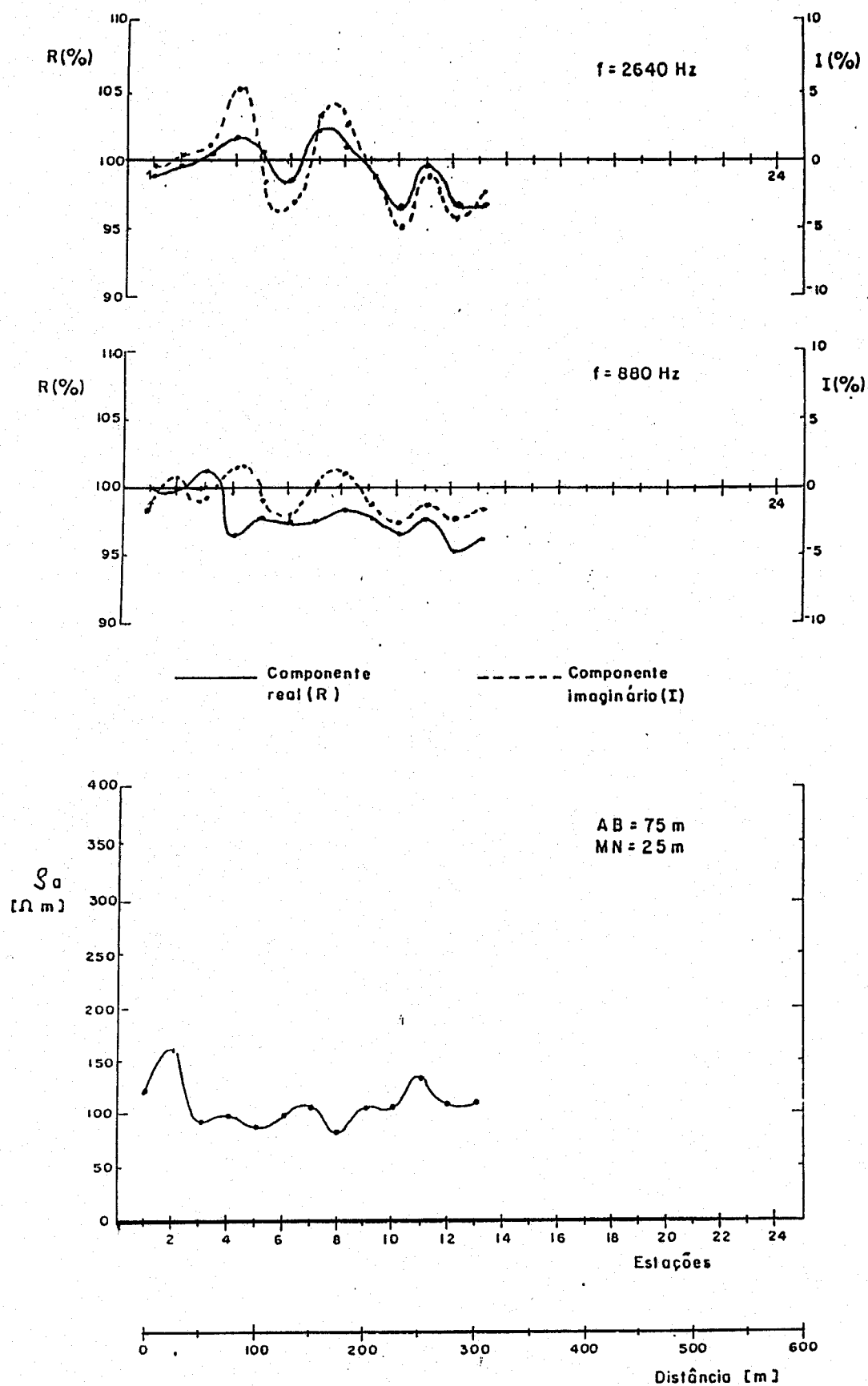


Fig.28 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_2 - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

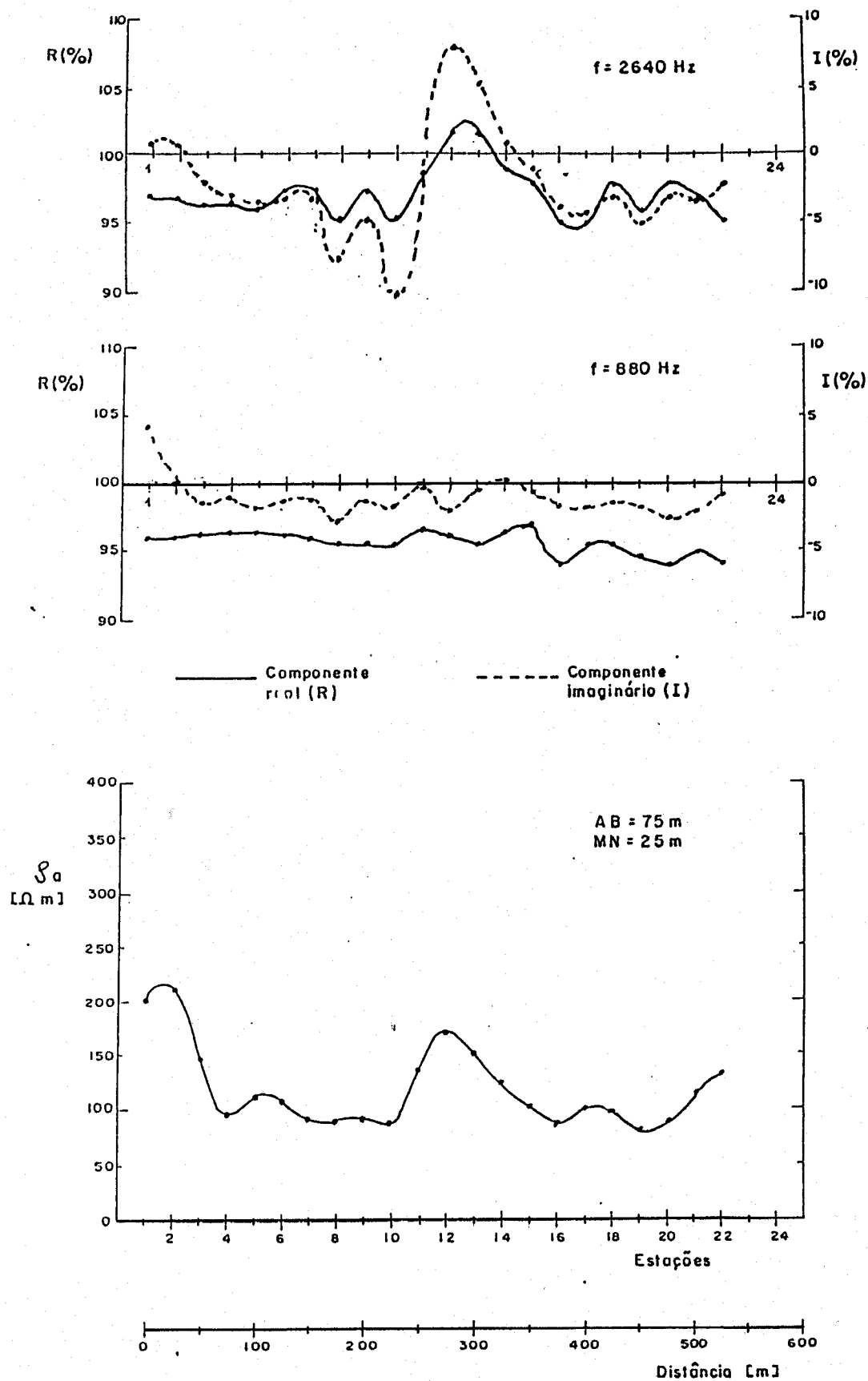


Fig.29 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P₃ - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

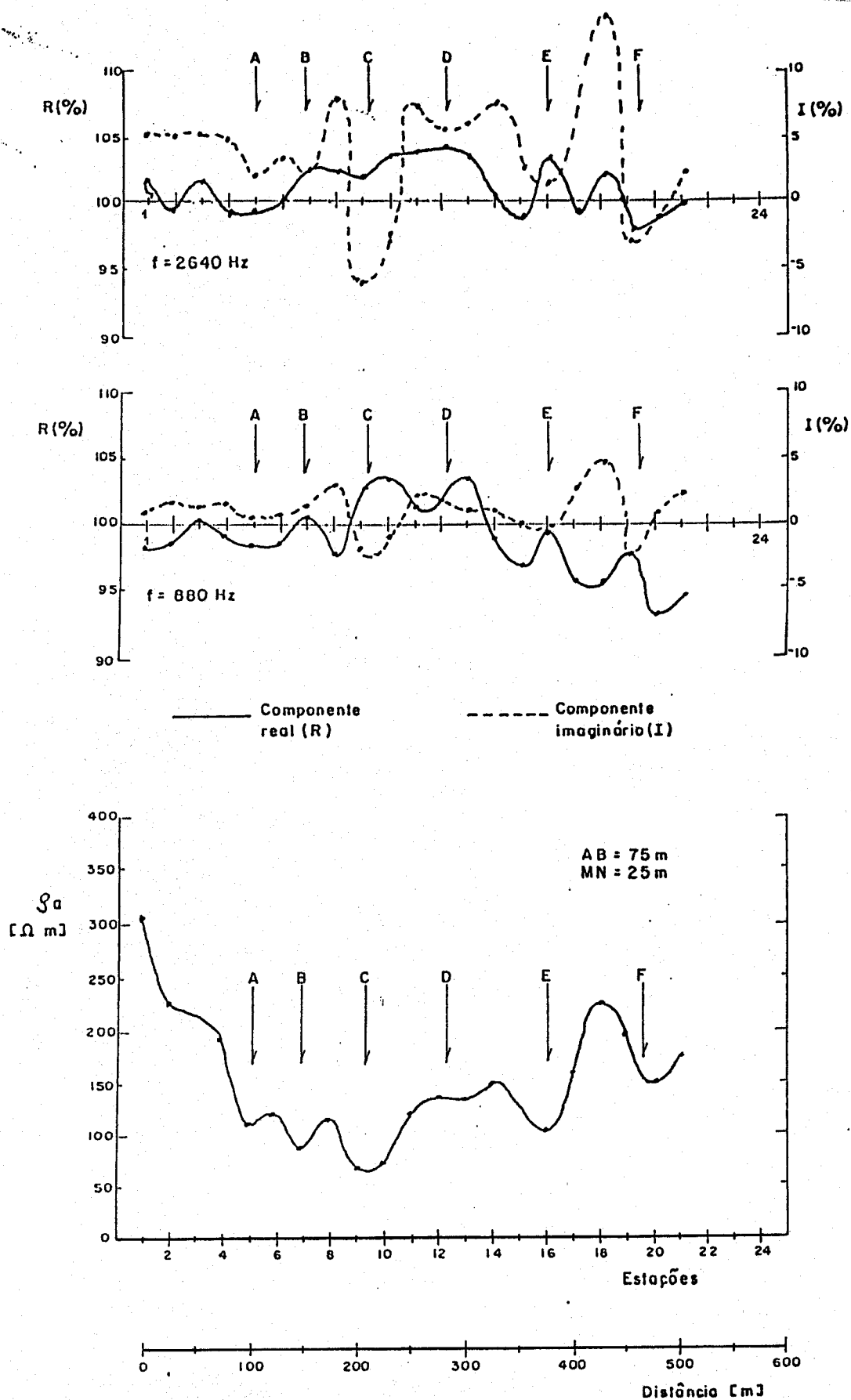


Fig.30 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_4 - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

