

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**TOMOGRÁFIA GEOELÉTRICA COMO FERRAMENTA  
PARA ESTUDOS DE GEOMETRIA DE POSICIONAL NA  
FORMAÇÃO GUARITAS, BACIA DO CAMAQUÃ, RS**

Fabício Barreto

Orientador: Prof. Dr. Antonio Romalino Fragoso Cesar

Co-orientadores: Prof. Dr. José Domingo Gallas

Prof. Renato Paes de Almeida

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2003/26)

TF  
B273  
F.t

SÃO PAULO  
2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



Tomografia Geométrica como Ferramenta para  
Estudos de Geometria Depositional na Formação  
Guaritas, Bacia do Camaquã, RS

Fabrizio Barreto

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Fabrizio Barreto', written over a horizontal line.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Romalino Fragoso Cesar

Co-orientadores: Prof. Dr. José Domingos Gallas

Prof. Renato Paes de Almeida

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

(TF/ 2003-26)

São Paulo

2003



DOAÇÃO Seção \_\_\_\_\_  
Graduação - 1 Gic  
Data: 06/05/2004

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



DEDALUS - Acervo - IGC



30900014525

TOMOGRÁFIA GEOELÉTRICA COMO FERRAMENTA  
PARA ESTUDOS DE GEOMETRIA DEPOSICIONAL  
NA FORMAÇÃO GUARITAS, BACIA DO CAMAQUÃ,  
RS

**FABRÍCIO BARRETO**

Monografia de Trabalho de Formatura

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Antonio Romalino S. Fragoso César Romalino Fragoso Cesar  
Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini Paulo  
Prof. Dr. Ian McReath McReath

São Paulo

2003

TF  
0273'  
F.X

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO GEOGRÁFICO



TOMOGRAFIA GEOMÉTRICA COMO FERRAMENTA  
PARA ESTUDOS DE GEOMETRIA DEFIJIONAL  
NA FORMAÇÃO QUÁRTAS BACH DO CAMOQA

RS

FABRÍCIO BARRETO

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Engenharia

Prof. Dr. João Roberto  
Prof. Dr. Paulo César  
Prof. Dr. João Roberto

2008

2008

## RESUMO

A presente monografia de trabalho de formatura consistiu na realização de tomografia geoeétrica de uma sucessão aluvial psamo-pelítica da Formação Guaritas e comparação dos resultados com os dados descritivos de afloramento de uma exposição paralela localizada a poucos metros do levantamento geofísico. A tomografia geoeétrica é uma técnica geofísica de imageamento relativamente recente, que combina medidas de métodos geoeétricos e técnicas de inversão modernas. A técnica baseia-se na introdução de corrente elétrica no terreno por dois eletrodos e leitura da diferença de potencial entre dois outros eletrodos.

Foram levantadas seções estratigráficas colunares do afloramento, acompanhadas por interpretação de fotomosaico, para estudo da distribuição espacial das fácies sedimentares e posterior comparação com as imagens obtidas na tomografia. Nove fácies sedimentares foram identificadas e tiveram sua distribuição mapeada ao longo do afloramento. Predominam arenitos e arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada, arenitos laminados e intercalações rítmicas de arenitos e pelitos, estes freqüentemente gretados.

Com exceção da imagem obtida com o método IP e arranjo pólo-pólo, as imagens apresentaram resultados excelentes, sendo possível, em alguns casos, enxergar detalhes e geometrias encontrados em afloramento. As imagens obtidas com os dados de eletrorresistividade apresentaram melhor delineação das geometrias encontradas em afloramento.

## ABSTRACT

The present monograph presents the results of a geoelectrical tomography survey of an alluvial succession of the Guaritas Formation dominated by sandstones and mudstones, and the comparison of these results with descriptive outcrop data of an exposure parallel and a few meters away from the geophysical survey location. The geoelectrical tomography is a relatively recent geophysical imaging tool that is based on the generation of an electrical current in the terrain by a pair of electrodes, and the measurement of the electrical potential difference between two other electrodes.

Stratigraphic columnar sections of the outcrop were built, as well as a photomosaic interpretation, aiming the recognition of the special distribution of the sedimentary facies and further comparison with the tomographic images. Nine sedimentary facies were identified and had their distribution mapped along the outcrop. Cross-stratified sandstones and pebbly sandstones, laminated sandstones and rhythmic intercalations of sandstones and mudstones, these frequently with mud crack.

With the exception of the image obtained by the IP method and pole-pole setup, the images present excellent results, in some cases showing detail of the geometries described in the outcrop. The images based on the electro-resistivity data show the best correlation with the actual geometries found in the outcrop.

## Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Wilson Barreto e Teima Christina Olszanski Barreto, por todo apoio e cooperação neste período em que estive nesta faculdade. Agradeço também a meus irmãos Marcelo Barreto e Juliano Barreto por serem grandes amigos.

Agradeço também meus orientadores. Prof. Dr. Antonio Romalino Fragoso Cesar, Prof. Dr. José Domingos Gallas e Prof. Renato Paes de Almeida por terem me aguentado durante este ano, ajudando na elaboração e realização do trabalho.

Aos componentes do GETEG, Liliâne Janikian, Gelson (Sapo), Ana Paula (Nem), Ana Paula (Sabuguera), Cha e Rafael Bueno (Pagão).

Ao meu Tio Pau Molhado pelas belíssimas fotos tiradas no campo e pela ajuda indispensável no campo.

Muitas pessoas fizeram com que os meus anos passados nesta faculdade se tomassem os melhores anos de minha vida. Colegas e amigos que viajaram juntos, estudaram juntos e que de certa forma contribuíram para o meu desenvolvimento como pessoa. Muito obrigado a essas pessoas, alunos, funcionários e professores do Instituto de Geociências da USP. Este trabalho só foi possível por causa de vocês.

INTRODUÇÃO .....	2
METAS E OBJETIVOS .....	4
TRABALHOS ANTERIORES .....	4
Tomografia geoeétrica .....	4
Geologia regional .....	5
MATERIAIS E MÉTODOS .....	6
Métodos Geoeétricos .....	6
Eletrorresistividade .....	9
Polarização Induzida .....	10
Processamento dos dados.....	11
Análise de fácies e elemento arquitetural.....	12
DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	12
RESULTADOS OBTIDOS.....	13
Perfil Geológico do Afloramento .....	13
Tomografia geoeétrica .....	19
Pólo-Dipolo Resistividade .....	19
Pólo-Dipolo-IP .....	20
Pólo-Pólo Resistividade .....	20
Pólo-Pólo IP.....	21
INTERPRETAÇÃO/DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	26
CONCLUSÕES .....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	29

## INTRODUÇÃO

A tomografia geoeétrica é uma técnica geofísica de imageamento relativamente recente, que combina medidas de métodos geoeétricos e técnicas de inversões modernas, tanto em 2D como em 3D (Storz, 2000). A técnica baseia-se na introdução de corrente elétrica no terreno por dois eletrodos e leitura da diferença de potencial entre dois outros eletrodos para obter informações das características elétricas do material abaixo (Baines *et al*, 2002). Posteriormente é feita a inversão dos dados por métodos computacionais e obtido o imageamento do terreno. A vantagem desta técnica com relação as técnicas convencionais geoeétricas é o maior detalhamento das estruturas presentes no terreno.

No trabalho, além do método da eletrorresistividade, também foi utilizado o método da Polarização Induzida (IP), onde é feita a leitura da cargabilidade (M). Foram empregados dois arranjos de eletrodos: pólo-dipolo e pólo-pólo, para posterior comparação entre os métodos e arranjos, bem como o estabelecimento do modelo mais adequado para ser utilizado na Formação Guaritas, Bacia do Camaquã, RS.

Juntamente com os métodos geoeétricos, também foi feito o estudo de fácies sedimentares e elemento arquitetural, para posterior comparação com as imagens obtidas na tomografia e auxiliar no desenvolvimento do modelo e na interpretação da melhor imagem obtida.

Os levantamentos foram realizados na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, próximo à cidade de Santana da Boa Vista, em afloramento na BR 392, de aproximadamente 200 metros de extensão e 7 metros de altura, onde predominavam rochas areníticas e pelíticas, com conglomerados associados, pertencentes à Formação Guaritas, Bacia do Camaquã. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo e a geologia da Bacia.

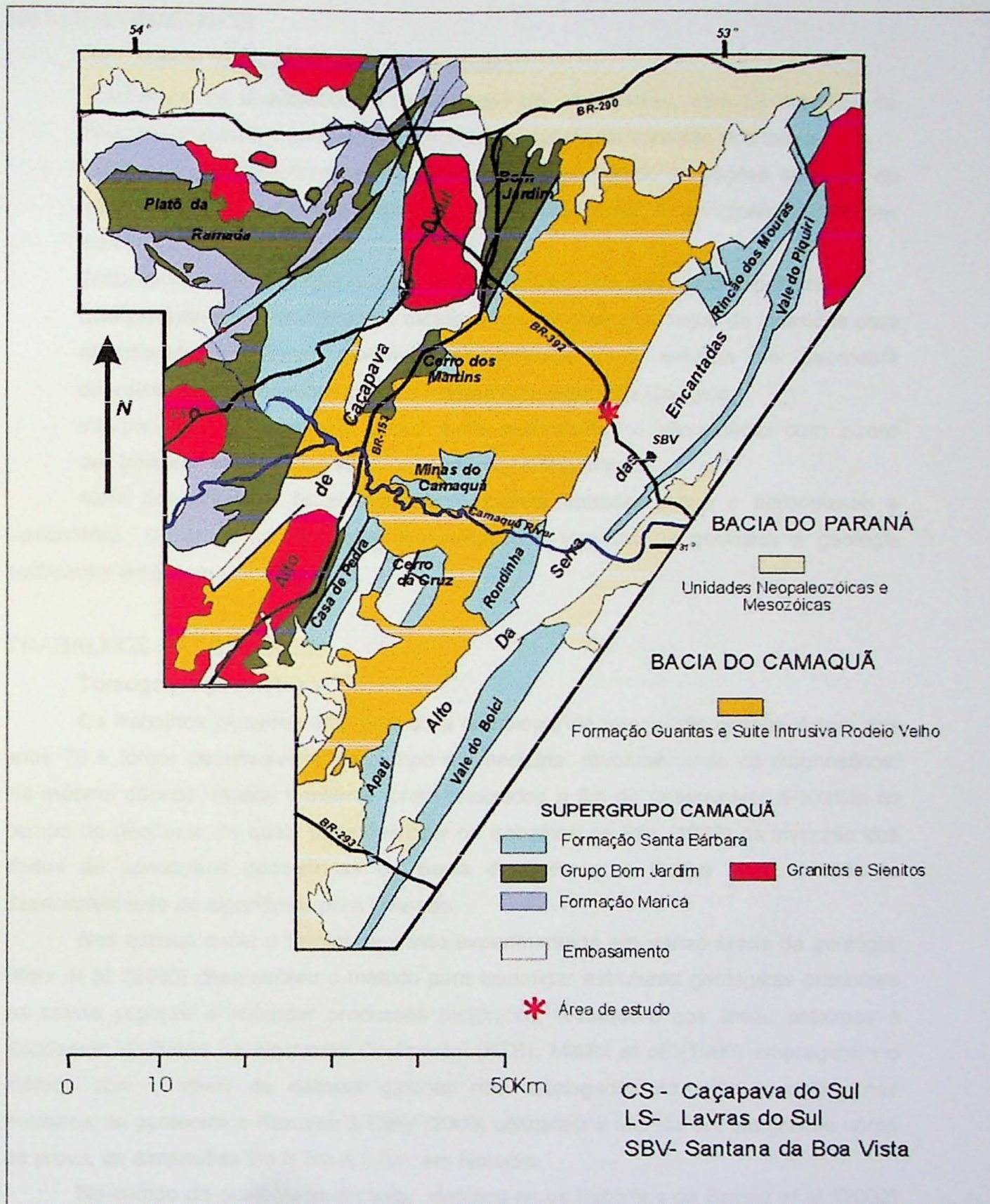


Figura 1 - Mapa geológico da Bacia do Camaquã e área de estudo.

