



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**JEFFERSON SOARES FERREIRA**

**NORMALIZAÇÃO DE CANAIS IP PARA A PROSPECÇÃO DE  
FOSFATO DE SALITRE (MINAS GERAIS)**

**BELÉM**

**2009**

**JEFFERSON SOARES FERREIRA**

**NORMALIZAÇÃO DE CANAIS IP PARA A PROSPECÇÃO DE  
FOSFATO DE SALITRE (MINAS GERAIS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lúcia Maria da Costa e Silva

**BELÉM**

**2009**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

553

F383n FERREIRA, Jefferson Soares

Normalização de canais IP para a prospecção de fosfato de salitre (Minas Gerais) / Jefferson Soares Ferreira. – Belém: 2009

66 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica)- Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, Primeiro Semestre de 2009.

Orientador: Profª Drª. Lúcia M. da Costa e Silva

1. Fosfato 2. Complexo salitre. 3. Minas Gerais. I. Título

---

**JEFFERSON SOARES FERREIRA**

**NORMALIZAÇÃO DE CANAIS IP PARA A PROSPECÇÃO DE  
FOSFATO DE SALITRE (MINAS GERAIS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Data de aprovação: \_\_\_/ \_\_\_/ \_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Banca examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Lúcia M. da Costa e Silva – Orientadora  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. José Geraldo das Virgens Alves – Membro  
Mestre em Geofísica  
Universidade Federal da Pará

---

Eng. Elétrico Alberto Leandro de Melo – Membro  
Mestre em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

À Joyce, meus pais e irmãos pela dedicação e amor.

## AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a todos que me apoiaram de forma direta e indireta na realização deste trabalho.

À Professora Dr<sup>a</sup> Lúcia Maria da Costa e Silva, pela orientação e todo trabalho sempre com uma “dose” de incentivo e apoio.

A Fugro-Geomag, pelo suporte técnico. Ao professor Hasui, pelo suporte geológico e estrutural da área.

Aos amigos de trabalho David, Henrique, Andre, muito obrigado pelo apoio técnico e ajuda na obtenção dos dados.

Aos colegas da Pós-Graduação em Geofísica Rodrigo, Frayzer, Catete e Alberto Leandro, pelo apoio e críticas construtivas.

Aos colegas da Graduação em Geofísica Disraeli, Miquéias, Fabricio, Elyston, Hildimir e João Gomes, pelo apoio moral nas horas mais difíceis no decorrer do curso.

À secretária Benildes, pelo apoio incondicional nas horas em que precisei de sua ajuda.

Para finalizar, agradeço a Deus e a minha família, pelo ajuda e suporte todos os dias de minha graduação e de minha vida. Obrigado.

“Observei ainda e vi que debaixo do sol não é dos ligeiros a carreira, nem dos fortes a peleja, nem tampouco dos sábios o pão, nem ainda dos prudentes a riqueza, nem dos entendidos o favor; mas que a ocasião e a sorte ocorrem a todos”

## RESUMO

A pesquisa por fosfato nas últimas décadas tem crescido de forma bastante positiva, pois o seu valor agregado tem possibilitado uma intensa procura por novas áreas que possam ser exploradas. A pesquisa foi realizada em Minas Gerais no município de Patrocínio, no Alvo Área Alagável, é uma tentativa de diminuir a importação de fosfato. Foi feito um estudo geológico e geofísico na área a fim de construir uma mina. O enfoque da pesquisa é a normalização de canais do receptor, ou seja, é uma análise que é feita no decaimento de voltagem. A normalização é obtida utilizando a média dos vinte canais do receptor pela média dos canais iniciais, intermediários e finais. Partindo dessa análise foi possível associar os mapas de carga normalizada, as possíveis fontes geradoras. Também com os perfis identificaram-se pontualmente as variações das normalizações e sua correspondência com a geologia local.

**Palavras-chave:** Fosfato. Complexo Salitre. Minas Gerais.

## **ABSTRACT**

In the last few decades, the search for natural phosphate fertilizer has grown and led to the prospection of new deposits. This work, realized in Patrocínio, Minas Gerais State, is part of a set of studies whose purpose is the implantation of a mine of phosphate to reduce its importation. It leads with the normalization of the decay IP signal obtained through different time windows. Its result allows to associate the cargability maps with sources in different depth.