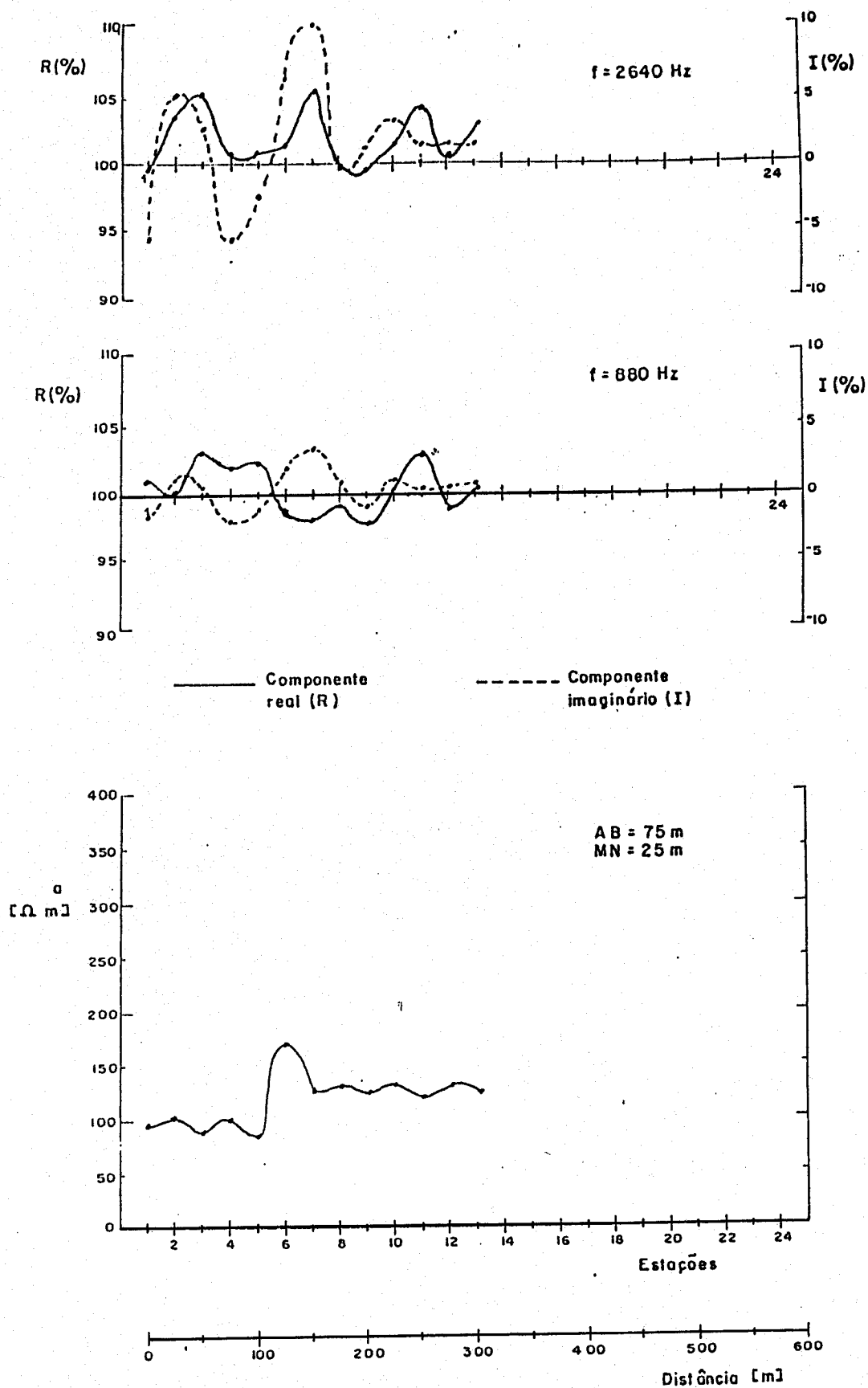


Fig.31 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_5 - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

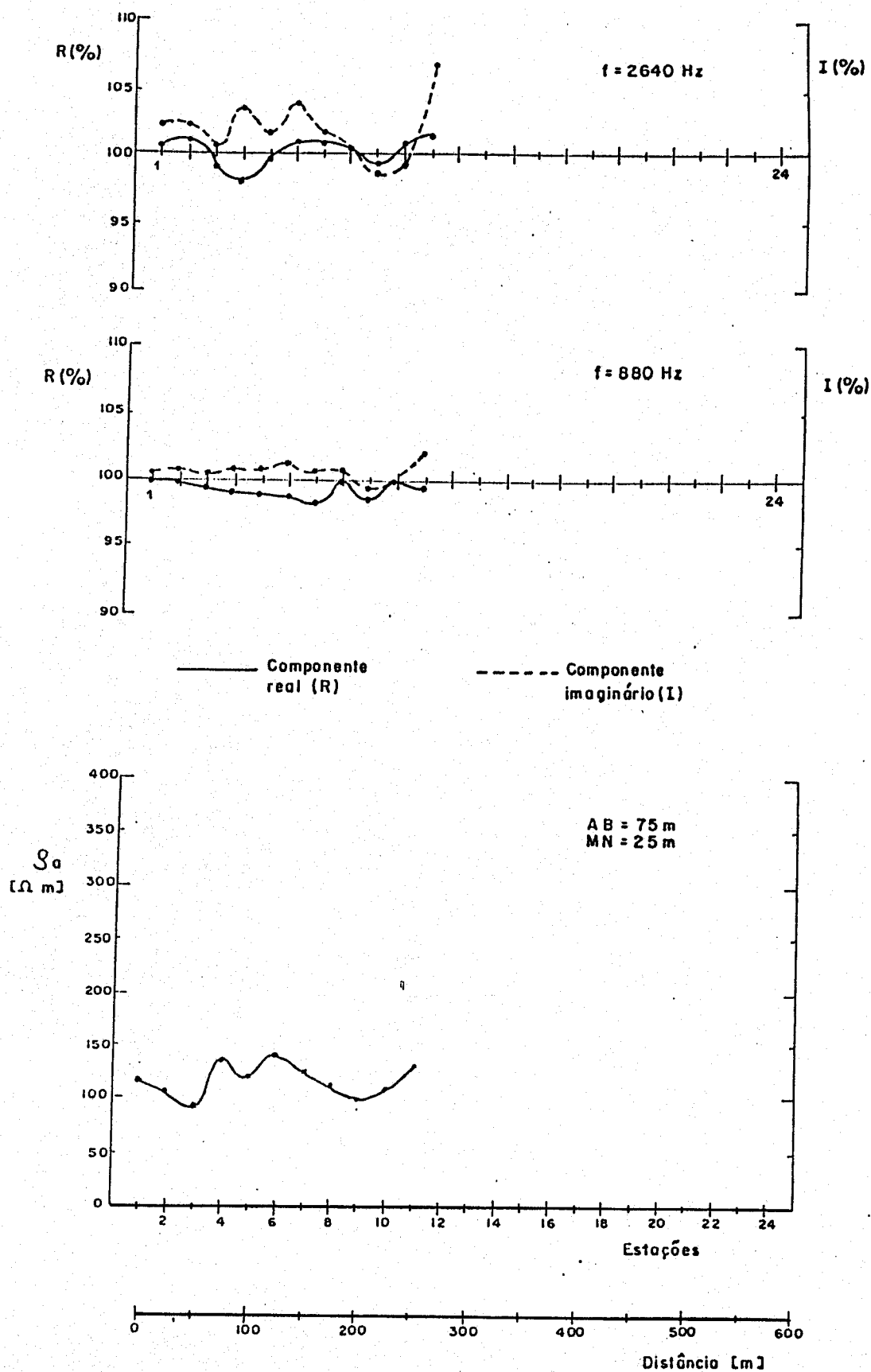


Fig.32 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_6 - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

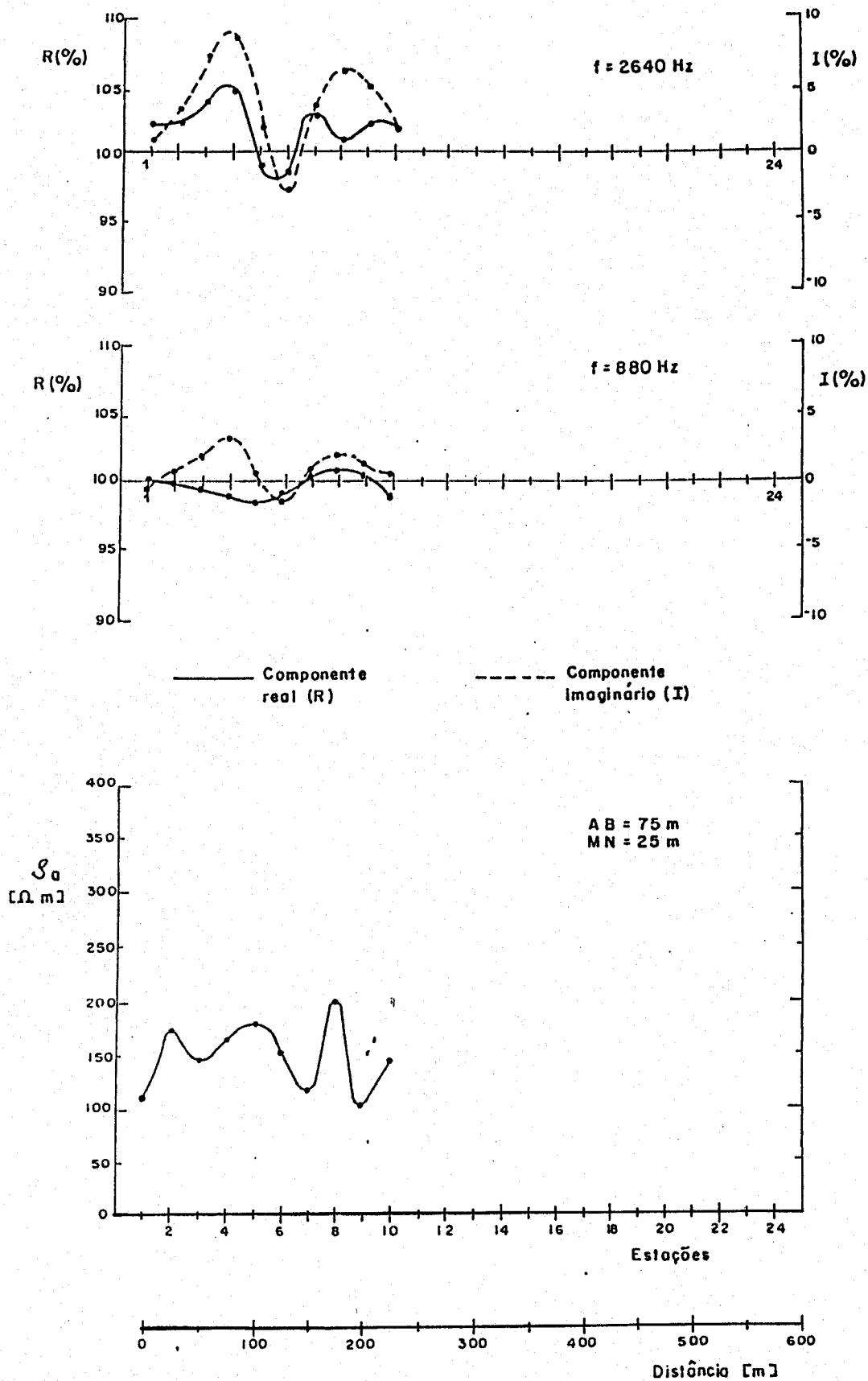


Fig.33 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P₇ - Area II
 Fazenda Santa Rosa - Patos PB

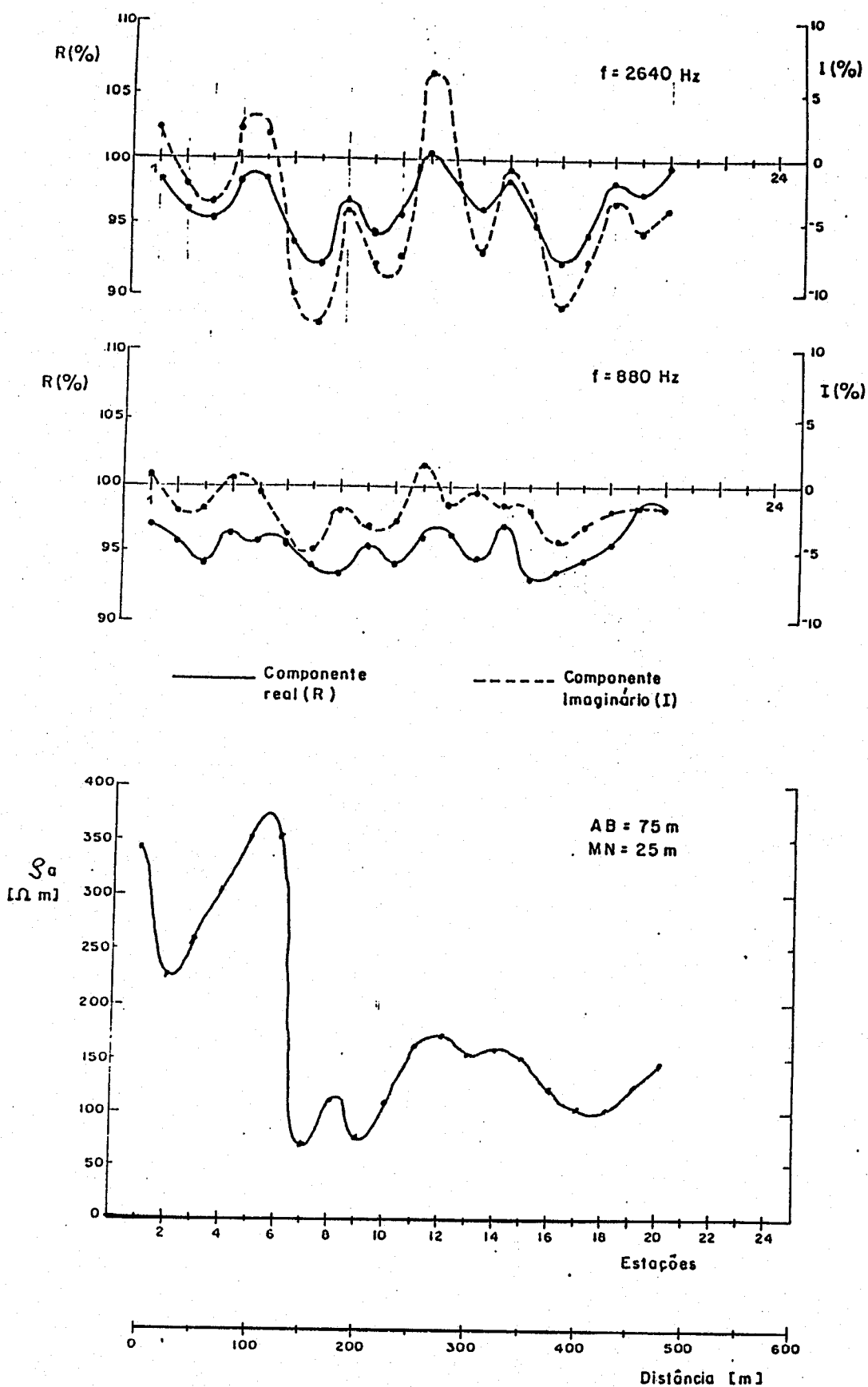


Fig.34 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_8 - Area II
 Fazenda Santa Rosa - Patos PB