## METAS E OBJETIVOS

Os objetivos do projeto estão listados abaixo:

- Realização de levantamentos geoeletricos do afloramento, com os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida para posterior inversão dos dados;
- Obtenção de fotomosaico do afloramento e levantamento de seções ao longo do afloramento para definição das fácies sedimentares e principais superfícies encontradas;
- Tratamento e interpretação dos dados geoeletricos com *softwares* específicos;
- Comparação entre os diferentes métodos geoeletricos e arranjos de eletrodos para caracterizar o melhor modelo para aplicação em estudos de geometria deposicional de sucessões aluviais antigas com contraste litológico;
- Interpretação da geometria deposicional encontrada no afloramento com auxílio das imagens obtida e das interpretações dos fotomosaicos.

Além dos objetivos listados acima, o projeto também busca o aprendizado e treinamento do aluno na aplicação dos métodos e técnicas de geofísica e geologia sedimentar empregados no trabalho.

## TRABALHOS ANTERIORES

### Tomografia geoeletrica

Os trabalhos pioneiros empregando a tecnologia da tomografia elétrica datam dos anos 70 e foram desenvolvidos no campo da medicina, revolucionando os diagnósticos. Na mesma década, muitos trabalhos foram realizados a fim de desenvolver a técnica no campo da geofísica, os quais podemos citar os trabalhos de Rijo (1977) na inversão dos dados de sondagens geoeletricas da Bacia do Potiguar e Pelton *et al.* (1978) no desenvolvimento de algoritmos para inversão.

Nos últimos anos, a técnica tem sido experimentada em várias áreas da geologia. Storz *et al.* (2000) desenvolveu o método para investigar estruturas geológicas presentes na crosta superior e entender processos tectônicos, testando-o nas áreas próximas à Sondagem Profunda da Alemanha Continental (KTB), Maillol *et al.* (1999) empregaram o método com o intuito de delinear galerias não catalogadas na Índia e auxiliar nos trabalhos de geotecnia e Ramirez & Daily (2000) utilizaram a técnica em um grande corpo de prova, de dimensões 3m X 3m X 4,5m, em Nevada.

No campo da geologia sedimentar, destaca-se os trabalhos de Baines *et al.* (2002) que utilizaram a técnica para mapear litologias e geometrias de canais e vales

preenchidos em quatro localidades quaternárias e compararam os resultados da tomografia geoeletrica com outros métodos empregados.

Entende-se que o termo tomografia (ou imageamento) elétrica tem o mesmo significado que o tradicional caminhamento elétrico com diferentes níveis de investigação, mas que nos últimos tempos o termo é mais específico para os casos de grande detalhe de amostragens (muitos níveis e intervalo pequeno entre as medidas laterais) (Gallas informação verbal).

### **Geologia regional**

A Formação Guaritas foi definida por Robertson (1966) como composta de talus, constituída de fragmentos angulares, de granulometria variada, desde grânulos a blocos de 20 cm derivados de rochas xistosas e graníticas, sendo de ocorrência restrita, com cerca de 150 m de espessura, depósitos de fanglomerados torrenciais com estratificação cruzada acanalada e arenitos arcoseanos que repousam em desconformidade angular sobre sedimentos da Formação Santa Bárbara. As Formações Guaritas e Santa Bárbara estariam agrupadas no Grupo Camaquã, junto com o Membro Andesito Martins, inferior à Formação Santa Bárbara.

Ribeiro *et al.* (1966) observaram, em campo, a predominância de arenitos, com certo grau de maturidade expresso por melhor arredondamento dos grãos detríticos, classificação e grau de alteração dos feldspatos que se mostram bastante esbranquiçados, devido ao processo de caulinição. Também interpretaram as fácies do tipo talus e fanglomerados como tipicamente fluvial, ocorrendo predominantemente nas camadas basais. As camadas superiores foram interpretadas como desembocaduras de pequenos deltas em lagos.

Lavina *et al.* (1985), analisando as fácies e associações encontradas na Formação Guaritas, definiram origem continental para estes depósitos, reconhecendo três ambientes deposicionais:

#### 1 – Leque e planície aluvial de canais entrelaçados;

Consiste de espessa seqüência de conglomerados e arenitos, com ocorrência subordinada de pelitos. Os arenitos apresentam estratificação cruzada acanalada de pequeno a grande porte, ocorrendo estratos cruzados tabulares subordinadamente.

#### 2 – Planície eólica;

Consiste de camadas lenticulares de arenitos, com espessuras de aproximadamente 5 metros, predominando os arenitos finos, bem selecionados. A ocorrência de arenitos médios está associada a lâminas que se intercalam com as de arenitos finos, apresentando bimodalidade. As estruturas primárias mais freqüentes são

estratificação cruzada acanalada ou cunha-planar, de pequeno a muito grande porte (até 3 metros de altura). Em alguns locais ocorrem lâminas de argila recurvada.

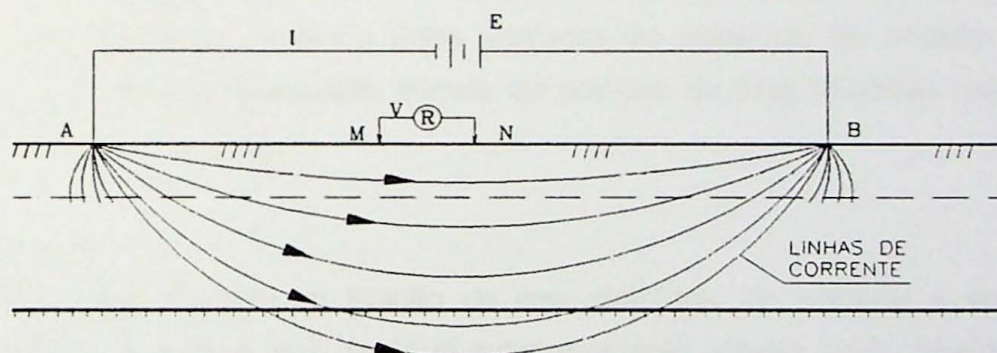
### 3 – Deltas lacustres

Consiste em intercalações de camadas de arenitos e pelitos com razão bastante variável. Os pelitos apresentam-se maciços, com ocorrência de horizontes com fendas de ressecamento. As camadas areníticas apresentam geometria tanto sigmoidal como tabular. As camadas tabulares apresentam, na base, laminação plano-paralela passando para o topo a laminação cruzada cavalgante.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Métodos Geométricos

No presente trabalho foram utilizados os métodos geométricos de eletrorresistividade e polarização induzida (IP). Estes métodos consistem na geração de uma corrente ( $I$ ), por uma fonte ( $E$ ) e introdução desta mesma corrente no terreno por dois eletrodos de corrente. Faz-se a leitura da diferença de potencial ( $\Delta V$ ) e cargaabilidade aparente ( $M_a$ ) entre dois eletrodos de potencial (figura 2).



**Figura 2 - Princípio dos métodos geométricos.**

Nos levantamentos geométricos podem ser utilizados vários arranjos entre os eletrodos, tais como arranjo Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo etc. No projeto foram utilizados os arranjos pólo-dipolo e pólo-pólo. Apesar da boa simetria, o arranjo dipolo-dipolo não foi utilizado pois apresenta uma razão sinal/ruído muito baixa, não permitindo uma grande quantidade de níveis de investigação. Os dois arranjos, e as diferenças entre eles estão descritas abaixo:

### Arranjo Pólo-dipolo

Também conhecido como arranjo tripolo, tem como característica a mobilidade dos três eletrodos, dois de potencial, M e N, a uma distância  $l$  entre eles, e um de corrente, A, distanciando  $nl$  do eletrodo mais próximo, com  $nl \geq 1$  ( $n = 1; 2; 3; 4$  etc), ao longo do perfil e fixação de um eletrodo de corrente B a uma distância suficientemente grande, denominada "infinito", de modo que as leituras dependam somente do eletrodo A, conforme a figura 3. O ponto lido é a intersecção das retas de origem em A e no ponto médio (O) de M e N, com ângulo de  $45^\circ$ .

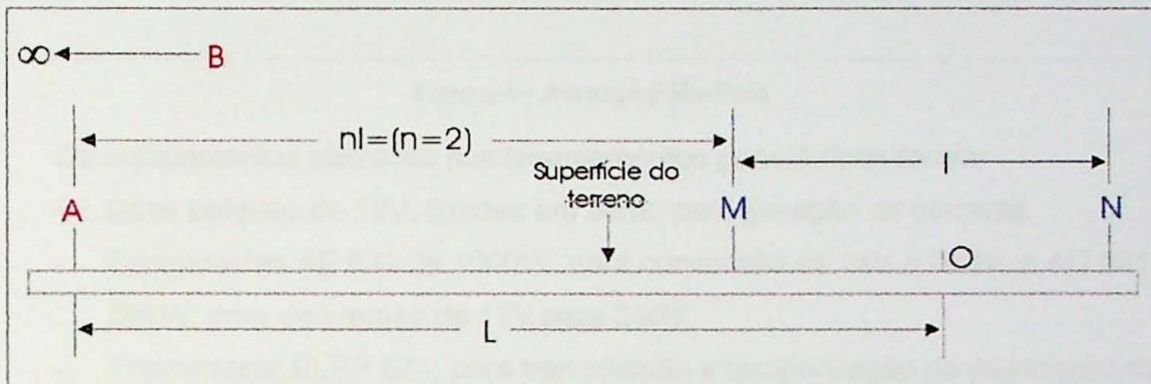


Figura 3 - Arranjo Pólo-Dipolo ou Tripolo (Gallas, 2000)

Uma vantagem deste arranjo é o fato do eletrodo de corrente B ser mantido fixo possibilitando a escolha de um local onde possa ser feito um bom aterramento e na melhor relação sinal/ruído recebido pelos eletrodos de potencial. No entanto, devido à assimetria do arranjo, a localização correta da posição de uma anomalia detectada se torna difícil.

### Arranjo Pólo-pólo

Este arranjo consiste na fixação de dois eletrodos, de corrente e de potencial (respectivamente B e N), a uma distância suficientemente grande, no já referido "infinito", porém em lados opostos. Os outros eletrodos (A e M) são deslocados ao longo do perfil de medidas e os dados obtidos referem-se somente aos eletrodos do perfil (figura 4). A relação sinal/ruído deste arranjo é ainda melhor do que no pólo-dipolo, possibilitando que sejam obtidas leituras em maior número de níveis de investigação.

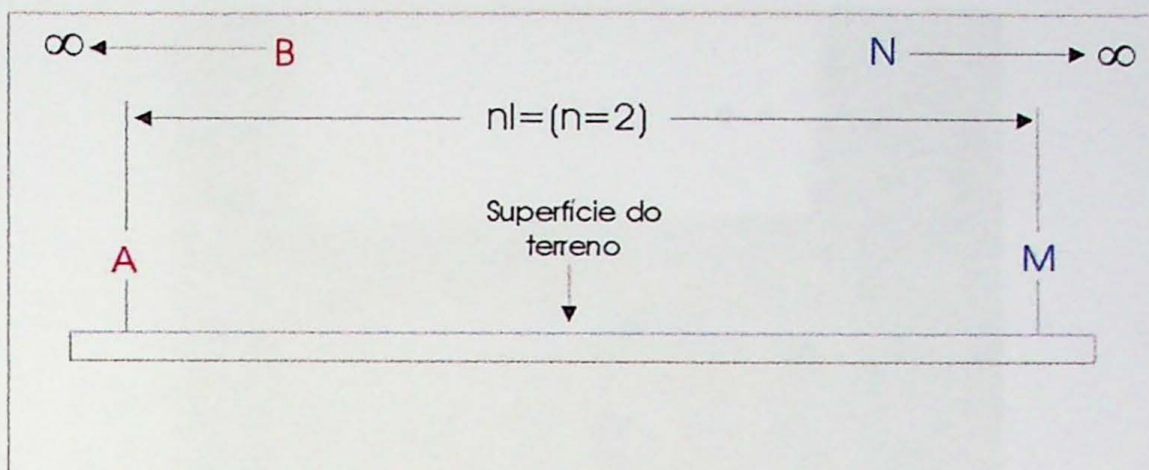


Figura 4 - Arranjo Pólo-Pólo

Os equipamentos utilizados nos levantamentos geofísicos foram:

- Duas baterias de 12V, ligadas em série, para geração de corrente
- Conversores AE 631 de 1000W, para conversão de 24V a 400V e AD 631 200W, para conversão de 12V para 200V.
- Transmissor ELPP 671, para transmissão e temporização da passagem da corrente no solo.
- Receptor IP modelo IPR-10A, para leitura de  $\Delta V$  e  $M_a$ .

A bateria, conversores e transmissor estão ilustrado na foto 1 e o receptor na foto

2.



Foto 1 - Aparelhagem usada para indução de corrente no solo. Da direita para esquerda, conversor AE 631 de 1000W, transmissor ELPP 671, conversor AD 631 200W e bAperia de 12 V.

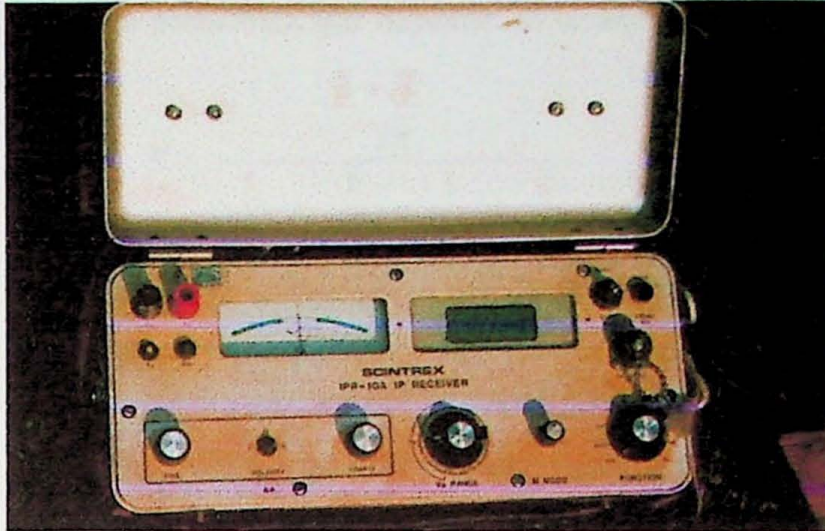


Foto 2 – Receptor Receptor IP modelo IPR-10A.

### *Eletrorresistividade*

Segundo Reynolds (1996), apesar dos métodos métodos de eletrorresistividade terem sido desenvolvidos no começo do século XX, somente após a década de 70 começaram a ser mais empregados.

Como explicado anteriormente, o método de eletrorresistividade consiste na passagem de corrente elétrica pela subsuperfície e leitura do  $\Delta V$  entre dois pontos na superfície. A corrente elétrica propaga-se de duas maneiras através dos materiais, eletrônica ou eletrolítica.

Condução eletrônica – é aquela que se verifica nos materiais que possuem elétrons livres, como é o caso dos metais ou dos sulfetos metálicos. Também é o modo como se dá nos materiais semicondutores, normalmente maus condutores ou até mesmo isolantes, que possuem poucos ou nenhum caminho que possibilite a passagem de corrente.

Condução iônica (eletrolítica) – é aquela que ocorre em um eletrólito, onde o fluxo da corrente se processa através de íons. Este modo de propagação da corrente elétrica certamente é a maneira de condução elétrica de maior importância nos estudos e levantamentos geofísicos de eletrorresistividade.

O principal parâmetro fornecido pelo método da eletrorresistividade é a resistividade aparente ( $\rho_a$ ), calculada a partir da corrente ( $i$ ) introduzida no terreno e da diferença de potencial ( $\Delta V$ ) obtida, de acordo com a equação (1)

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

onde K é uma constante geométrica que depende do arranjo de eletrodos e é calculada segundo a equação (2).

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

AM – Distância entre eletrodo de corrente A e eletrodo de potencial M.

BM – Distância entre eletrodo de corrente B e eletrodo de potencial M.

AN – Distância entre eletrodo de corrente A e eletrodo de potencial N.

BN – Distância entre eletrodo de corrente B e eletrodo de potencial N.

### Polarização Induzida

Apesar do fenômeno da Polarização Induzida ter sido descoberto no começo do século passado pelos irmãos Schlumberger (1929, apud Orellana, 1972), o método só se tornou popular a partir dos anos 50, sendo muito usado na prospecção de sulfetos metálicos.

O fenômeno da polarização induzida (IP) consiste no decaimento da voltagem entre os eletrodos de potencial em um determinado tempo (figura 5), após o corte da corrente primária. Isto se deve por um armazenamento de energia no material, como se fosse um capacitor. Este armazenamento é resultado de dois fatores:

- Variação na mobilidade dos ions no fluido presente nas rochas, conhecida como *polarização eletrolítica* ou *de membrana*, constituindo o *background* ou efeito IP normal;
- Variação entre a condução iônica e eletrônica, conhecida como *polarização metálica* ou *eletrônica*, ocorrendo em materiais onde minerais metálicos estão presentes. Esta *sobrevoltagem* possui magnitude maior que o *background*.

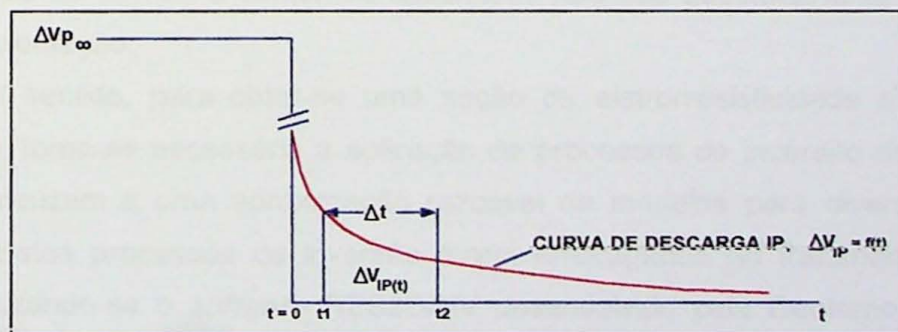


Figura 5 - IP domínio do tempo, curva de descarga IP e forma da onda da voltagem primária aplicada.

As medições do efeito IP podem ser feitas nos domínios do tempo e da frequência. Neste trabalho, os levantamentos IP foram realizados no domínio do tempo, onde a medição da cargabilidade aparente ( $M_a$ ) é feita após corte do pulso de corrente.

*Domínio da frequência* – Medição da resistividade aparente em duas ou mais frequências.

*Domínio do tempo* – Medição do efeito IP, após o corte de um pulso de corrente, em função do tempo, onde a cargabilidade corresponde a amplitude da voltagem secundária ou de decaimento  $V_{IP}(t)$  com relação a amplitude da voltagem primária ( $V_p$ ) em volts.

Como ilustrado na figura 5, a cargabilidade representaria a área formada sob a curva de descarga, inclusive a assintota que tende a zero e é dada pela equação 3

$$IP = \int_0^{\infty} \Delta V_{IP} dt \quad (3)$$

Como é praticamente impossível medir o potencial no instante do corte de corrente por causa dos efeitos espúrios existentes neste momento, a medida de cargabilidade é feita calculando-se a área sob a curva de descarga, limitada por  $t_1$  e  $t_2$ , após alguns milissegundos, e normalizada com relação a voltagem primária, conforme a equação 4, sendo chamada de cargabilidade aparente ( $M_a$ ) e dada em unidade de tempo (ms).

$$M_a = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP(t)} dt \quad (4)$$

### **Processamento dos dados**

Os dados levantados em campo, são apresentados em pseudo-seções. São assim chamadas pois as formas e contornos assumidos não são absolutamente verdadeiros e sim uma aproximação.

Neste sentido, para obter-se uma seção de eletroresistividade e cargabilidade mais precisa, torna-se necessária a aplicação de processos de inversão dos dados que, em tese, conduzem a uma aproximação razoável de modelos para diversas estruturas geológicas. Estes processos de inversão foram empregados no tratamento dos dados levantados, usando-se o *software* RES2DINV desenvolvido pela Geotomo *softwares*. O RES2DINV utiliza o método dos mínimos quadrados para os processos de inversão (Loke, 2000).

### **Análise de fácies e elemento arquitetural**

Reading (1996) define fácies sedimentares como corpos de rocha com características específicas, de acordo com cor, textura, estruturas sedimentares, composição e assembléia de fósseis presente ou não. O termo pode ser usado para descrever diferentes formas a mesma rocha, como processo deposicional, ambiente deposicional ou simplesmente observacional, onde se descreve as características da rocha. A forma como será usada depende do objetido e da escala de estudo. No projeto foi utilizado o modelo observacional.

### **DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

Primeiramente foi realizada a etapa de campo, onde foram ensaiados os perfis geoeletricos, levantadas seções colunares e efetuadas fotos do afloramento para interpretação do fotomosaico. Para isto foi escolhido a seção que mais se adequava para a realização do trabalho. Na escolha do melhor afloramento foi levado em conta a exposição que apresentasse diferenças texturais mais marcantes, assim como extensão lateral (aproximadamente 200 metros) e altura adequadas (mais de 5 metros) e melhores condições de acesso para a realização dos trabalhos. O afloramento escolhido mostrou perfeita adequação aos objetivos propostos. Além disso, localiza-se em um divisor de águas entre dois córregos, situados a cerca de 800m, o que possibilitou um excelente aterramento dos eletrodos fixados no "infinito".

No campo foi feita uma interpretação preliminar do fotomosaico para auxiliar na definição das fácies sedimentares e superfícies principais.

Após a fase de campo, realizou-se pesquisa bibliográfica focalizando os métodos empregados no trabalho, trabalhos anteriores que utilizaram a técnica da tomografia geoeletrica e trabalhos relacionados com a formação Guaritas. Nesta etapa foi feita a interpretação final do fotomosaico, com auxilio das seções colunares e definidas as fácies sedimentares encontradas no afloramento. Com os resultados obtidos nesta primeira etapa foi elaborado o relatório parcial.

Na segunda etapa do trabalho, foram efetuados os tratamentos dos dados geofísicos com o *software* Res2dinv. Com este tratamento, Foi possível realizar quatro imagens (modelos) do afloramento denominadas Imagem Pólo-Dipolo-Resistividade, Pólo-Dipolo-IP, Pólo-Pólo-Resistividade e Pólo-Pólo-IP. Foi feita a descrição de cada imagem obtida e posterior comparação entre elas e entre a seção geológica feita na primeira etapa.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Perfil Geológico do Afloramento

Com a interpretação do fotomosaico e das seções levantadas, foi possível a elaboração do perfil geológico do afloramento e definição de nove fácies sedimentares. No perfil, pode-se observar uma sucessão de rochas pelíticas e psamíticas ao longo de toda a exposição, com predomínio das rochas areníticas a SE do afloramento e pelítica na porção NW.

Nas camadas areníticas ocorrem arenitos grossos a finos, com predominância de arenitos médios a grossos com estratificação cruzada acanalada (**Aa**) (foto 3), estratificação cruzada tabular (**Ap**) (foto 4) e estratificação plano-paralela (**Ah**), predominando as cruzada acanalada. Algumas camadas de arenito também se apresentam maciças (**Am**). Por vezes as fácies de arenitos com estratificação cruzada apresentam seixos e grânulos dispersos, angulos a subangulos e intralcastos tabulares de argilitos. Em algumas camadas de arenitos finos foi observada a presença de muscovita, laminação heterolítica (fácies **Rh**) ou películas milimétricas de siltito (*drapes*). Os arenitos ocorrem em geometria lenticular ou preenchem estruturas de corte e preenchimento. Em um ponto do afloramento foi observada a ocorrência de estrutura de sobrecarga (foto 5), em contato entre camada de arenito fino siltoso e arenito médio.