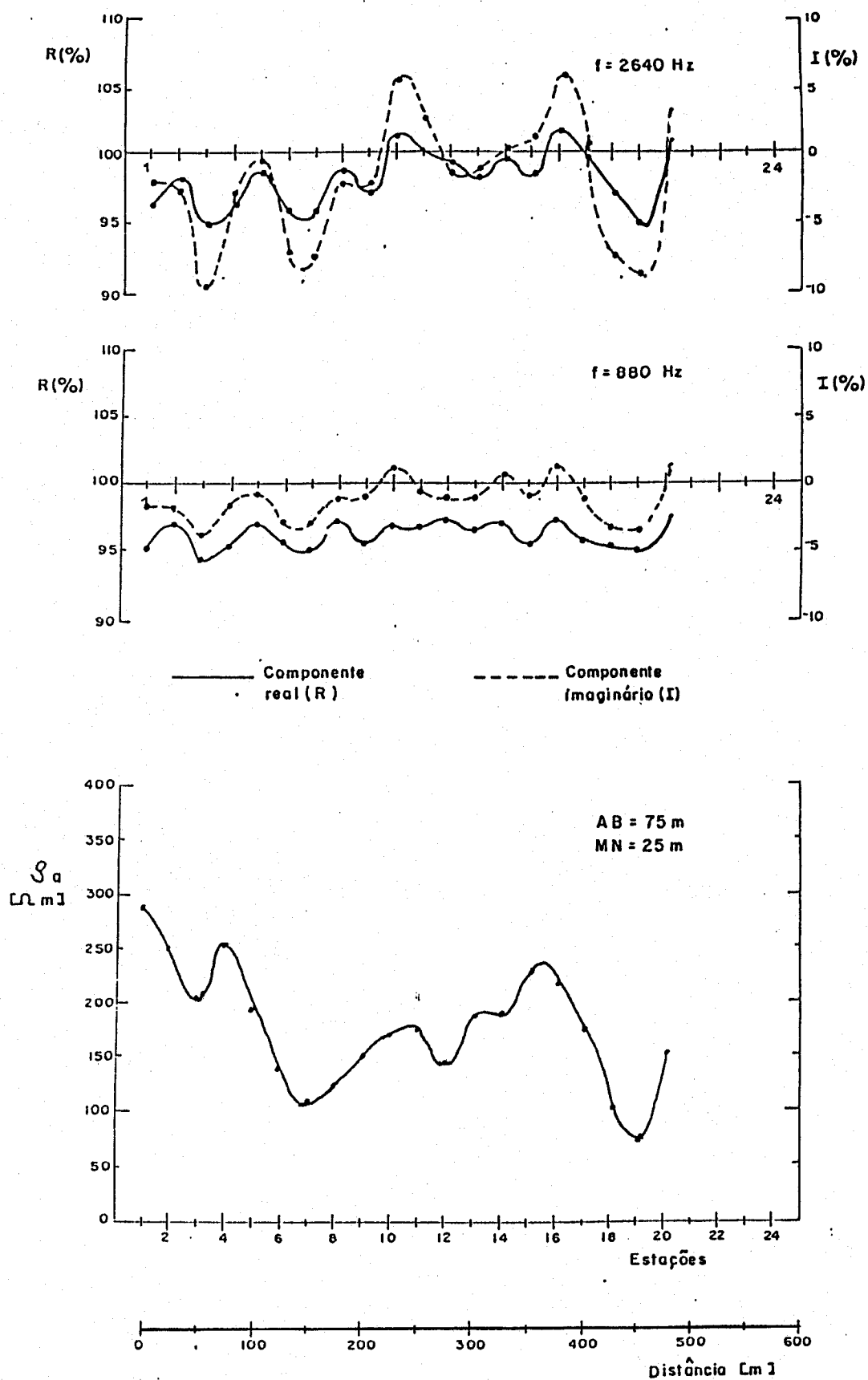


Fig.35 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_9 - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

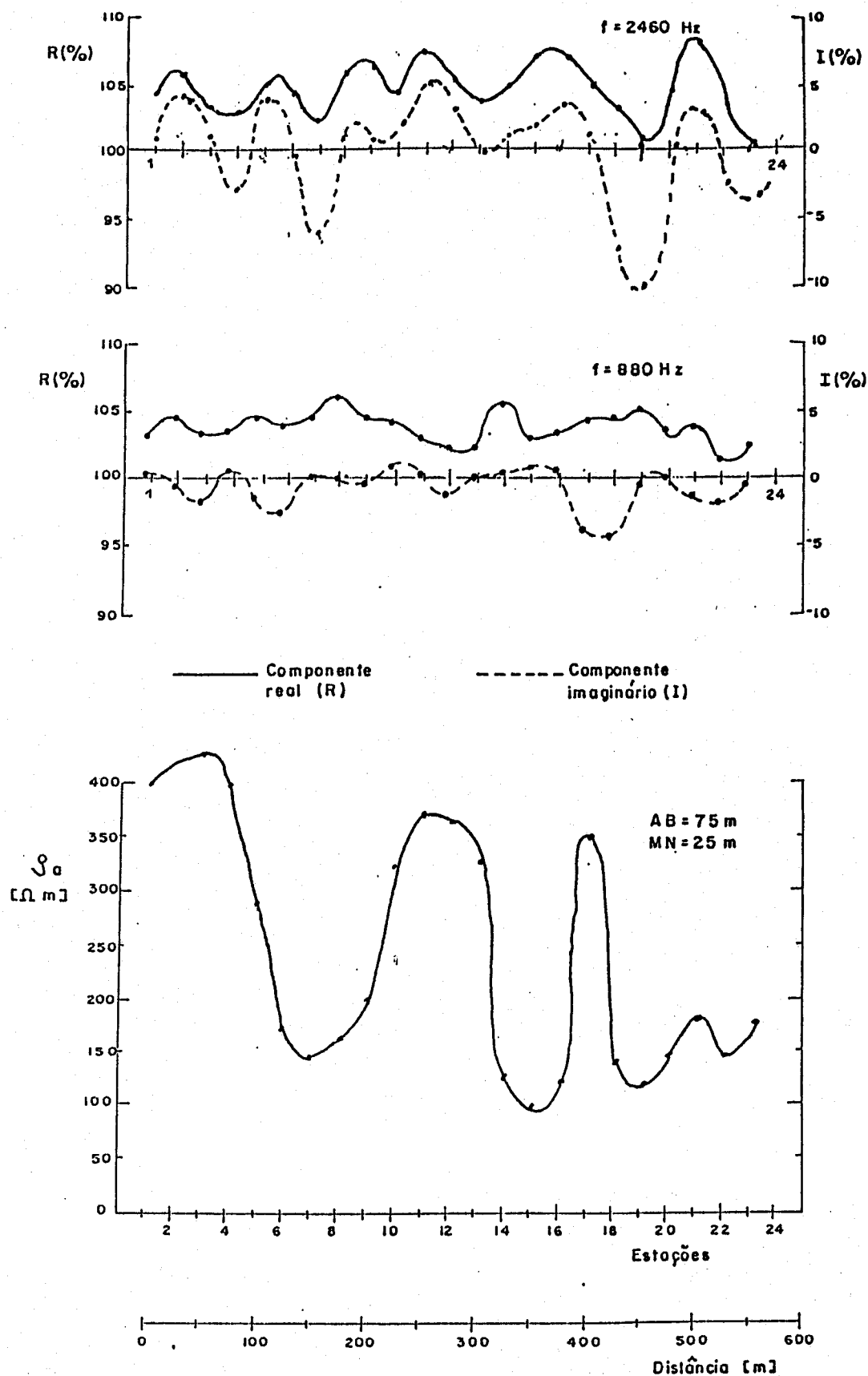


Fig.36 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_{10} - Area II
Fazenda Santa Rosa - Patos PB

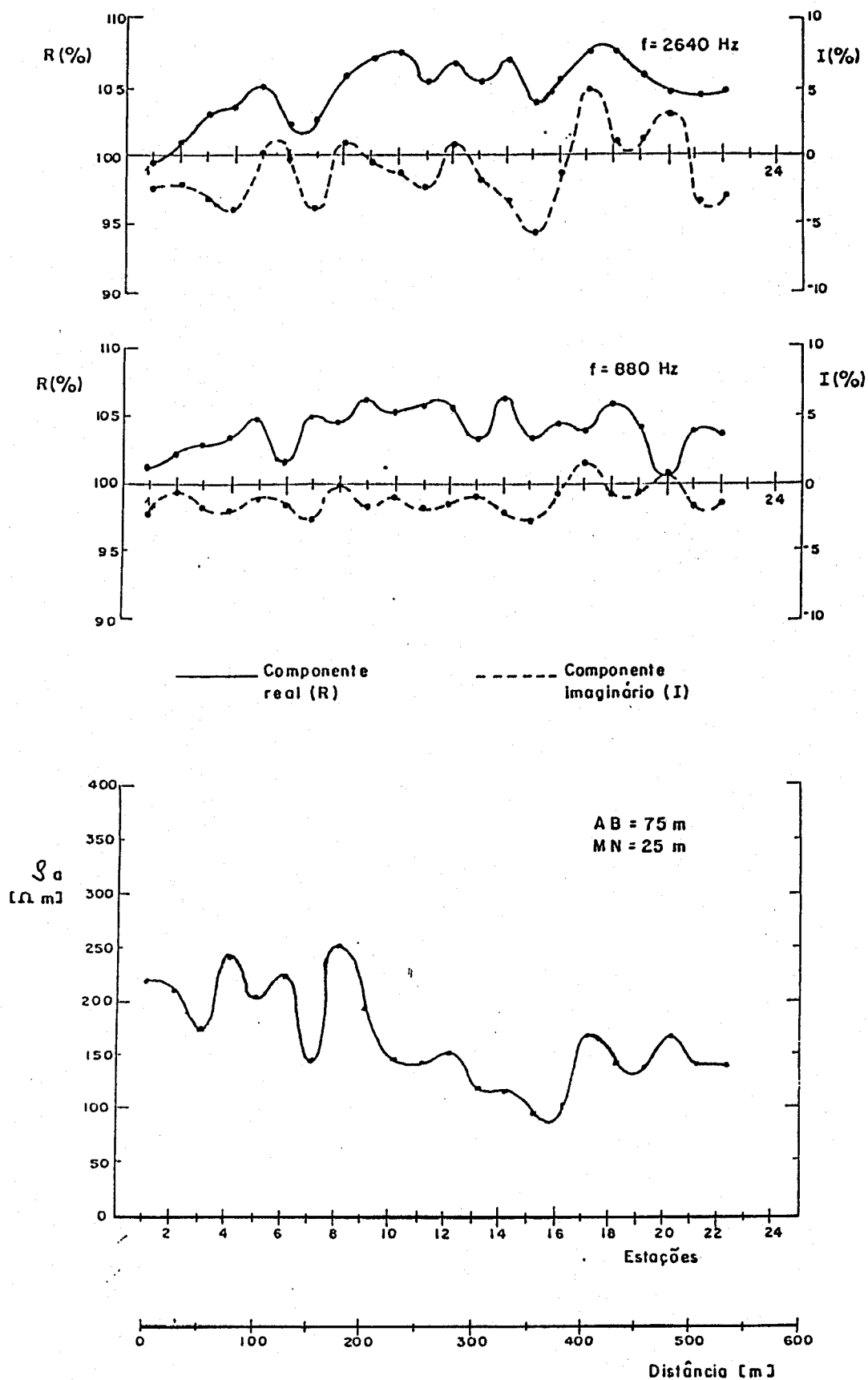


Fig.37 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_{11} - Area II
 Fazenda Santa Rosa - Patos PB