**Foto 3 - Camada de arenito médio com varias séries de estratificação cruzada acanalada. Notar que a camada se encontra sobre camada de pelito. Fácies Aa.**



**Foto 4 - Camada de arenito com estrApificação cruzada tabular. Fácies Ap.**

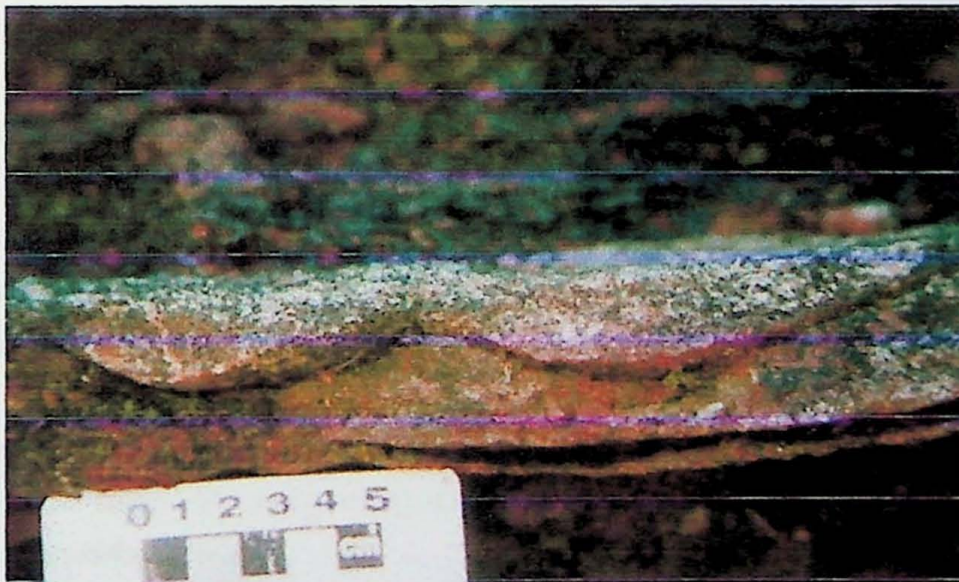


**Foto 5 - Estrutura de sobrecarga no contApo entre camada de arenito fino siltoso laminado e arenito médio com estrApificação cruzada tabular.**

Os pelitos presentes no afloramento apresentam geometria tabular, sendo mais presentes na porção noroeste do afloramento. Na porção sudeste do afloramento as camadas pelíticas apresentam espessuras menores. Caminhando para NW do afloramento, as camadas pelíticas tornam-se mais espessas (foto 6), com ocorrência de gretas de contração (fácies Pg), e apresentam camadas milimétricas a centimétricas de arenitos finos a grossos com laminação plano-paralela, estratificação cruzada tabular e cruzada acanalada. Algumas intercalações de arenito apresentam marcas onduladas (fácies Ao) (foto 7).



**Foto 6 - Camadas de pelitos decimétricas com intercalações de camadas de arenito milimétricas a centimétricas e gretas de contração.**



**Foto 7 - Detalhe de camada centimétrica de arenito médio com marca ondulada intercalada em camada de pelito.**

A tabela abaixo mostra descrição e a interpretação das fácies encontradas no afloramento:

	<b>Descrição</b>	<b>Interpretação</b>
Ah	Arenitos médios a grossos, por vezes conglomeráticos, com estratificação horizontal.	Depósitos de corrente em leito plano.
Aa	Arenitos de textura média a grossa, por vezes conglomeráticos, com estratificação cruzada acanalada. Os seixos encontrados são angulosos a subangulosos, de composição milonítica e granítica. Ocorrem também intraclastos tabulares de argila, os interclastos são derivados de gretas destruídas pela corrente.	Migração de dunas subaquáticas de cristas sinuosas por ação de corrente trativa.
Ap	Arenitos médios a grossos com estratificação cruzada plana, por vezes conglomeráticos.	Migração de dunas subaquáticas de cristas retas por ação de correntes.
Am	Arenitos médios maciços, predominantemente intercalados a fácies de decantação.	Possivelmente depósitos de fluxo gravitacional gerados pelo aporte de material arenoso em águas estagnadas.
Alc	Arenitos finos a médios, com laminação cruzada.	Migração de marcas onduladas por ação de corrente.
Ao	Arenitos médios a finos com marcas onduladas	Preservação de formas de leitos geradas por correntes.
Rh	Ritmitos com laminação heterolítica	Alternância de deposição de material transportado por tração e decantação de material transportado por suspensão.
Pl	Pelitos laminados, predominantemente siltitos	Decantação de material transportado por suspensão
Pg	Pelitos com gretas de contração, predominantemente argilitos	Decantação de material transportado por suspensão, seguida por exposição subaérea e contração por perda de água.

A associação de fácies de tração com fácies de decantação freqüentemente marcadas por exposição subaérea sugere um ambiente com alternância de quatro processos: i) ação de correntes unidirecionais (responsável pelas fácies **Aa**, **Ap** e **Ah**), ii) aporte de material arenoso (fácies **Ao**, **Alp**, **Rh** e **Am**) em água estagnada; iii) decantação de material fino (fácies **Pl** e **Pg**) e iv) exposição subaérea e gretação de pelitos (fácies **Pg**). Os corpos psamíticos são caracterizados por contatos erosivos basais e abundantes intraclastos argilosos e os corpos mais pelíticos marcados por repetidos ciclos de tração, decantação e exposição, registrados em camadas centimétricas. Essas características sugerem um sistema deposicional dominado por correntes aluviais efêmeras, caracterizadas por picos de vazão de baixa freqüência (Tooth 2000) em canais ou enchentes em lençol (Bromley 1991) e amplas áreas distais ciclicamente inundadas e expostas (Turnbridge 1984).

O perfil e as seções geológicas encontram-se abaixo, nas figuras 6 e 7 respectivamente.

Figura 6 - Seção geológica NW - SE do afloramento

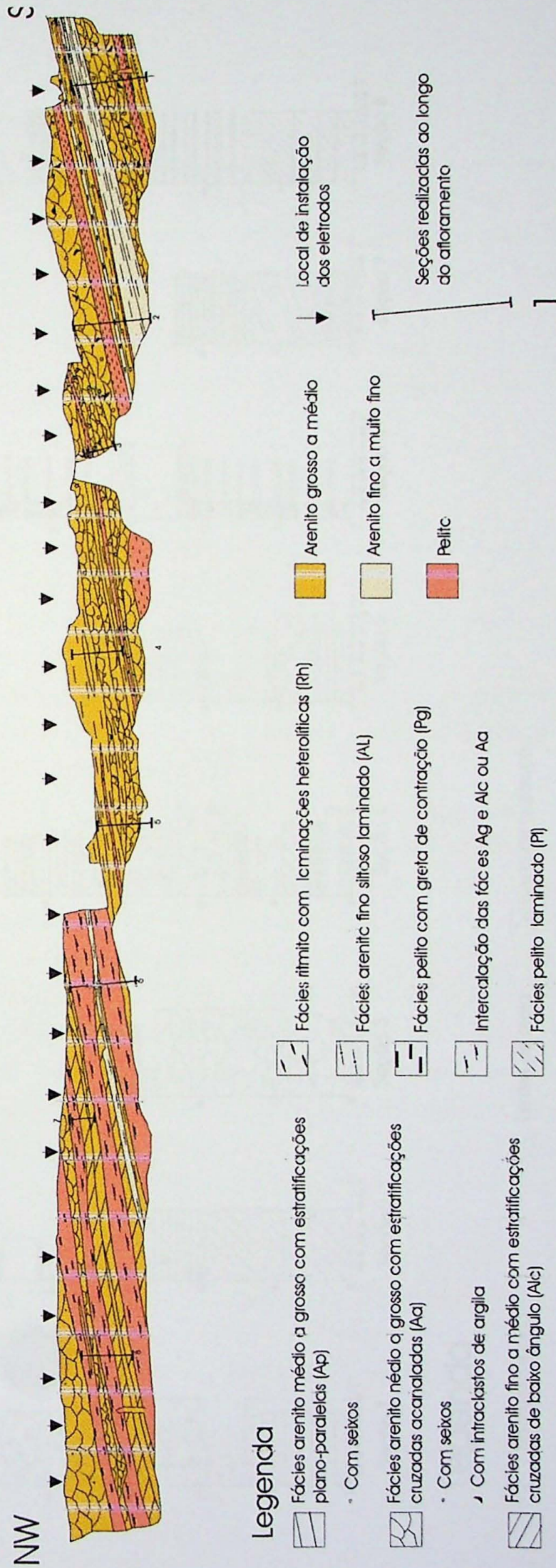
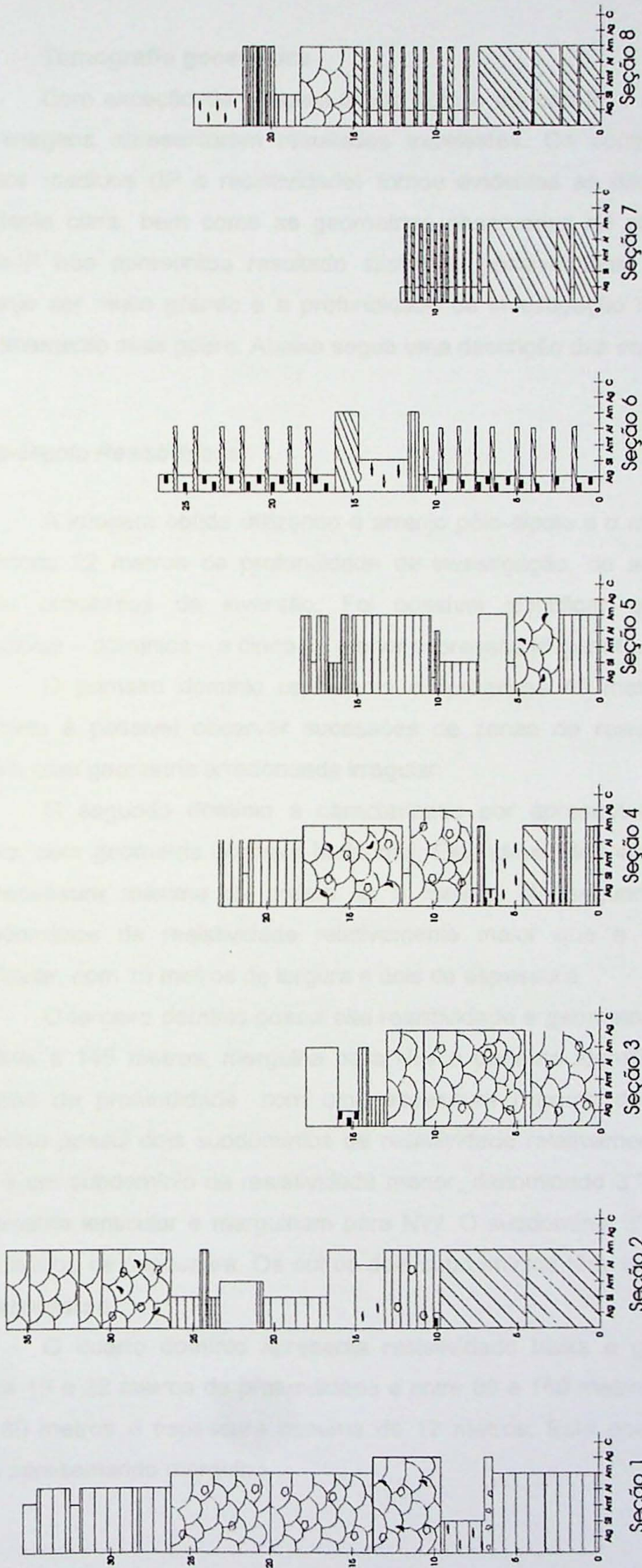











Figura 7 - Seções Verticais do Afloramento



### Legenda

-  Estrutura maciça
-  Estratificação Plano paralela
-  Estratificação cruzada tabular
-  Estratificação cruzada acanalada
-  Lentes de areia
-  Lentes de argila
-  Seixos
-  Intraclasto de argila
-  Greta de contração

## **Tomografia geoeétrica**

Com exceção da imagem obtida com o método IP e arranjo pólo-pólo (figura 11), as imagens apresentaram resultados excelentes. Os contrastes entre os parâmetros físicos medidos (IP e resistividade) tornou evidentes as diferenças litológicas de forma bastante clara, bem como as geometrias observadas no afloramento. A imagem Pólo-Pólo-IP não apresentou resultado satisfatório possivelmente pelo fato da assimetria do arranjo ser muito grande e a profundidade de investigação muito alta, o que implica em detalhamento mais pobre. Abaixo segue uma descrição das imagens obtidas.

### *Pólo-Dipolo Resistividade*

A imagem obtida utilizando o arranjo pólo-dipolo e o método da eletrorresistividade alcançou 22 metros de profundidade de investigação, de acordo com o modelo obtido pelos processos de inversão. Foi possível identificar quatro estratos geoeétricos principais – domínios – e cinco de menor expressão (Figura 8).