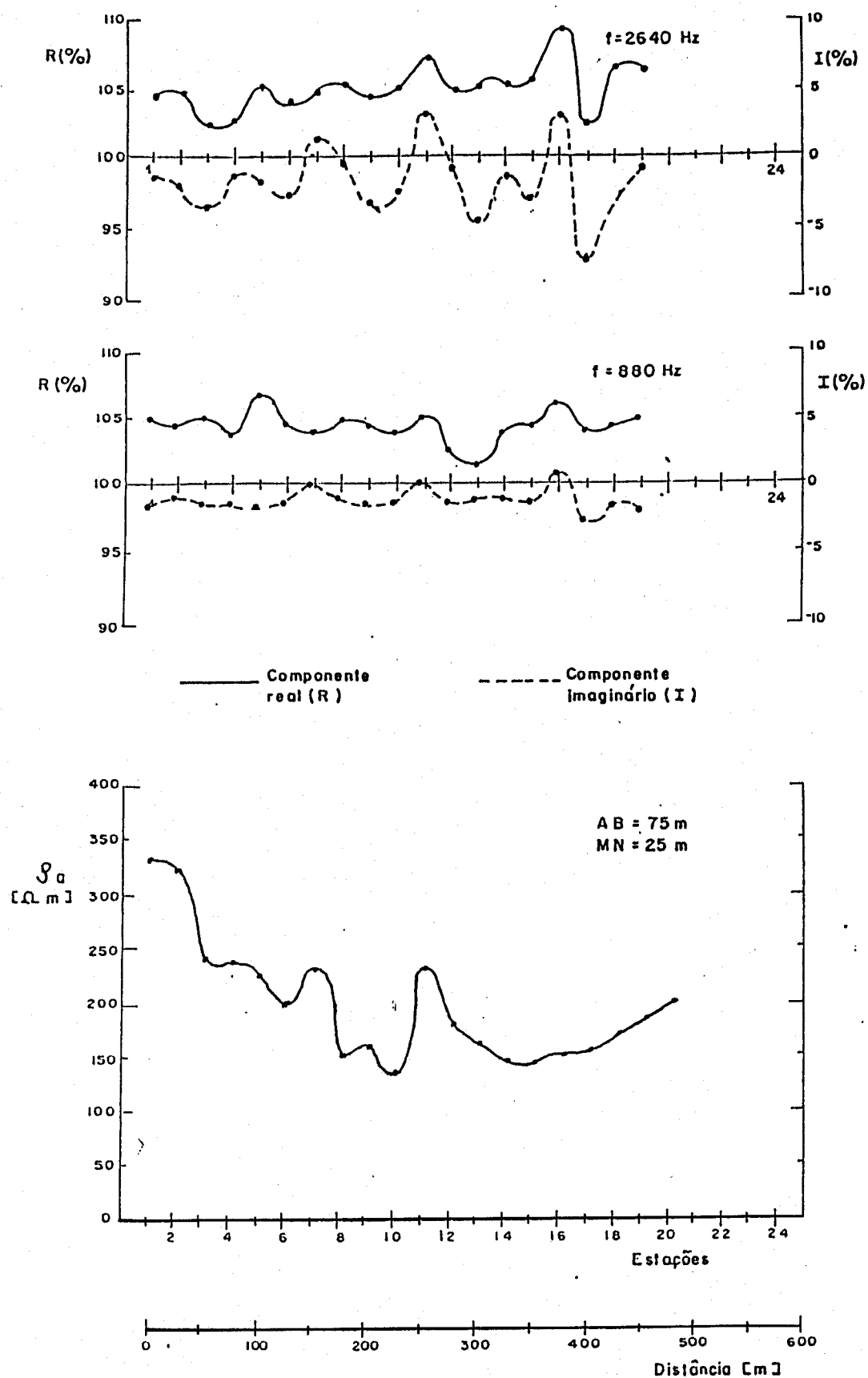


Fig.38 - Perfil Elétrico e Eletromagnético P_{12} - Area II
 Fazenda Santa Rosa - Patos PB

APENDICE C (AREA III)

04 Sondagens de Calibração

60 Sondagens Elétricas Verticais

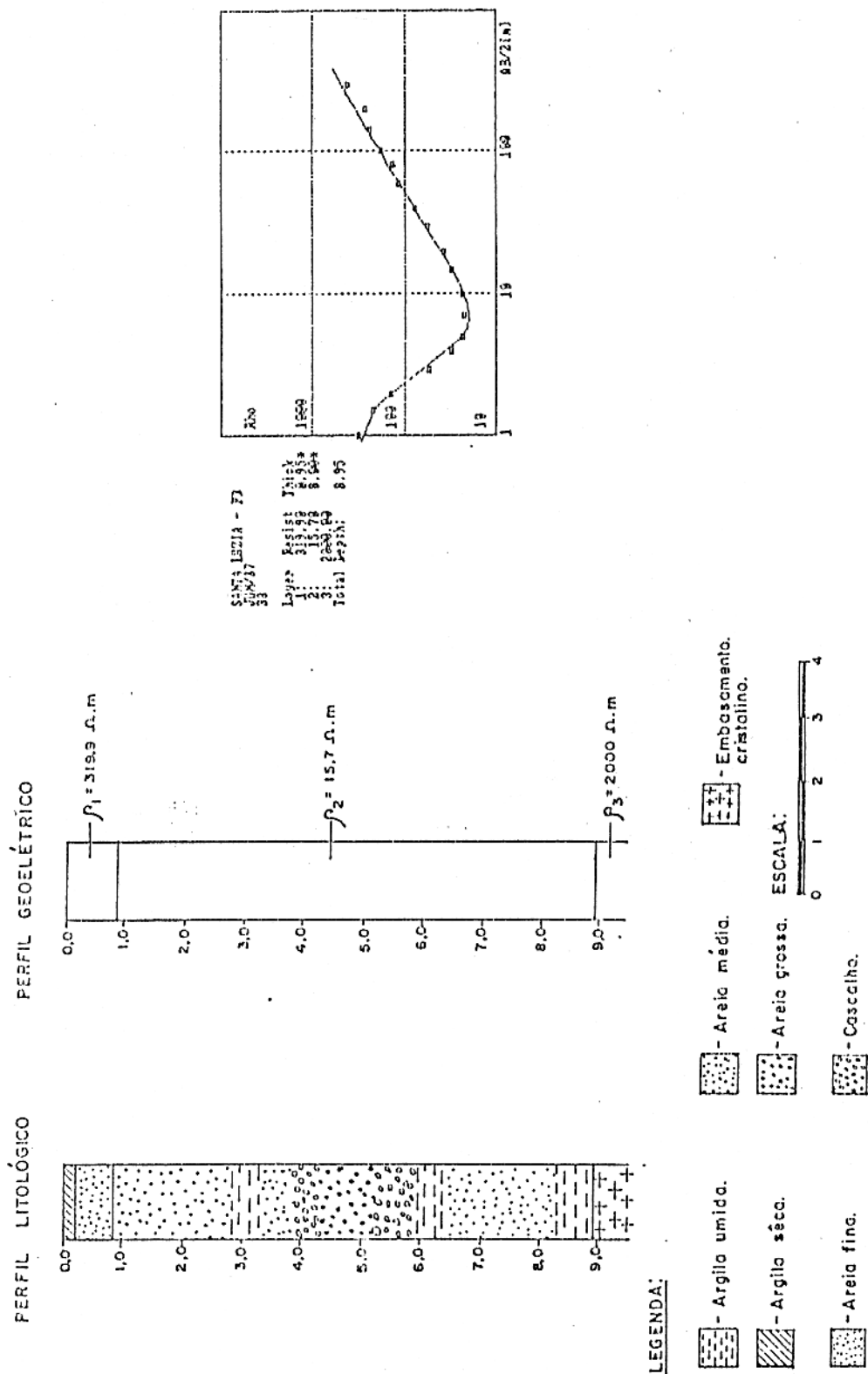


Fig.41 - Calibração da SEV 38
Perfil Litológico - A3-2

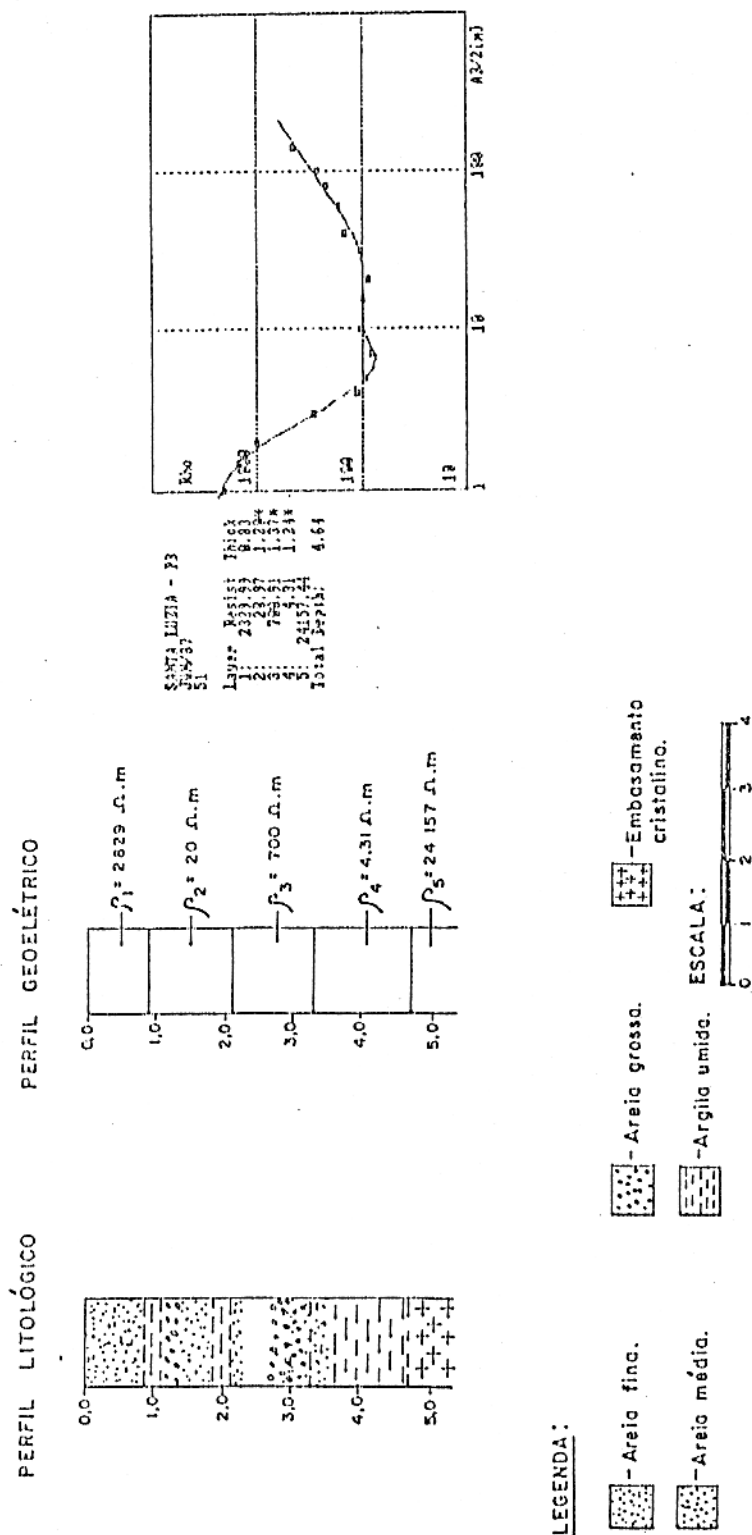
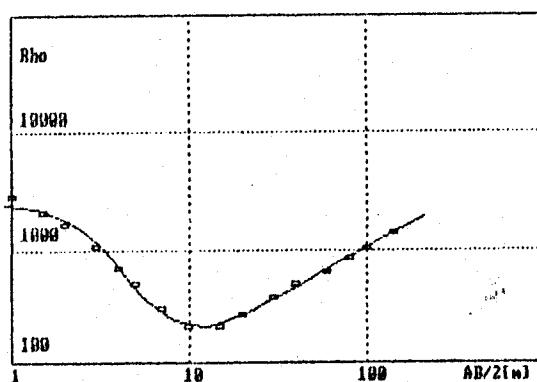


Fig. 42 - Calibração da SEV 51
Perfil Litológico A3-3

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
01

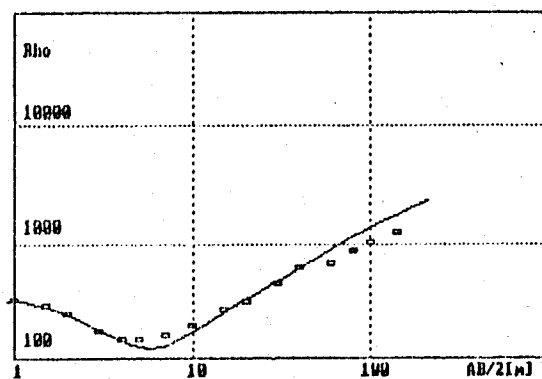
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 2466.99 1.44
2: 174.98 14.61
3: 6236.73
Total Depth: 16.85
Convergence: 0.872



GRUPO - IIc

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
02

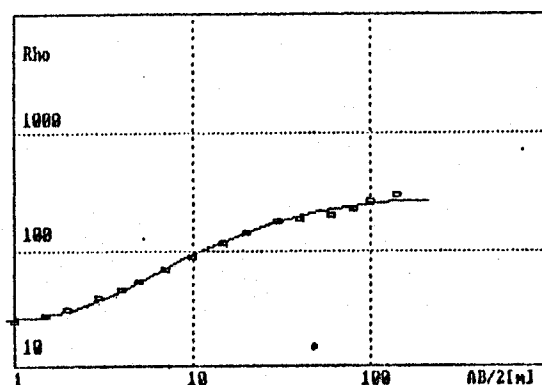
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 326.00* 1.34
2: 60.00* 3.28
3: 5000.00*
Total Depth: 4.62
Convergence: 0.164



GRUPO - IIc

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
03

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 23.99 1.98
2: 271.60
Total Depth: 1.98
Convergence: 0.058

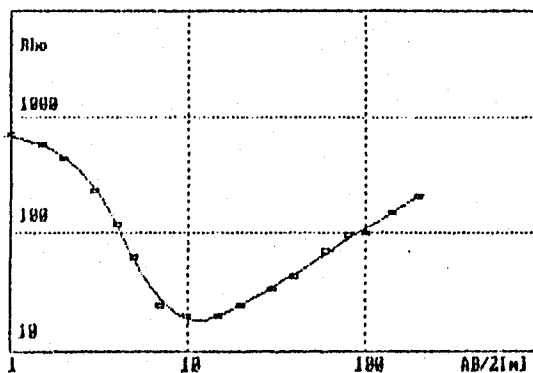


GRUPO - I

Fig.43 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
04

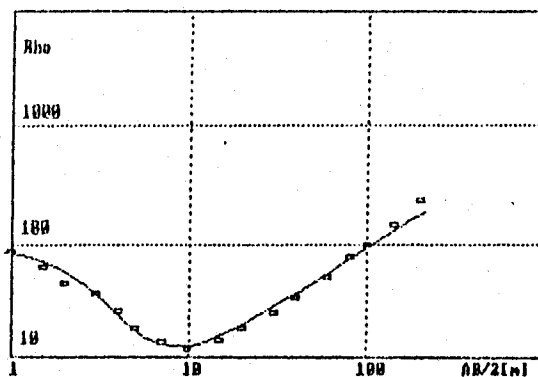
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 691.00 1.29
2: 15.00 13.58
3: 1470.63
Total Depth: 14.87
Convergence: 0.054



GRUPO - IIB

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
05

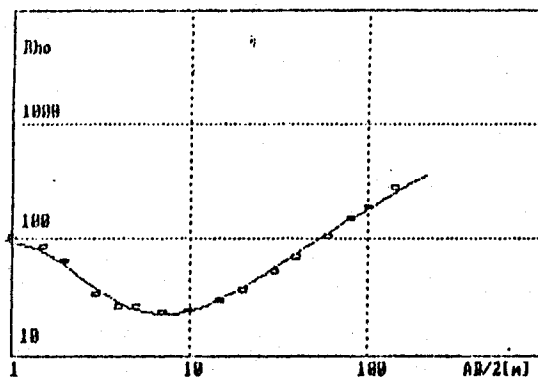
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 85.00 1.26
2: 9.98 10.62
3: 2850.97
Total Depth: 11.87
Convergence: 0.121



GRUPO - IIB

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
06

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 100.00 0.97
2: 10.60 10.17
3: 4100.09
Total Depth: 11.14
Convergence: 0.073

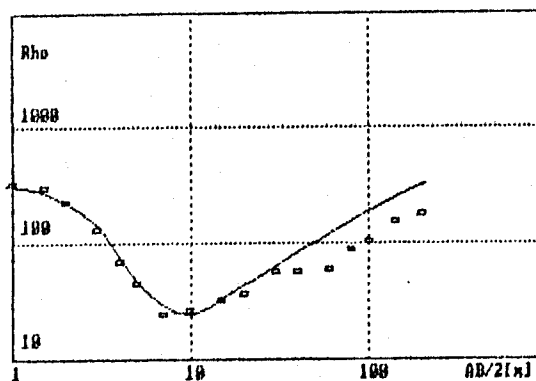


GRUPO - IIB

Fig.44 - SEV da Area III

SANTA LUZIA - PB
JUN/87
07

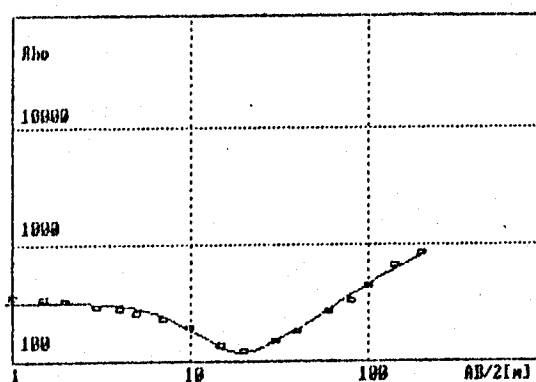
START MODEL:
Layer Resist Thick
1: 316.00 1.40
2: 15.00 7.00
3: 1000.00
Total Depth: 8.40



GRUPO - I Ib

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
08

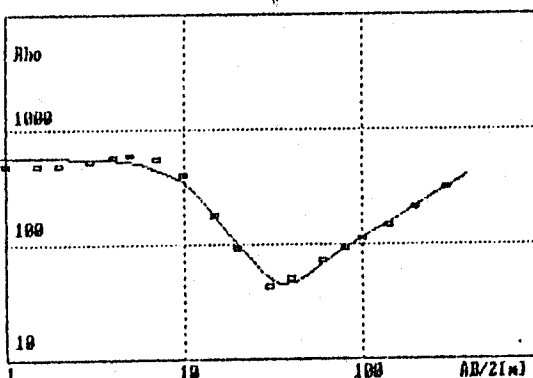
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 311.28 5.40
2: 20.17 3.02
3: 3746.35
Total Depth: 9.22
Convergence: 0.056



GRUPO - I Ib

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
09

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 540.13 6.26
2: 11.50 10.29
3: 3203.72
Total Depth: 16.55
Convergence: 0.098

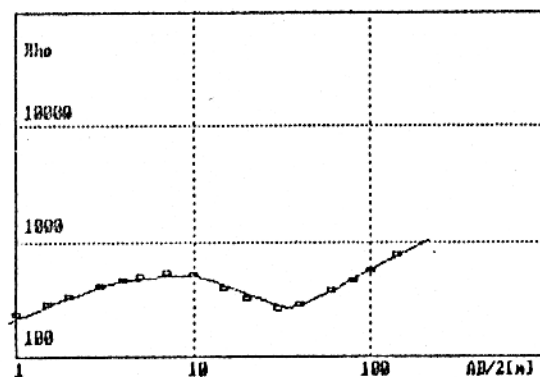


Grupo - I Ib

Fig.45 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
10

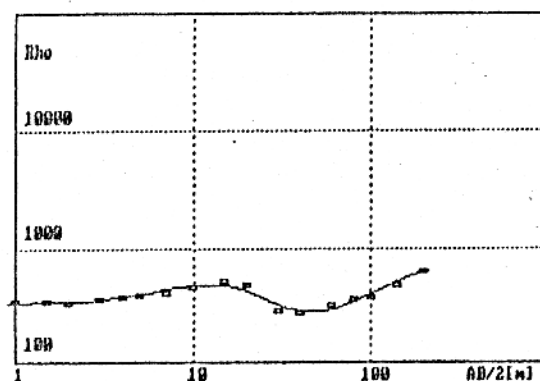
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 105.92 0.40m
2: 619.84 7.80m
3: 19.67 2.60m
4: 2790.52
Total Depth: 10.85
Convergence : 0.053



GRUPO - III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
11

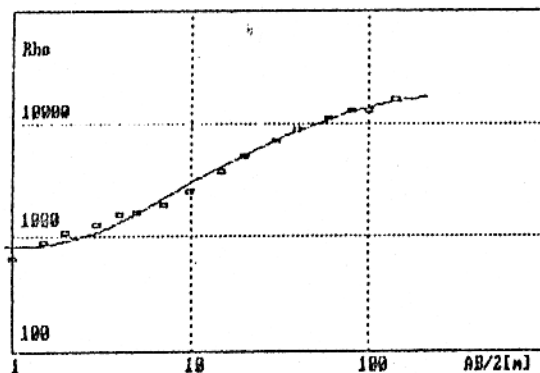
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 325.30 3.59
2: 949.16 5.81
3: 17.40 2.79
4: 1003.00
Total Depth: 12.20
Convergence : 0.063



Grupo - III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
12

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 755.50 2.34
2: 20326.03
Total Depth: 2.34
Convergence : 0.117

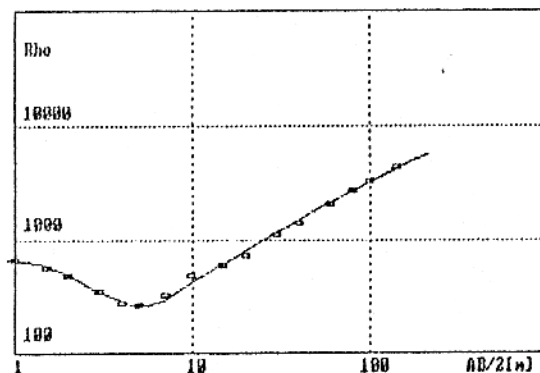


Grupo - I

Fig.46 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
13

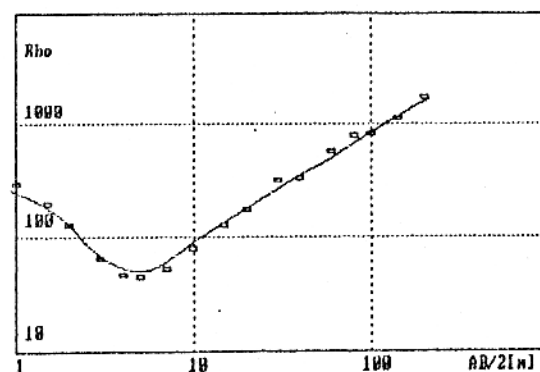
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 664.98 1.29
2: 92.89 2.11
3: 14188.37
Total Depth: 3.39
Convergence: 0.062



GRUPO - IIc

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
14

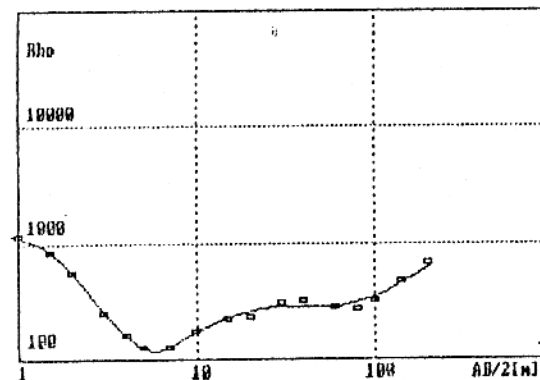
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 285.00* 0.92
2: 15.00* 1.72
3: 22541.75
Total Depth: 2.65
Convergence: 0.101



GRUPO - IIb

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
15

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1288.51 0.98
2: 25.75 1.24
3: 1926.45 3.85
4: 10.69 2.83
5: 18186.44
Total Depth: 8.98
Convergence: 0.061

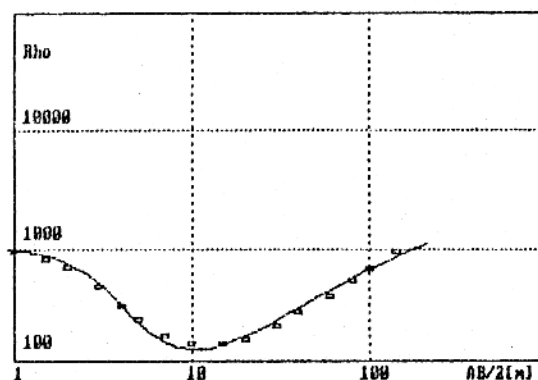


GRUPO - IV

Fig.47 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
16

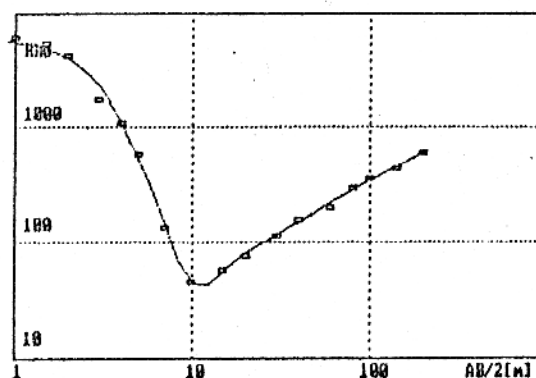
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1000.00m 1.40
2: 103.68 13.00m
3: 2652.63
Total Depth: 14.40
Convergence : 0.006