O primeiro domínio representa os primeiros 40 metros do perfil, a NW. Neste domínio é possível observar sucessões de zonas de resistividade alta e resistividade baixa, com geometria arredondada irregular.

O segundo domínio é caracterizado por apresentar resistividade relativamente baixa, com geometria côncava horizontal. Estende-se dos 40 aos 110 metros da imagem e espessura máxima da ordem de 5 metros. No segundo domínio observa-se dois subdomínios de resistividade relativamente maior que a do domínio 2 e geometria lenticular, com 10 metros de largura e dois de espessura.

O terceiro domínio possui alta resistividade e geometria tabular. Ocorre entre os 65 metros e 145 metros, mergulha para NW e pode-se identificá-lo desde 1 metro até 18 metros de profundidade, com uma espessura máxima da ordem de 8 metros. Este domínio possui dois subdomínios de resistividade relativamente maior, denominados 3' e 3" e um subdomínio de resistividade menor, denominado 3'''. Os três domínios possuem geometria lenticular e mergulham para NW. O subdomínio 3' tem 27 metros de largura e 3,5 metros de espessura. Os outros dois subdomínios têm 10 metros de largura e 1 metro de espessura.

O quarto domínio apresenta resistividade baixa e geometria lenticular. Situa-se entre 10 e 22 metros de profundidade e entre 80 e 160 metros do perfil, possuindo largura de 80 metros e espessura máxima de 12 metros. Este domínio se encontra horizontal, não apresentando mergulho.

### *Pólo-Dipolo-IP*

A imagem obtida utilizando o método IP e arranjo pólo-dipolo também atingiu os 22 metros de profundidade de investigação, de acordo com a modelagem obtida pelo processamento. Foi possível dividir a imagem em cinco domínios principais, dois de cargabilidade alta e três de cargabilidade baixa (figura 9).

O primeiro domínio apresenta cargabilidade alta e se estende pelos primeiros 40 metros do perfil, chegando à profundidade de 14 metros em sua maior espessura.

O segundo e o terceiro domínio possuem cargabilidade baixa. O segundo domínio ocorre entre 40 e 52 metros, apresenta geometria irregular e atinge sete metros de profundidade. O terceiro domínio localiza-se entre 57 e 100 metros, atingindo profundidade de 7,5 metros. Esta camada apresenta geometria em forma de bacia.

O quarto domínio representa a parte inferior da imagem e apresenta cargabilidade baixa. Ocorre ao longo de toda a imagem, entre as profundidades 14 e 22 metros, chegando em alguns casos à profundidade de 7 metros, próximo ao domínio 2.

O quinto domínio é caracterizado por possuir cargabilidade alta e grande extensão (entre 45 e 160 metros). Geometricamente apresenta-se como três lentes intrerligadas e mergulho para NW. A camada possui aproximadamente 16 metros em sua maior espessura.

### *Pólo-Pólo Resistividade*

Na imagem obtida utilizando-se o método da eletrorresistividade em arranjo pólo-pólo foi alcançado aproximadamente 38 metros de profundidade de investigação, de acordo com a modelagem obtida. Foi possível identificar três domínios principais, dois de resistividade baixa e um de resistividade alta (figura 10). Em alguns domínios foram identificados subdomínios.

O primeiro domínio possui resistividade baixa, extensão de 110 metros, profundidade máxima de 19 metros aproximadamente e geometria tabular. Neste domínio foi possível identificar quatro subdomínios (1', 1'', 1''', e 1''''), todos de resistividade alta e geometria lenticular. A maioria destes subdomínios possui aproximadamente 10 metros de largura e 3 metros de espessura. O subdomínio 1''' apresenta 30 metros de largura e 5 metros de espessura, apresentando resistividade relativamente mais alta que as outras lentes.

O segundo domínio apresenta resistividade alta, geometria tabular, com espessura média de 16 metros e no mínimo, 100 metros de extensão. Este domínio possui um

subdomínio de resistividade mais alta, com geometria lenticular, ocorrendo entre os 115 e 133 metros do perfil e a uma profundidade entre o 1m e 7,5 metros

O terceiro domínio é caracterizado por possuir resistividade baixa. Este domínio aparentemente são duas lentes de resistividade baixa, sobrepostas, com a superior de 60 metros de largura e 12 metros de espessura. A lente inferior não é possível dimensionar, pois o perfil levantado não obteve o recobrimento total da mesma.

#### *Pólo-Pólo IP*

A imagem obtida utilizando o método IP no arranjo pólo-pólo também alcançou os 38 metros de profundidade de investigação, ainda de acordo com a modelagem obtida pelos processos de inversão. A imagem não apresentou resultados satisfatórios, sendo possível identificar somente dois domínios principais. O primeiro deles de cargaabilidade muito baixa, podendo representar o *background* da região. O segundo domínio possui cargaabilidade alta, com geometria lenticular, ocorrendo entre 117 e 126 metros do perfil e entre 6,5 e 19,3 metros de profundidade (figura11).

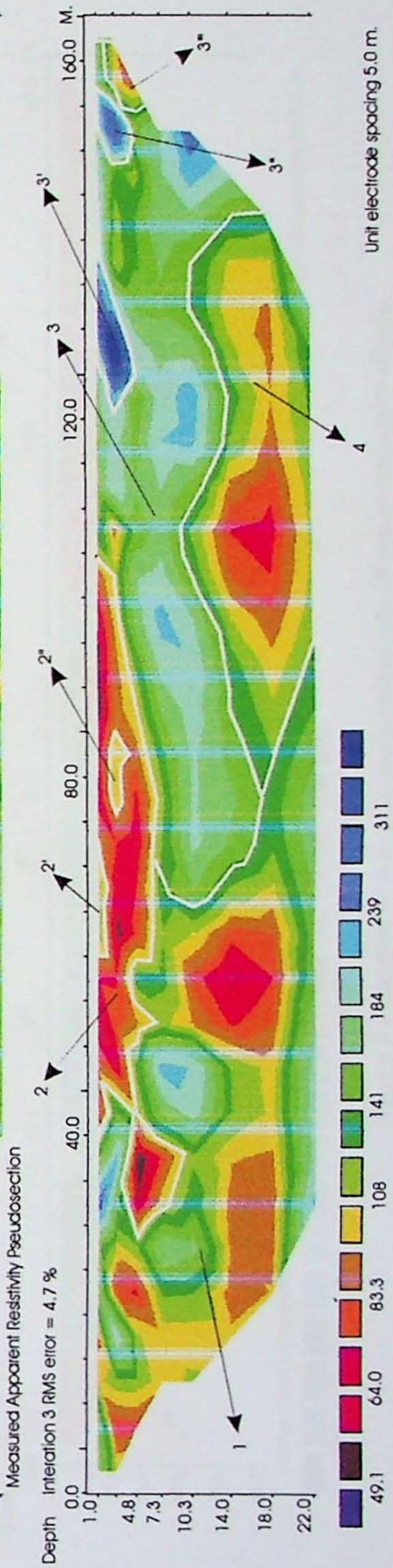
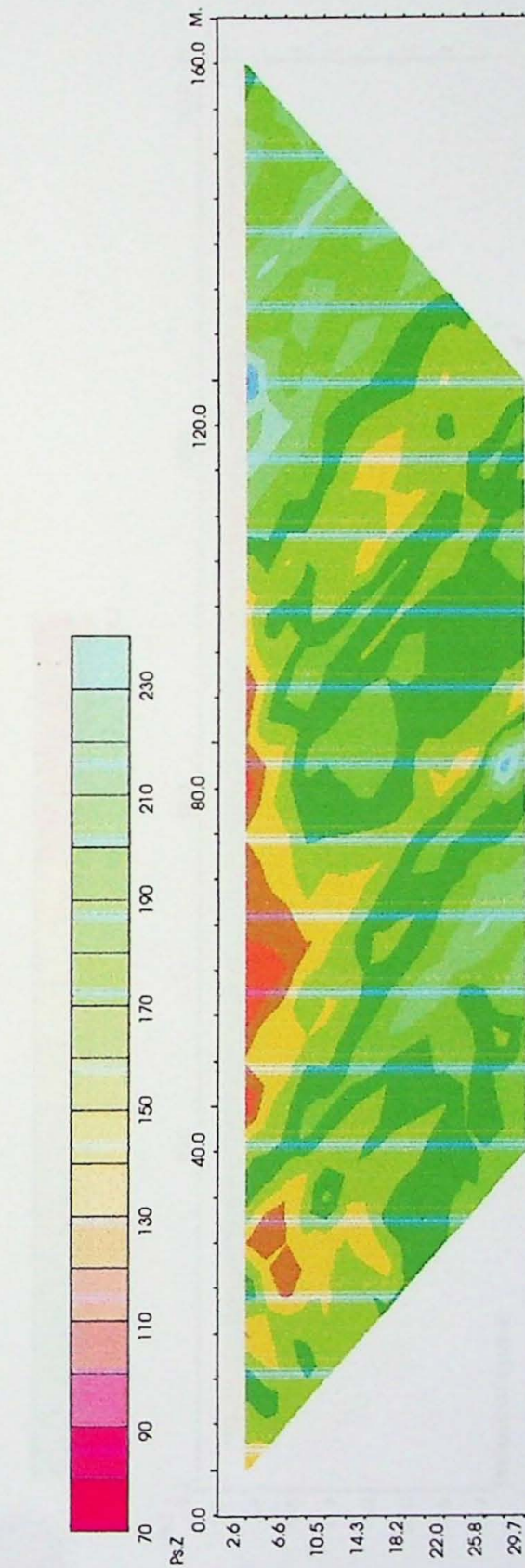
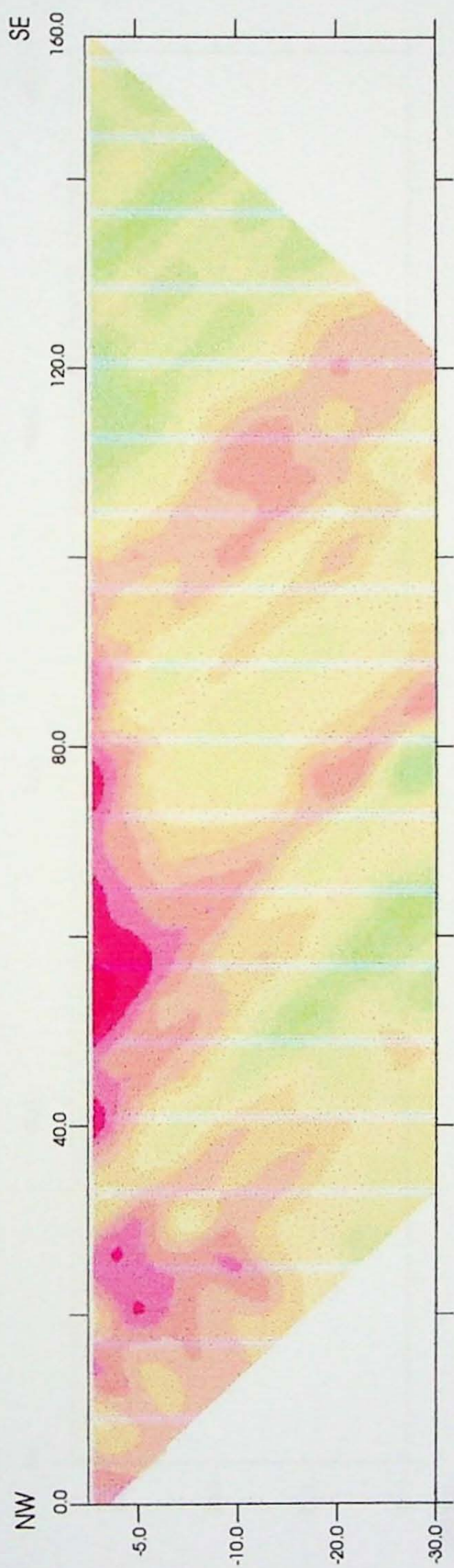


Figura 8 - Imagem obtida utilizando método da eletroresistividade em arranjo pólo-dipolo. Primeira e segunda imagem são pseudo-seções obtidas com *softwares* Surfer (primeira imagem) e Res2dinv. Terceira imagem é a seção real, após inversão dos dados com o *software* Res2dinv.