GRUPO - IIc

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
17

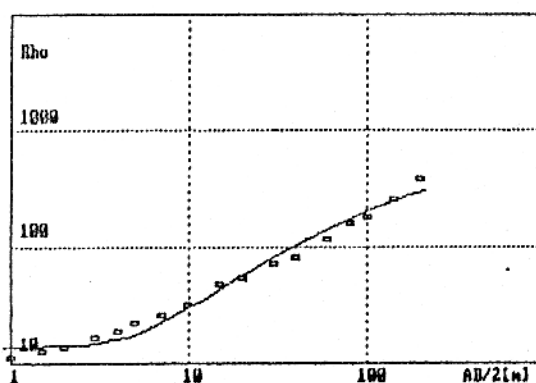
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 5859.00m 1.41
2: 15.00m 3.91
3: 2002.24
Total Depth: 5.32
Convergence : 0.090



GRUPO - IIb

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
18

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 13.37 4.41
2: 466.00
Total Depth: 4.41
Convergence : 0.140

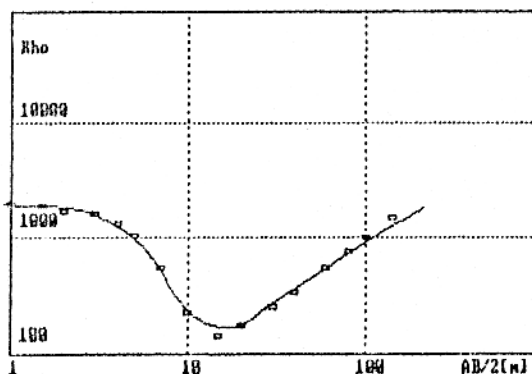


GRUPO - I

Fig.48 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
19

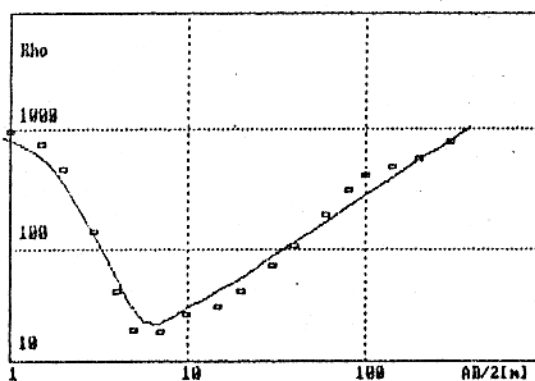
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1862.00 2.73
2: 15.00 1.68
3: 26069.51
Total Depth: 4.41
Convergence: 8.473



CRUPO - IIB

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
20

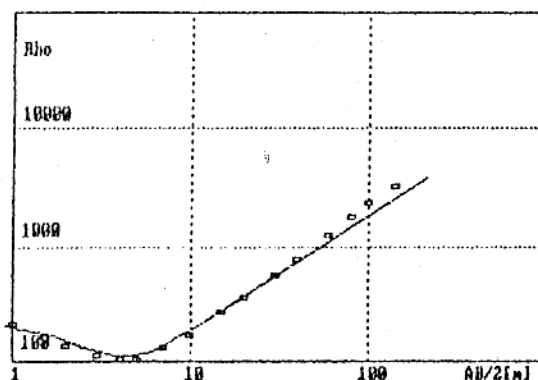
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1000.00 0.89
2: 15.00 5.49
3: 45019.06
Total Depth: 6.39
Convergence: 0.234



GRUPO - IIB

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
21

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 200.00 1.01
2: 71.64 3.63
3: 99473.20
Total Depth: 4.64
Convergence: 0.127

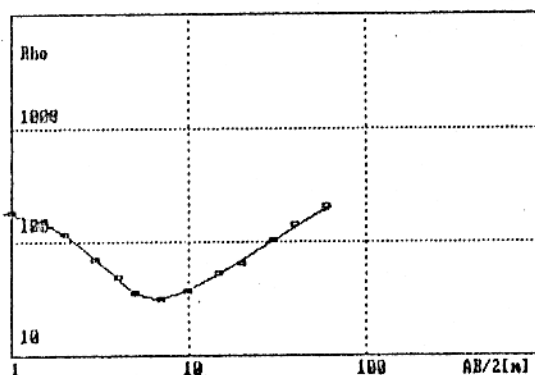


GRUPO - IIC

Fig.49 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
22

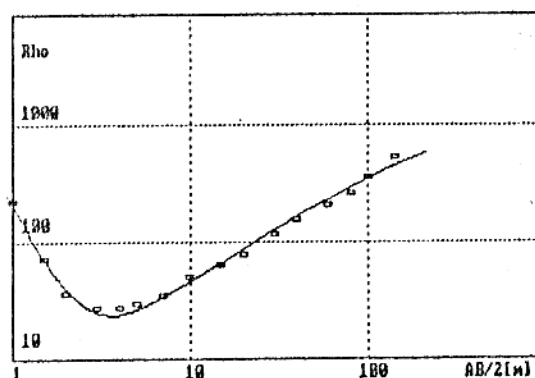
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 186.49 1.13
2: 21.17 6.19
3: 3283.78 7.32
Total Depth: 7.32
Convergence: 0.034



GRUPO - II b

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
23

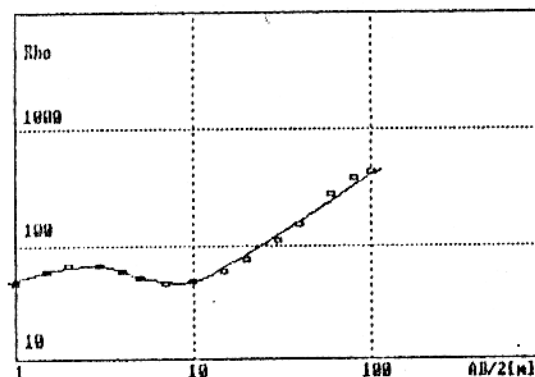
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 700.00 0.48
2: 20.00 4.51
3: 1191.62 4.91
Total Depth: 4.91
Convergence: 0.096



GRUPO - II b

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
24

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 33.32 0.50
2: 117.12 1.28
3: 13.45 2.93
4: 6135.29 4.72
Total Depth: 4.72
Convergence: 0.001

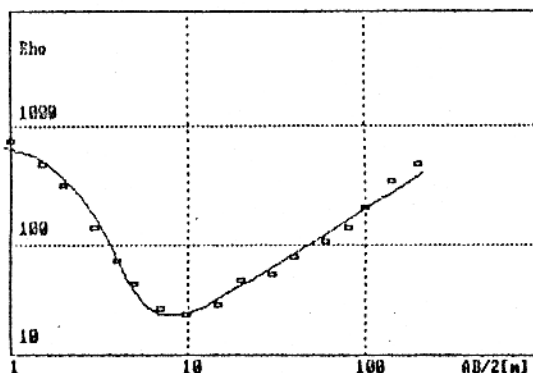


GRUPO - III

Fig.50 - SEV da AREA III

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
25

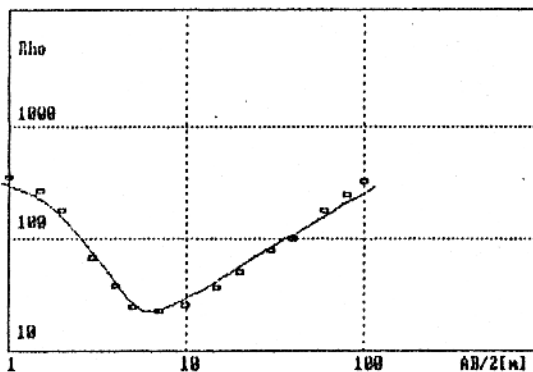
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 731.00* 1.09
2: 15.00* 7.23
3: 3942.76
Total Depth: 8.32
Convergence : 0.147



GRUPO - I Ib

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
26

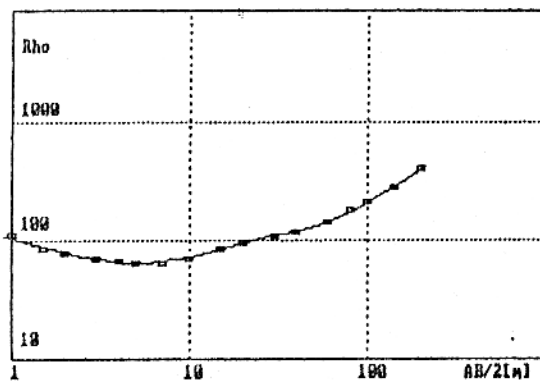
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 342.00* 0.98
2: 15.00* 5.40
3: 2003.11
Total Depth: 6.46
Convergence : 0.128



GRUPO - I Ib

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
27

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 117.09 0.65
2: 57.20 8.41
3: 025.39 2.53
4: 8.40 2.95
5: 17653.91
Total Depth: 14.56
Convergence : 0.023

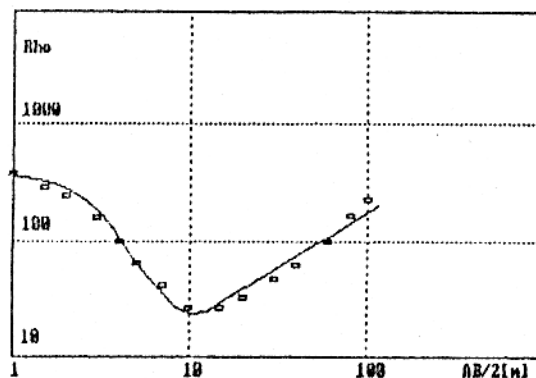


GRUPO - IV

Fig.51 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT. NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
28

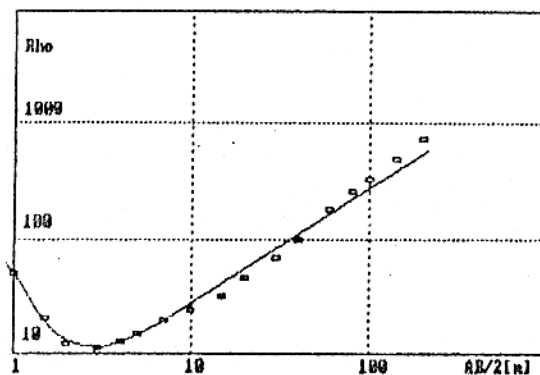
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 366.80 1.55
2: 15.00 0.17
3: 2003.72
Total Depth: 9.72
Convergence: 0.144



GRUPO - IIb

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
29

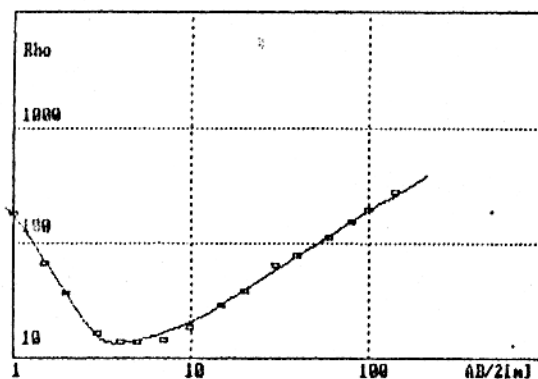
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 108.11 0.37
2: 8.10 0.20
3: 56178.17
Total Depth: 3.56
Convergence: 0.132



GRUPO - IIa

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
30

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 394.71 0.49
2: 11.74 0.21
3: 5061.29
Total Depth: 6.70
Convergence: 0.058

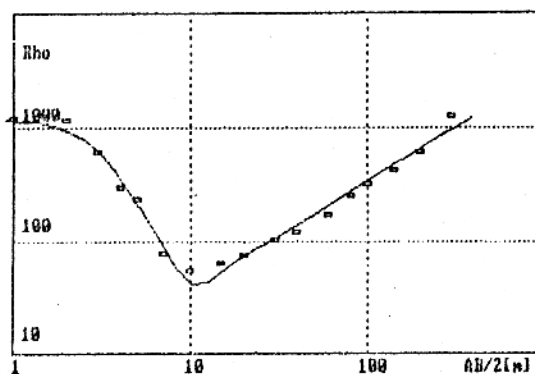


GRUPO - IIb

Fig.52 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
31

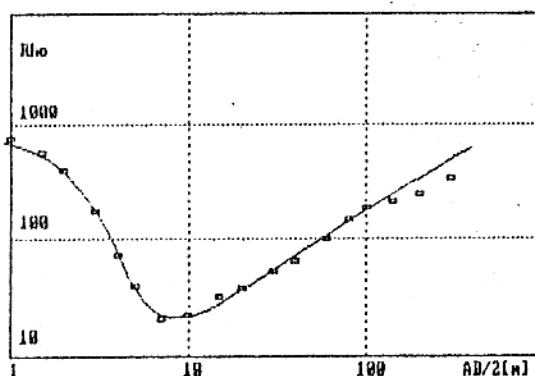
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1177.00* 1.69
2: 15.00* 4.29
3: 8551.30
Total Depth: 5.98
Convergence : 0.155



GRUPO - IIb

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
32

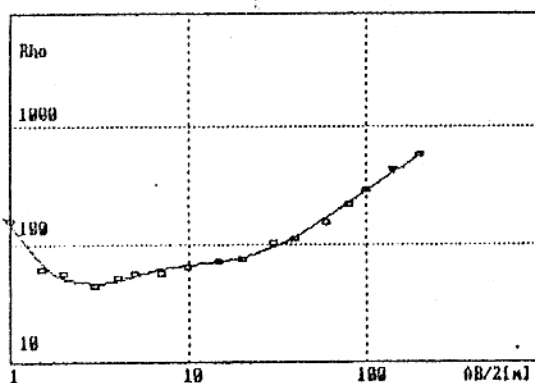
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 740.00* 1.10
2: 15.00* 8.53
3: 4969.12
Total Depth: 9.62
Convergence : 0.136



GRUPO - IIb

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
33

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 466.15 0.37
2: 37.11 2.02
3: 388.67 1.20
4: 9.53 2.60
5: 18563.12
Total Depth: 7.00
Convergence : 0.071

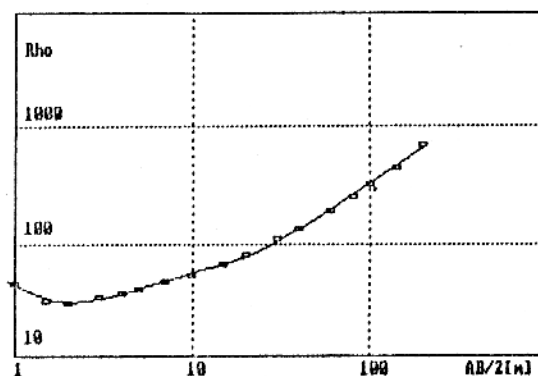


GRUPO - IV

Fig.53 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
34

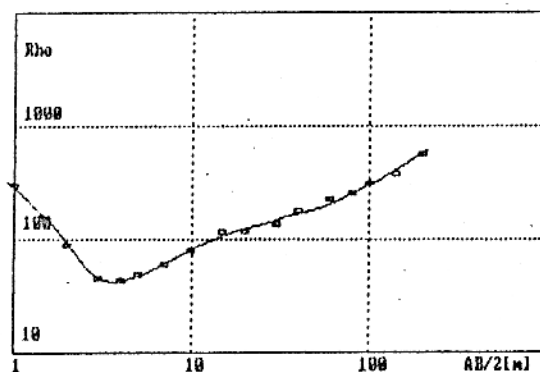
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 92.38 0.33
2: 23.96 2.38
3: 342.31 1.06
4: 11.27 2.19
5: 19124.47
Total Depth: 5.97
Convergence : 0.037



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
35

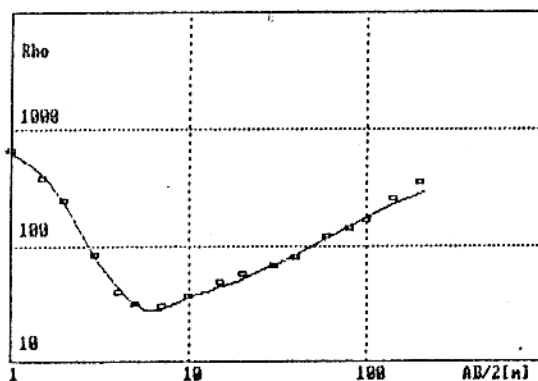
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 472.55 0.60
2: 23.97 2.59
3: 1031.80 3.14
4: 10.52 2.38
5: 17452.42
Total Depth: 8.71
Convergence : 0.056



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
36

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 836.36 0.79
2: 16.91 2.57
3: 56.23 16.77
4: 603.65
Total Depth: 28.13
Convergence : 0.009

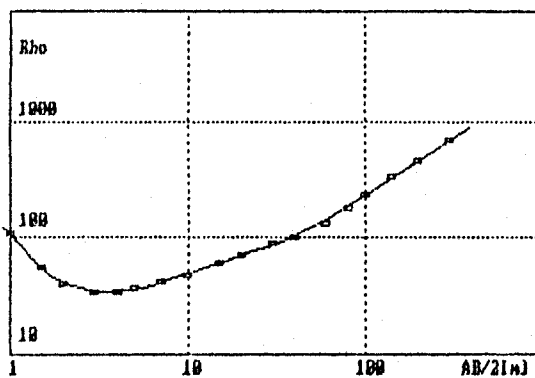


GRUPO - III

Fig.54 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
37

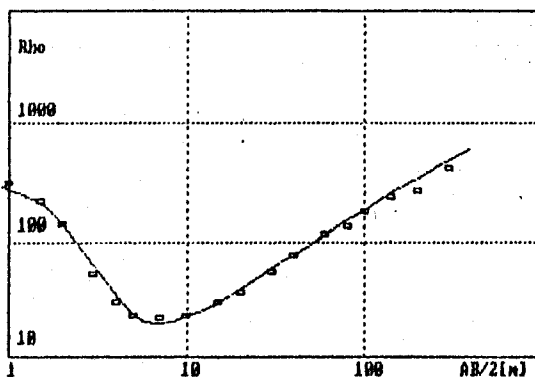
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 284.84 0.38
2: 29.58 5.16
3: 519.18 1.62
4: 9.84 2.54
5: 21418.56
Total Depth: 9.71
Convergence: 0.833



GRUPO . IV

SANTA LUZIA - PB
JUN/87
38

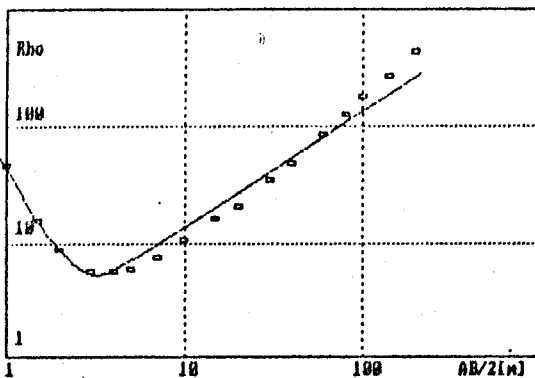
Layer Resist Thick
1: 319.90 0.95*
2: 15.70 8.00*
3: 2000.00
Total Depth: 8.95



GRUPO - IIb

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
39

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 135.40 0.42
2: 3.72 2.79
3: 30890.31
Total Depth: 3.22
Convergence: 0.215

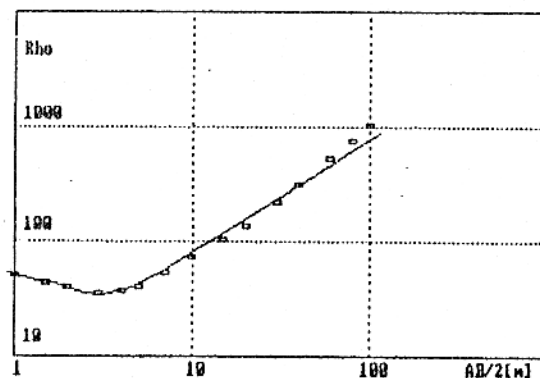


GRUPO - IIa

Fig.55 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
40

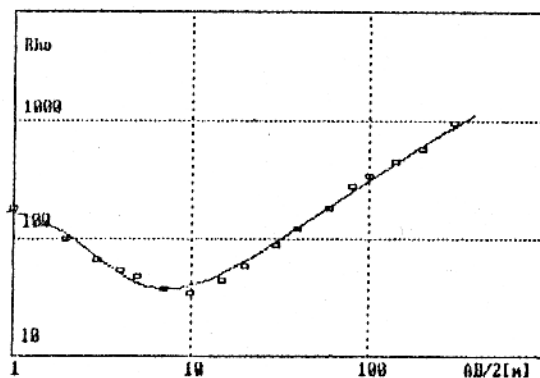
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 54.04 0.88
2: 19.68 2.25
3: 93740.20
Total Depth: 3.12
Convergence: 0.114



GRUPO - IIB

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
41

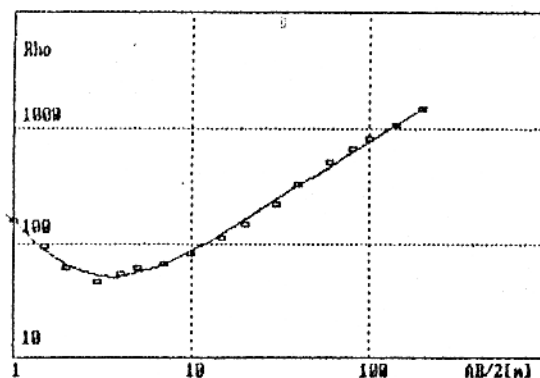
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 175.90 1.04
2: 30.93 10.05
3: 22771.44
Total Depth: 11.09
Convergence: 0.886



GRUPO - IIB

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
42

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 331.93 0.44
2: 43.50 5.06
3: 1166.19 3.17
4: 55.94 0.45
5: 22002.13
Total Depth: 9.12
Convergence: 0.065

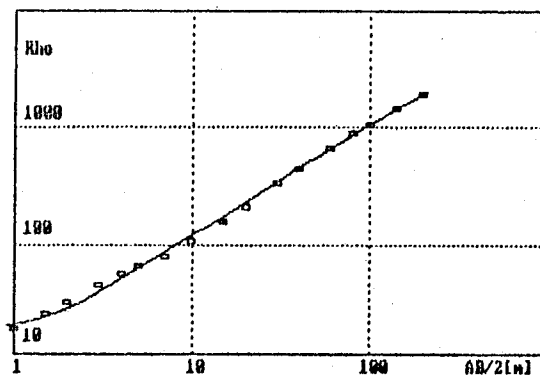


GRUPO - IV

Fig.56 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
43

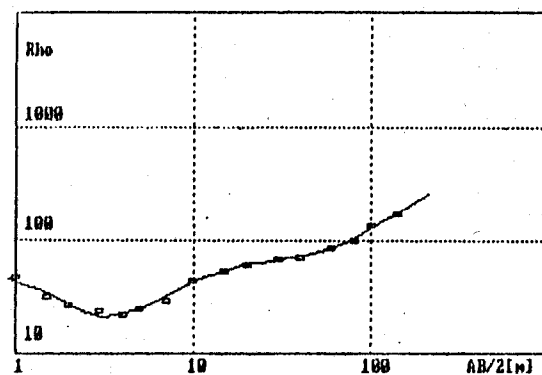
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 16.25 1.38
2: 7206.35
Total Depth: 1.38
Convergence: 0.000



GRUPO - II

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
44

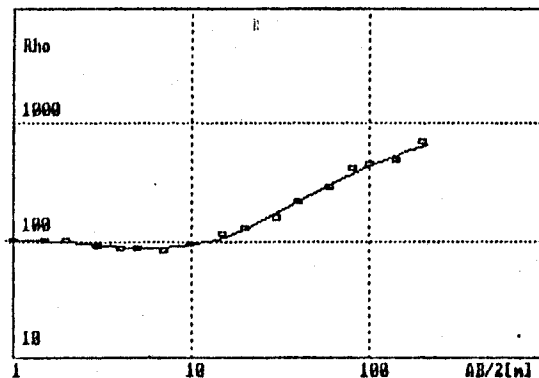
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 47.45 0.90
2: 7.52 1.37
3: 634.62 1.94
4: 6.35 3.92
5: 10081.34
Total Depth: 0.13
Convergence: 0.049



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
45

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 102.31 1.03
2: 79.84 11.77
3: 1003.20
Total Depth: 12.80
Convergence: 0.053

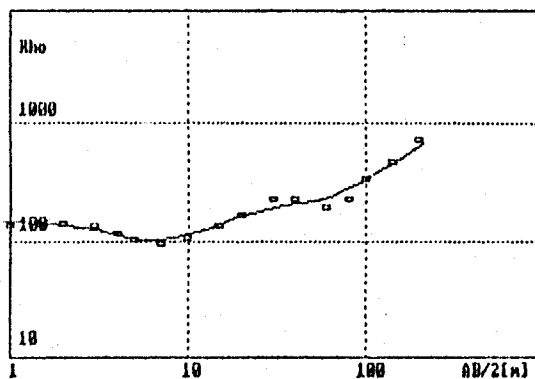


GRUPO - IIc

Fig.57 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
46

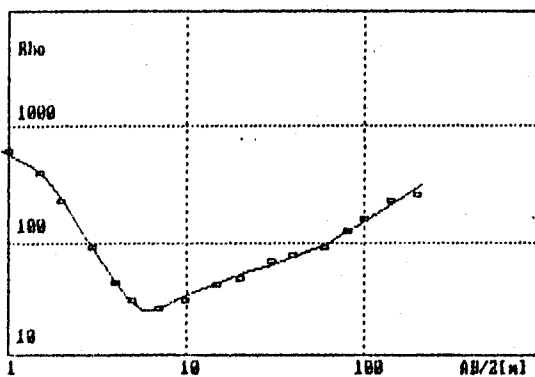
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 141.39 2.47
2: 19.56 1.23
3: 1603.31 2.65
4: 5.65 1.38
5: 19149.56 7.66
Total Depth: 7.66
Convergence: 0.097