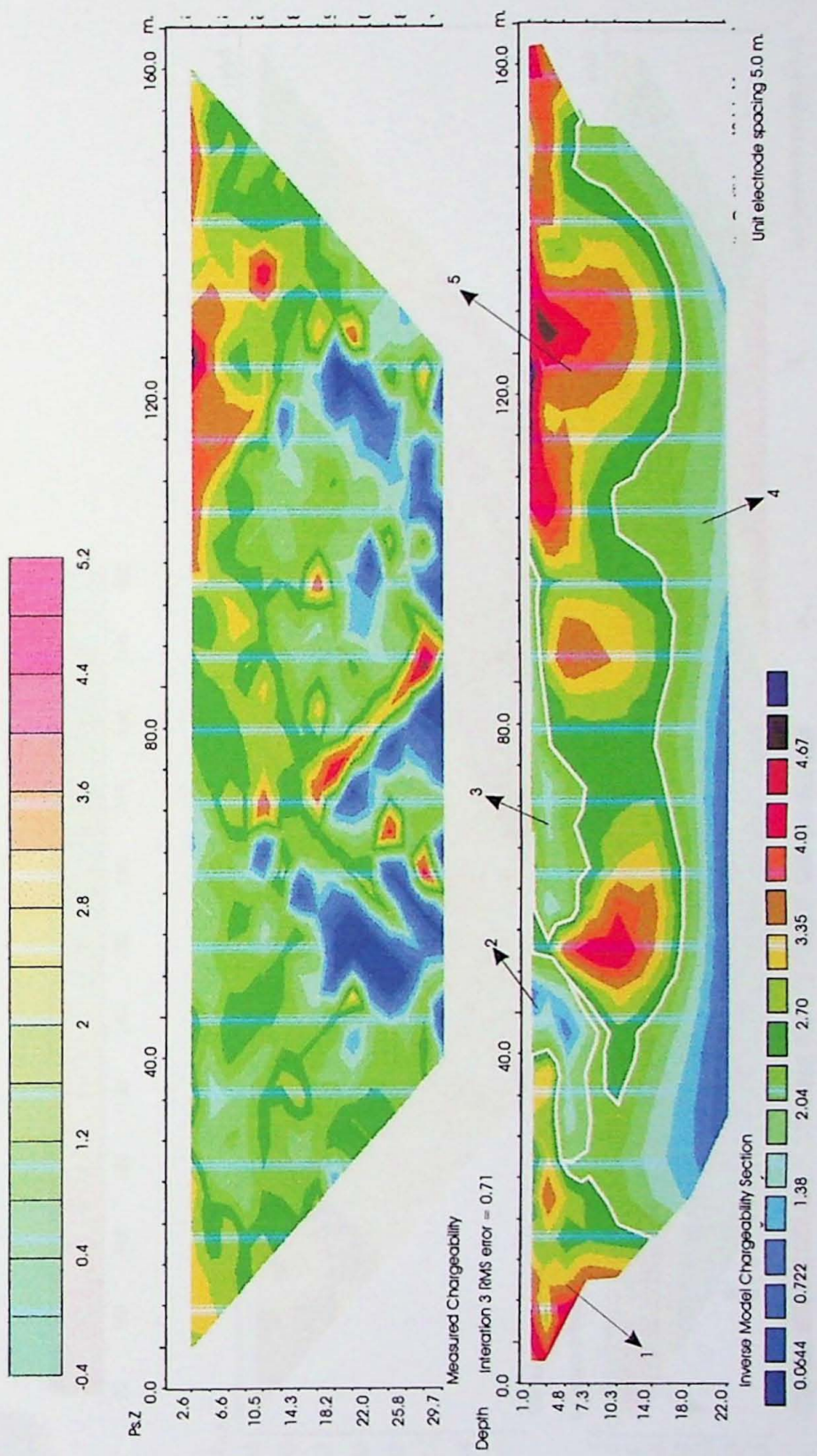
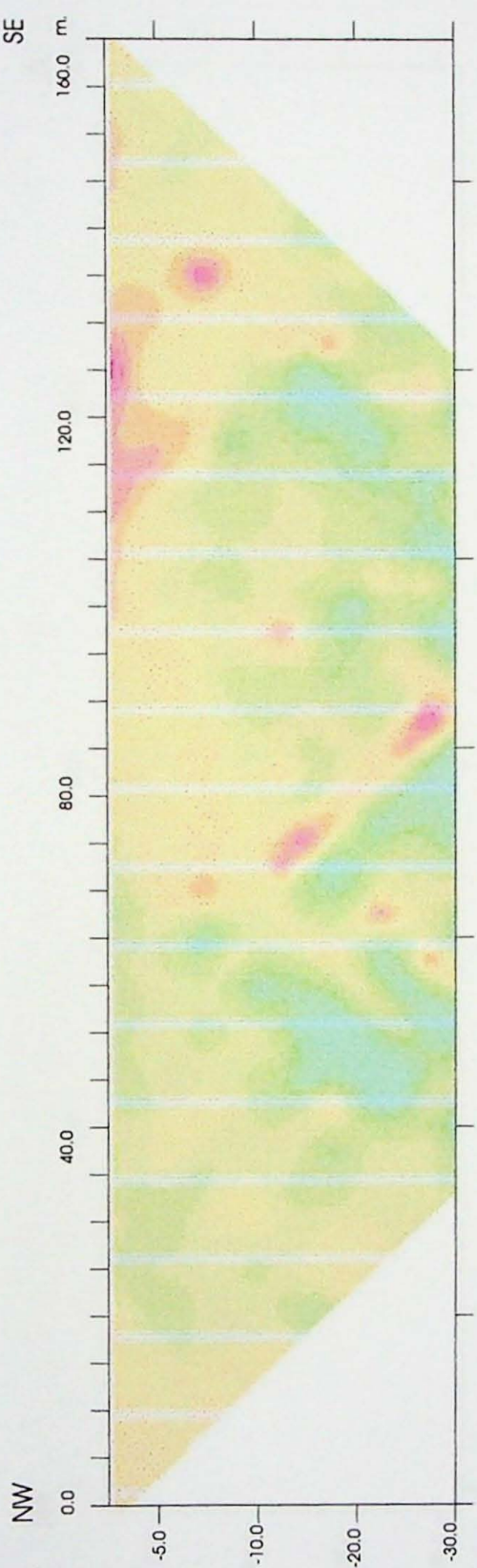
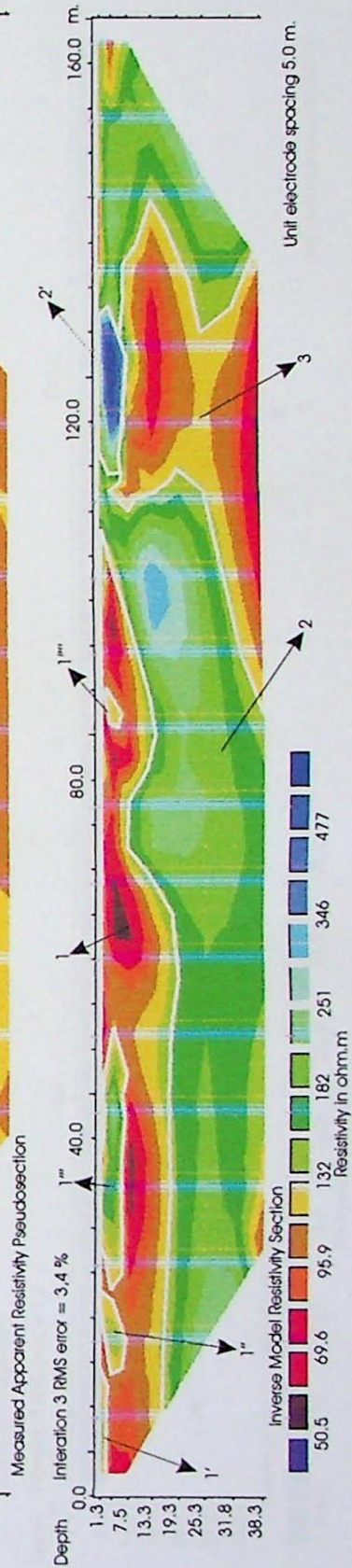
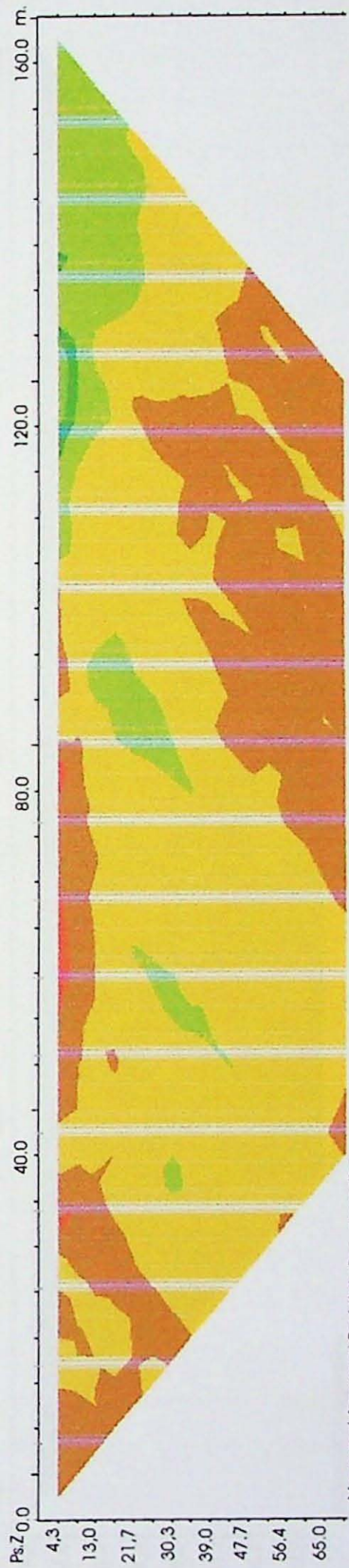
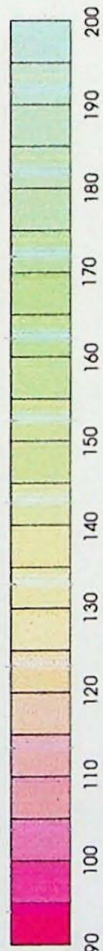
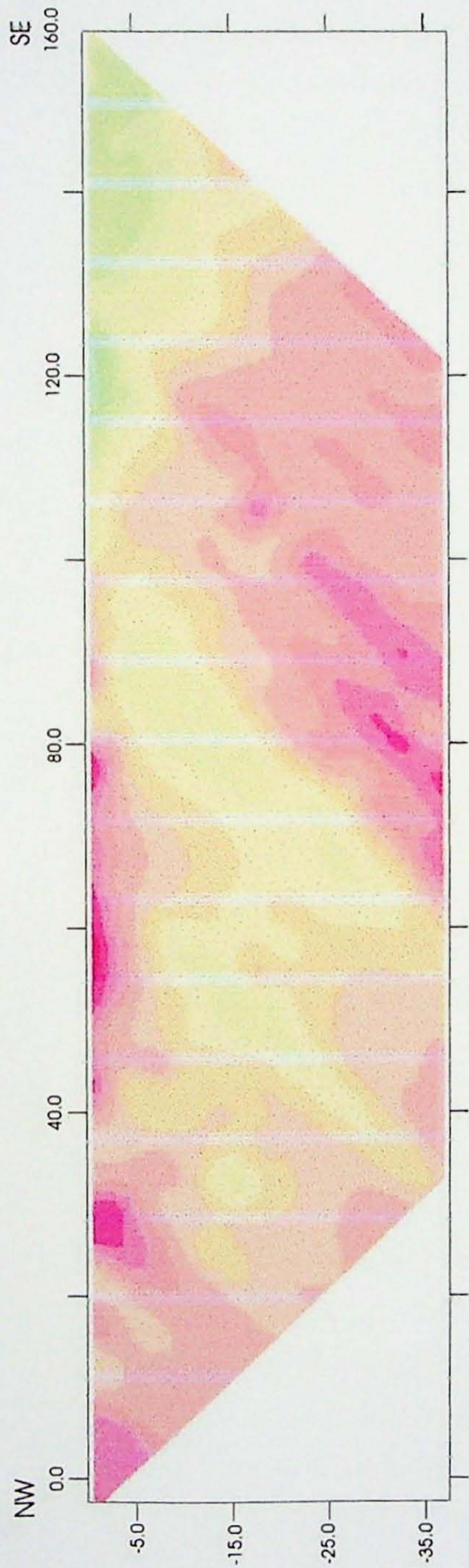
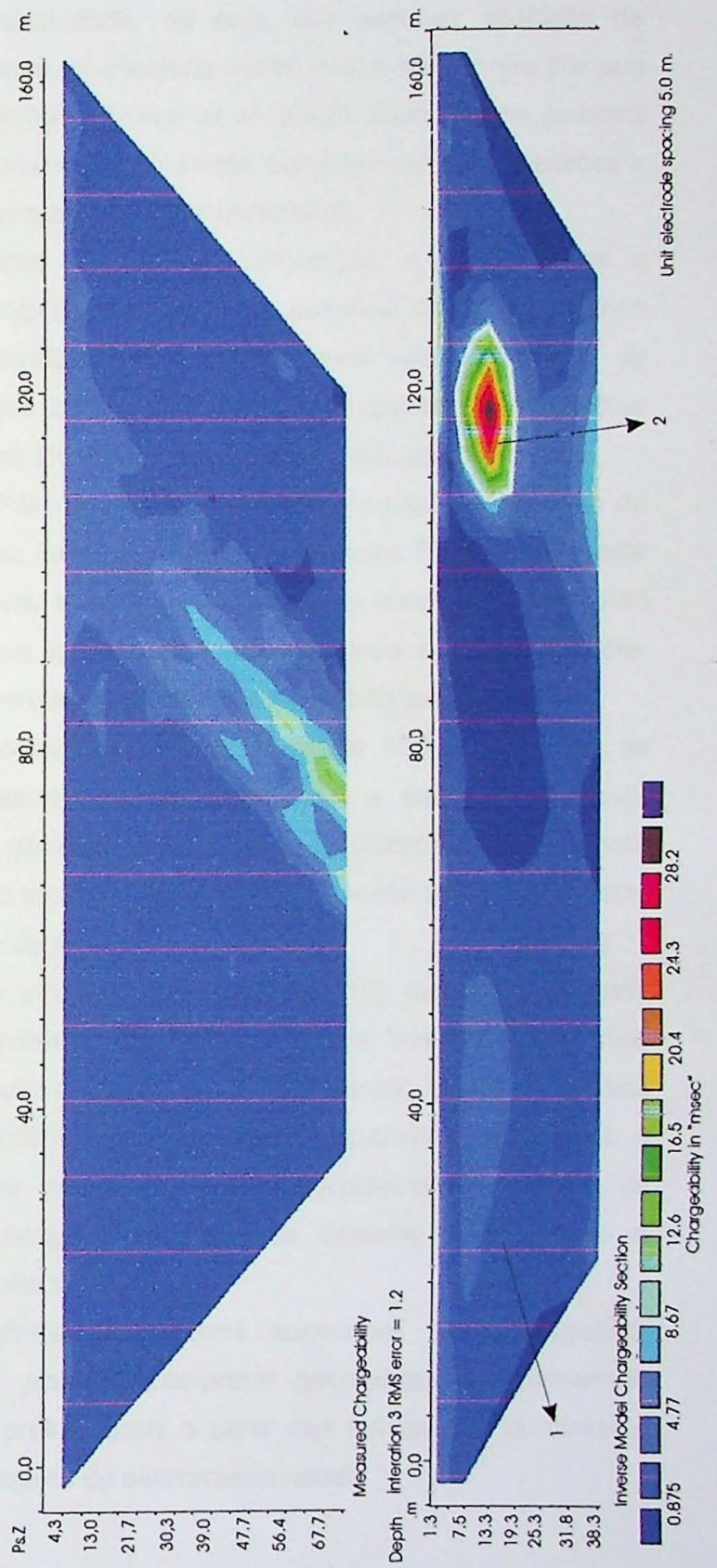
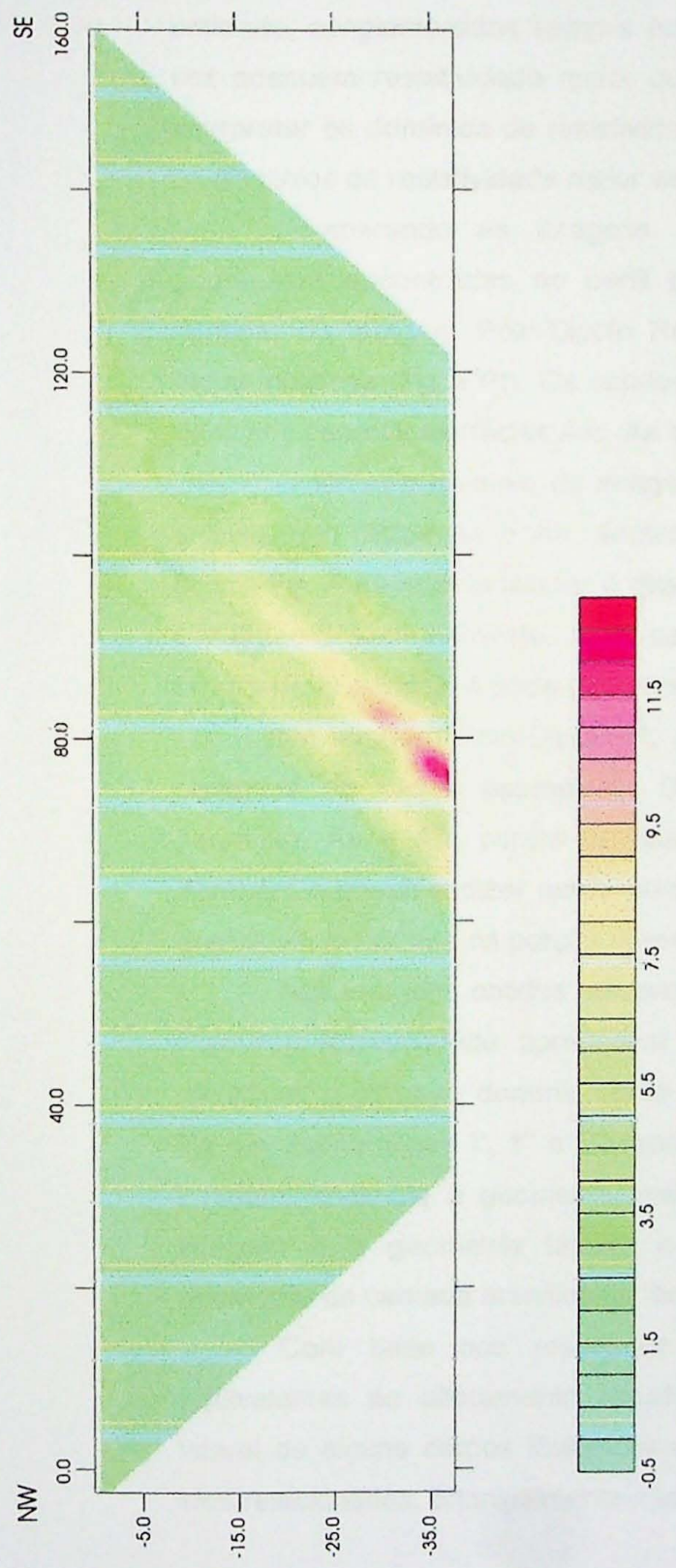


Figura 9 - Imagem obtida utilizando método do IP em arranjo pólo-dipolo. Primeira e segunda imagem são pseudo-seções obtidas com *softwares* Surfer (primeira imagem) e Res2dinv. Terceira imagem é a seção real, após inversão dos dados com o *software* Res2dinv.



**Figura 10 - Imagem obtida utilizando método da eletroresistividade em arranjo pólo-pólo. Primeira e segunda imagem são pseudo-seções obtidas com softwares Surfer (primeira imagem) e Res2dinv. Terceira imagem é a seção real, após inversão dos dados com o software Res2dinv.**



**Figura 11 - Imagem obtida utilizando método do IP em arranjo pólo-pólo. Primeira e segunda imagem são pseudo-seções obtidas com softwares Surfer (primeira imagem) e Res2dinv. Terceira imagem é a seção real, após inversão dos dados com o software Res2dinv.**

## INTERPRETAÇÃO/DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para se definir os domínios encontrados nas imagens é preciso basear-se na relação entre tamanho de grão e resistividade, ou seja, em qualquer condição de umidade, conglomerados sempre possuem resistividade maior que arenitos, que por sua vez possuem resistividade maior que pelitos (Baines *et al.* 2002). Com isto foi possível interpretar os domínios de resistividade menor como sendo camadas de fácies pelíticas e os domínios de resistividade maior as camadas de fácies psamíticas.

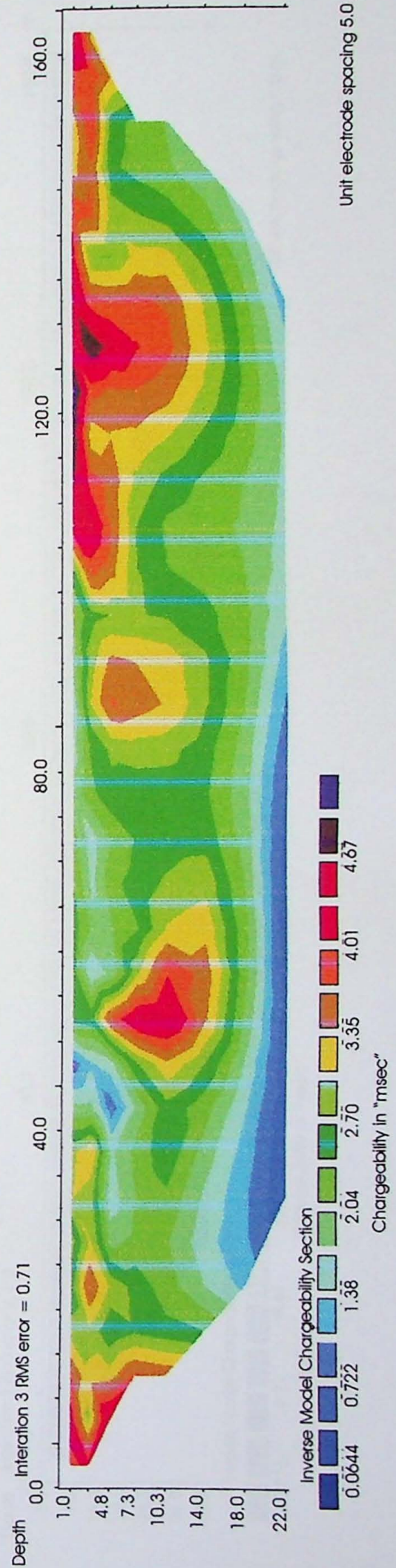
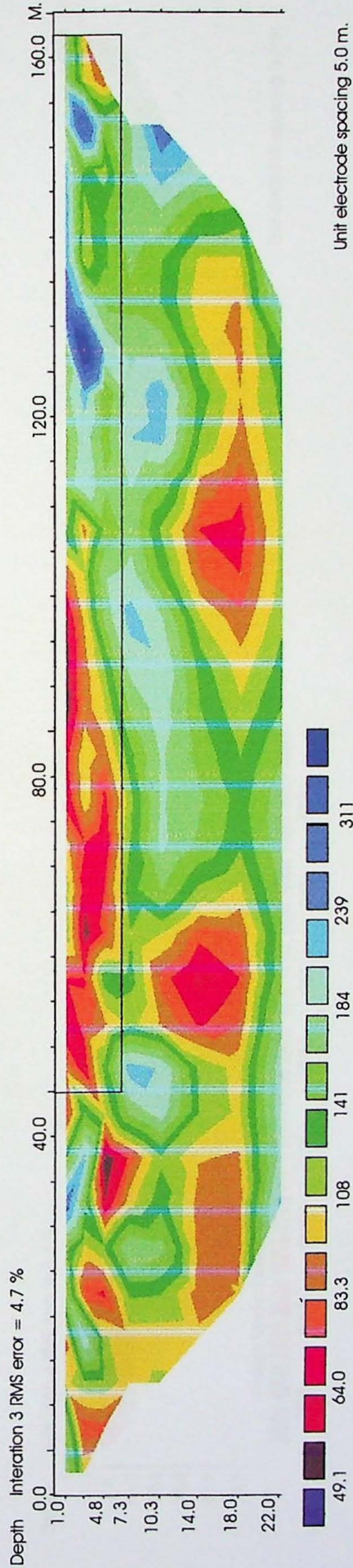
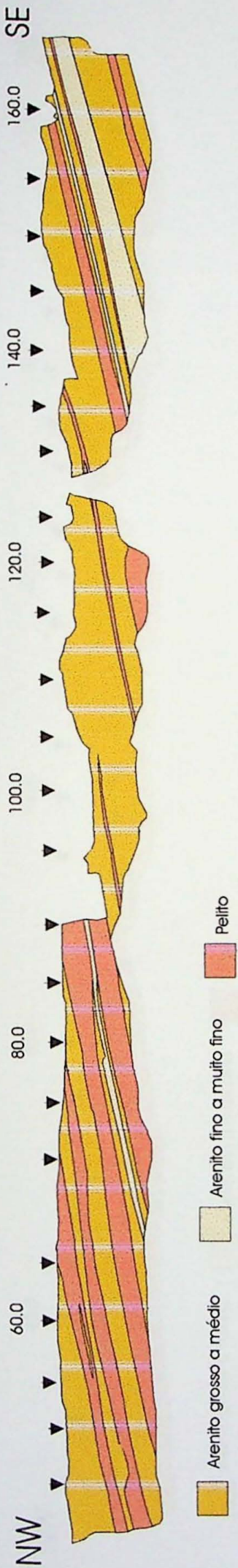
Comparando as imagens obtidas no arranjo pólo-dipolo e as litologias e geometrias encontradas no perfil geológico (figura 12), é possível definir o segundo domínio da imagem Pólo-Dipolo Resistividade como sendo níveis com abundância de fácies pelíticas (**Pg** e **PI**). Os subdomínios 2' e 2'' representam as camadas decimétricas de fácies psamíticas (fácies **Alc**, **Aa** e **Am**) intercaladas nas fácies pelíticas (**Pg**).