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
47

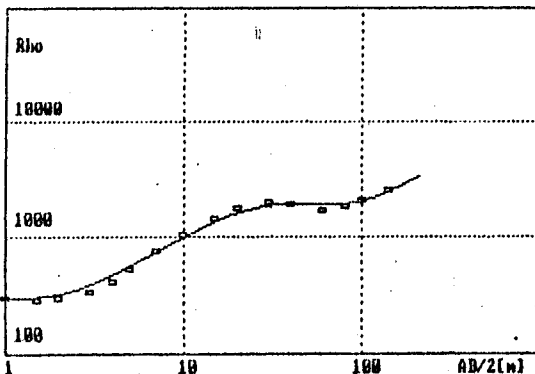
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 723.52 0.85
2: 17.21 4.58
3: 605.30 1.87
4: 7.84 3.20
5: 17189.99 18.51
Total Depth: 18.51
Convergence: 0.068



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
48

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 278.29 2.52
2: 9953.41 5.88
3: 17.15 0.81
4: 28877.76 9.21
Total Depth: 9.21
Convergence: 0.079

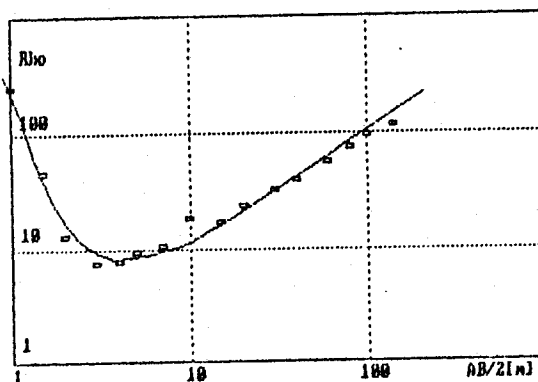


GRUPO - III

Fig.58 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
49

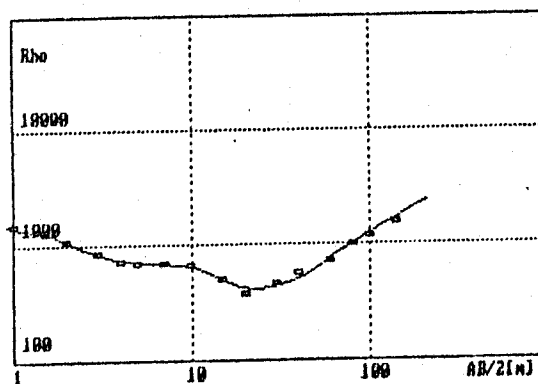
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1619.16 0.32
2: 7.39 7.07
3: 20503.53
Total Depth: 7.40
Convergence: 0.179



GRUPO - IIa

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
50

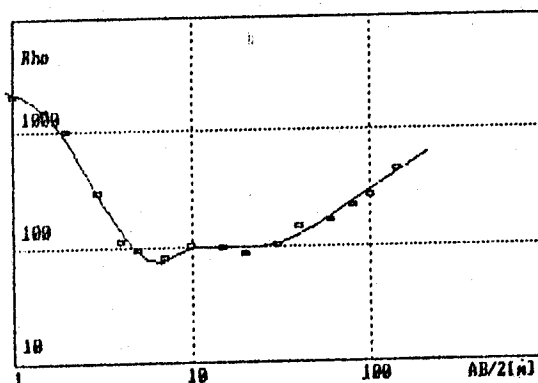
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1484.02 1.10
2: 81.56 0.30
3: 1796.80 2.56
4: 10.01 0.73
5: 15684.01
Total Depth: 4.77
Convergence: 0.058



GRUPO - IV

SANTA LUZIA - PB
JUN/87
51

Layer Resist Thick
1: 2029.99 0.83
2: 20.97 1.20*
3: 700.94 1.37*
4: 4.31 1.24*
5: 29157.44
Total Depth: 4.64

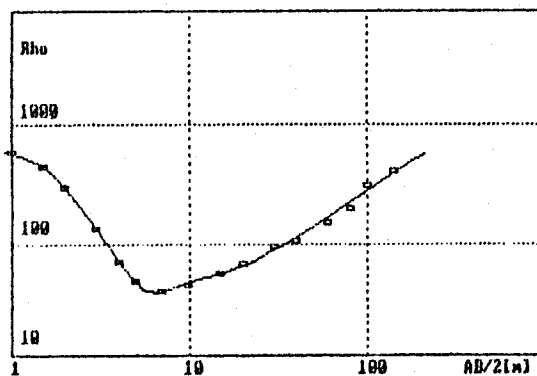


GRUPO - IV

Fig.59 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
52

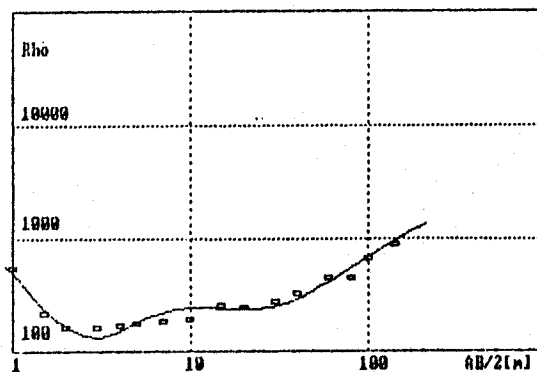
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 669.90 1.00
2: 17.37 2.29
3: 314.28 0.97
4: 10.39 2.36
5: 20174.75
Total Depth: 6.61
Convergence : 0.057



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT. NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
53

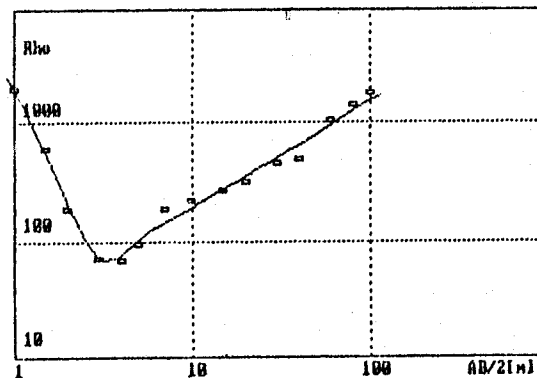
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 1000.33 0.51
2: 23.48 0.46
3: 849.36 2.64
4: 14.16 1.77
5: 16436.37
Total Depth: 5.38
Convergence : 0.118



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
54

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 6793.45 0.41
2: 23.51 1.06
3: 1613.21 3.04
4: 44.75 0.68
5: 25314.81
Total Depth: 5.19
Convergence : 0.141

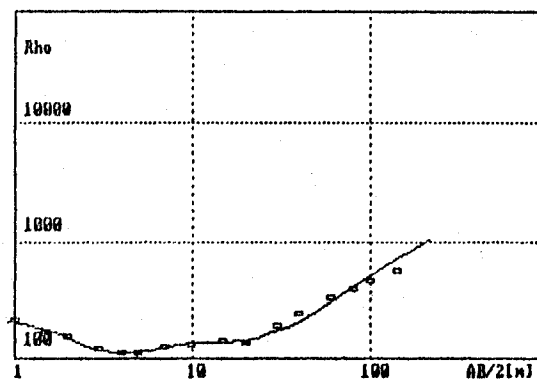


GRUPO - IV

Fig.60 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
55

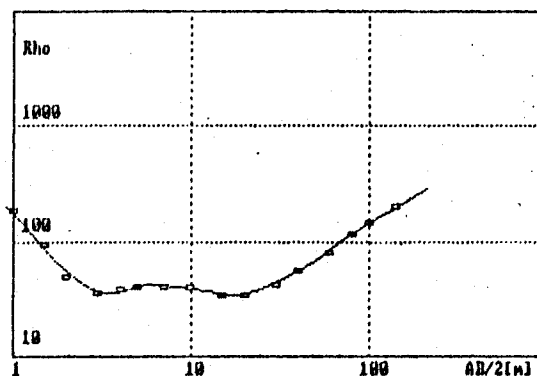
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 215.85 1.14
2: 28.91 0.88
3: 786.77 1.45
4: 6.77 1.88
5: 11898.93
Total Depth: 4.55
Convergence : 0.079



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
56

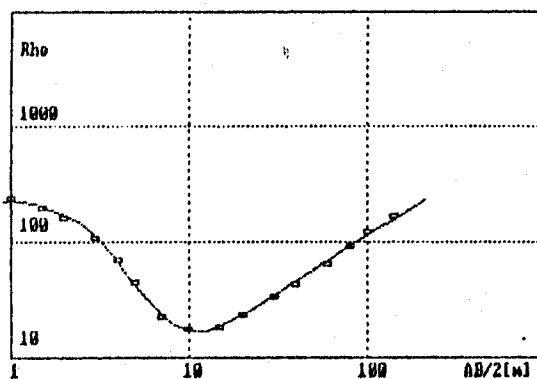
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 368.42 0.50
2: 22.78 1.71
3: 334.51 0.69
4: 6.73 4.37
5: 10215.58
Total Depth: 7.26
Convergence : 0.040



GRUPO - IV

MODEL AFTER IT, NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
57

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 222.99 1.31
2: 12.91 11.63
3: 4586.42
Total Depth: 13.14
Convergence : 0.053

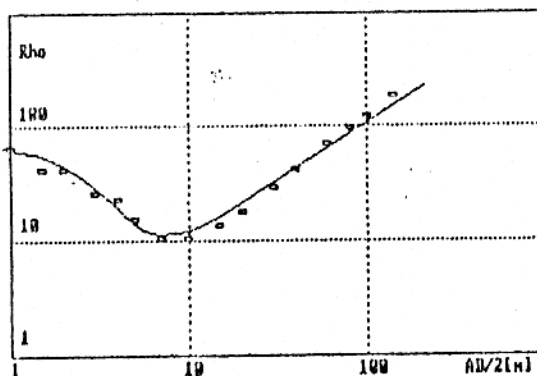


GRUPO - IIb

Fig.61 - SEV da Area III

MODEL AFTER IT. NO 5
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
58

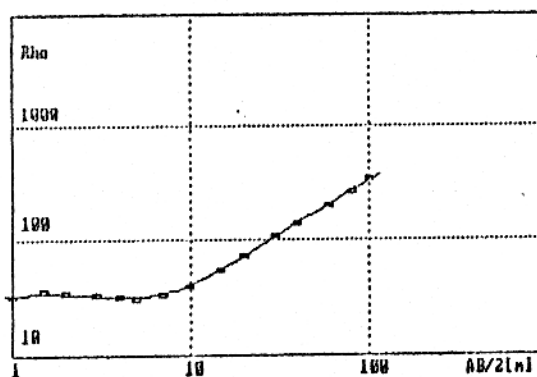
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 65.00* 1.27
2: 7.55 7.07
3: 21227.66
Total Depth: 8.34
Convergence: 0.149



GRUPO - IIa

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
59

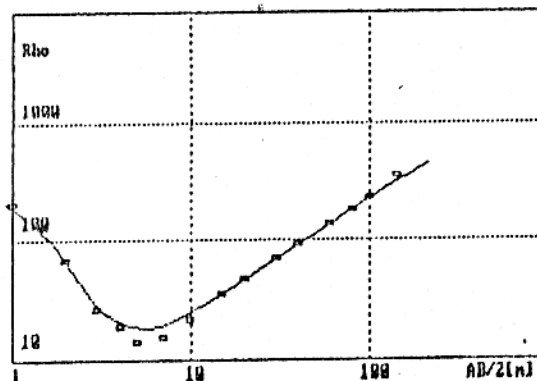
FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 10.41 0.10*
2: 47.16 0.40*
3: 28.31 7.68*
4: 2525.13
Total Depth: 8.18
Convergence: 0.033



GRUPO - III

MODEL AFTER IT. NO 1
SANTA LUZIA - PB
JUN/87
60

FINAL MODEL:
Layer Resist Thick
1: 260.51* 0.67
2: 15.00* 6.72
3: 6014.42
Total Depth: 7.41
Convergence: 0.110



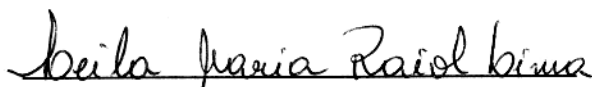
GRUPO - IIb

Fig.62 - SEV da Area III

ATESTADO

Atesto para fins de Homologação que a Tese de Mestrado de SEBASTIÃO VITORINO FILHO está dentro das normas de Editção do Centro de Geociências da UFPa.

Belém, 10 de dezembro de 1990



Leila Maria Raiol Lima