O terceiro domínio da imagem Pólo-Dipolo Resistividade representa o pacote de arenito com fácies **Aa** e **Ah** limitado na base por camada de fácies **PI** e no topo pela fácies **Pg**. A geometria tabular é observada tanto na seção como na imagem, assim como o caimento para noroeste. Esta camada também é bem observada na imagem Pólo-Dipolo-IP. O domínio 4 pode ser outra camada de pelito, com geometria lenticular.

Na imagem Pólo-Dipolo-IP, os domínios com cargaabilidade alta representam as camadas de fácies psamíticas. O quarto domínio representa a camada de fácies psamítica **Aa** e **Ah**, porém apresenta geometria sigmoidal não observada em campo. Também é possível dizer que o primeiro domínio representa a camada superior de fácies areníticas, localizada na porção noroeste do perfil.

Nas imagens obtidas utilizando o arranjo Pólo-Pólo (figura 13), somente a imagem Pólo-Pólo-Resistividade apresentou resultados satisfatórios. Nesta imagem é possível identificar o primeiro domínio como sendo a camada com predomínio da fácies pelítica **Pg**. Os subdomínios 1', 1'' e 1''' representam a camada de fácies psamítica **Aa** superior. A imagem evidencia a geometria lenticular da camada. Outra característica marcante da imagem é a geometria tabular e mergulho do segundo domínio, evidenciando a geometria da camada arenítica de fácies **Aa** e **Alc**.

Com base nos resultados obtidos nos metros superiores da investigação, equivalentes ao afloramento estudado, pode-se interpretar geometrias e continuidade lateral de alguns corpos litológicos em profundidade a partir das formas dos domínios a eles relacionados, principalmente nas imagens de eletrorresistividade.



**Figura 12 - Seção geológica do perfil, mostrando somente as litologias encontradas. Abaixo estão as seções reais de eletroresistividade (segunda imagem) e IP (terceira imagem), em arranjo pólo-dipolo, após inversão dos dados. O retângulo representa o afloramento**

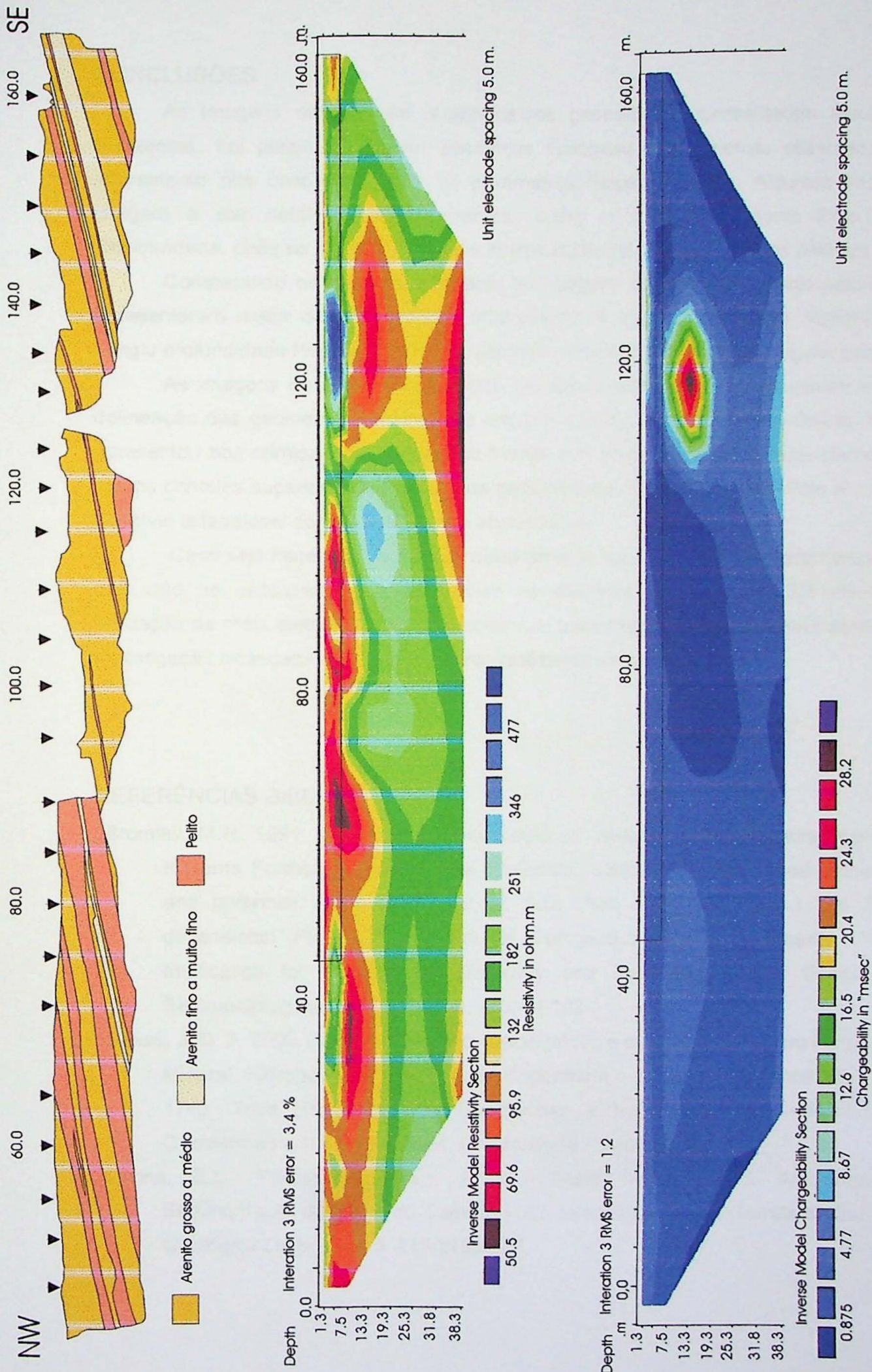


Figura 13 - Seção geológica do perfil, mostrando somente as litologias encontradas. Abaixo estão as seções reais de eletrorresistividade (segunda imagem) e IP (terceira imagem), em arranjo pólo-pólo, após inversão dos dados. O retângulo representa o afloramento.

## CONCLUSÕES

As imagens obtidas nos levantamentos geoeletricos apresentaram resultados excelentes. Foi possivel observar diferencas litologicas e geometrias observadas no afloramento nos contrastes entre os parâmetros físicos medidos. Algumas imagens chegam a dar detalhes impressionantes, como o caso da imagem Pólo-Dipolo Resistividade, onde se observa lentes decimétricas de arenito nas camadas pelíticas.

Comparando os arranjos utilizados, as imagens obtidas com arranjo pólo-dipolo apresentaram maior detalhamento do afloramento. A imagem Pólo-Pólo Resistividade atingiu profundidade investigativa maior, permitindo melhor delineação de alguns canais.

As imagens obtidas com os dados de eletrorresistividade apresentaram melhor delineação das geometrias encontradas em afloramento. A imagem Pólo-Dipolo IP não apresentou boa correspondência com as formas dos corpos, porém delineou claramente alguns contatos superiores, até uma certa profundidade. Na imagem Pólo-Pólo IP não foi possível estabelecer comparação com o afloramento.

Caso seja necessário um maior detalhamento nas investigações, recomenda-se a utilização de espessamento menor entre os eletrodos, por exemplo 2,5 metros, e utilização de mais eletrodos nos levantamentos, para manter a mesma profundidade de investigação alcançada nos levantamentos realizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bromley, M.H. 1991. Variations in fluvial style as revealed by architectural elements, Kayenta Formation, Mesa Creek, Colorado, USA: Evidence for both ephemeral and perennial fluvial processes. *In*: A.D. Miall & N. Tyler (eds.) *The Three-dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and its Implication for Hydrocarbon Discovery and Recovery: SEPM, Concepts in Sedimentology and Paleontology*, v. 3. 94-102
- Gallas, J. D. F. 2000. Principais Métodos Geoeletricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Rio Claro, 174p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Lavina, E.L.; Faccini, M.F.; Pain, P.C.G.; Cesar, A.R.F. 1985. Ambientes de Sedimentação da Bacia do Camaquã. *Ec-paleozóico do Rio Grande do Sul. Acta Geológica Leopoldensia*. 21(9):185-227.

- Loke, M.H. 2001. *Res2dinv Software User's Manual, Ver. 3.4*. Geotomo Software, Penang, Malaysia, 92 pp.
- Maillol, J.M.; Seguin, M.-K.; Gupta, O.P.; Akhauri, H.M.; Sen, N. 1999. Electrical Resistivity Tomography Survey for Delineating Uncharted Mine Galleries in West Bengal, India. *Geophysical Prospecting*. 47(2): 103-116
- Orellana, E. *Prospeccion Geoeletrica en Corriente Continua*. Madrid: Paraninfo 1972, 523 pp.
- Ramirez, A. & Daily, W. 2001. Electrical Imaging at the Large Block Test – Yucca Mountain, Nevada. *Journal of Applied Geophysics*. 46: 85-100.
- Reading, H.G. 1986. Facies. In: H.G. Reading (ed.) *Sedimentary Environmental and Facies 2<sup>nd</sup> edition*. 4-19.
- Reynolds, J.M. 1996. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* Wiley, New York, 796 pp.
- Ribeiro, M.; Bocchi, P.R.; Figueredo, F<sup>o</sup>, P.M.; Tessari, R.I. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul. Rio Grande do Sul. *Boi. Div. Fom. Prod. Min. Bras.*, Rio de Janeiro. 127. 1-232.
- Robertson, J.F. 1966. Revision of Stratigraphy and Nomenclature of Rock Units in Caçapava-Lavras Region. *Notas e Estudos, IG-UFRGS, Porto Alegre*, 1(2): 41-54.
- Storz, H.; Storz, W.; Jacobs, F. 2000. Electrical Resistivity Tomography to Investigate Geological Structures of the Earth's Upper Crust. *Geophysical Prospecting*. 48(3):455-471.
- Tooth, S. 2000. Downstream changes in dryland river channels: the Northern Plains of arid central Australia. *Geomorphology*. 34: 33-54.
- Turnbridge, I.P. 1984. Facies models for a sandy ephemeral stream and clay playa complex; the Middle Devonian Trentishoe Formation of North Devon, UK. *Sedimentology*. 31: 697-716.