Keywords: Phosphate. Complex Salitre. Minas Gerais

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1– Média ponderada de parâmetros do levantamento.....	29
Tabela 5.1– Parâmetros resistividade e cargabilidade para o modelo físico.....	32

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Área Alagável.....	16
Figura 2.2 – Cava demonstrando o depósito, com forte presença de foscorito.....	18
Figura 3.1 – Polarização de eletrodo.....	21
Figura 3.2 – Polarização de membrana.....	22
Figura 3.3 Arranjo polo-Dipolo.....	23
Figura 3.4 Arranjo polo-Dipolo.....	24
Figura 3.5 Curva de decaimento.....	25
Figura 4.1 – Área Alagável com as linhas geofísica N-S e E-W.....	29
Figura 5.1 – Pseudo-seção de resistividade aparente obtida com o arranjo polo-dipolo sobre o modelo físico.....	33
Figura 5.2 – Pseudo-seção de cargabilidade aparente obtida com o arranjo polo-dipolo sobre o modelo físico.....	34
Figura 5.3 – Soluções de resistividade e cargabilidade obtidas pela inversão das medidas sintéticas de resistividade e cargabilidade.....	34
Figura 5.4 – Estudo simulando IP Early.....	35
Figura 5.5– Estudo simulando IP Inter.....	36
Figura 5.6 – Estudo simulando IP Late.....	37
Figura 5.7 – Contribuição de $Rz_{Early}$ , em vermelho, $Rz_{Inter}$ , em verde, e $Rz_{Late}$ em azul.....	38
Figura 6.1 – Mapa de isocontornos de cargabilidade média total.....	40
Figura 6.2 – Mapa de isocontornos de resistividade aparente .....	41
Figura 6.3 – Mapa de isocontornos de cargabilidade média dos dez primeiros canais ( $IP_{Early}$ ).....	42
Figura 6.4 – Mapa de isocontornos de cargabilidade média dos canais centrais ( $IP_{Inter}$ ).....	43
Figura 6.5 – Mapa de isocontornos de cargabilidade média dos últimos 10 canais ( $IP_{Late}$ ).....	44

Figura 6.6 – Mapa de isocontornos da razão inicial.....	45
Figura 6.7 – Mapa de isocontornos da razão intermediária.....	46
Figura 6.8 – Mapa de isocontornos da razão tardia RzLate.....	47
Figura 6.9 – Normalização da linha 1.....	48
Figura 6.10 – Normalização da linha 2.....	48
Figura 6.11 – Normalização da linha 3.....	48
Figura 6.12– Normalização da linha 4.....	49
Figura 6.13 – Normalização da linha 5.....	49
Figura 6.14– Normalização da linha 6.....	49
Figura 6.15 – Normalização da linha 7.....	49
Figura 6.16 – Normalização da linha 8.....	49
Figura 6.17– Mapa 3D de cargabilidade com giro de 180°.....	50
Figura 6.18 – Mapa 3D de cargabilidade na direção norte-sul.....	51
Figura 6.19 – Mapa 3D de cargabilidade com o foco na profundidade dos corpos mineralizados.....	51
Figura 6.20 – Bloco 3D de cargabilidade.....	52
Figura 7.1– Mapa de cargabilidade total, que indica os pontos em que foram amostrados com furos de sondagens.....	54
Figura 7.2– Descrição litológica da linha 1.....	55
Figura 7.3– Descrição litológica da linha 2.....	56
Figura 7.4– Descrição litológica da linha 3.....	57
Figura 7.5– Descrição litológica da linha 4.....	58
Figura 7.6– Descrição litológica da linha 5.....	59
Figura 7.7– Descrição litológica da linha 6.....	60
Figura 7.8– Descrição litológica da linha 7.....	61
Figura 7.9– Descrição litológica da linha 8.....	62

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>GEOLOGIA DA ÁREA</b> .....	15
2.1	SEÇÃO GEOLÓGICA DA MINERALIZAÇÃO.....	19
3	<b>O MÉTODO IP</b> .....	21
3.1	ORIGEM .....	21
3.1.1	<b>Polarização de Eletrodo</b> .....	21
3.1.2	<b>Polarização de Membrana</b> .....	22
3.2	MEDIDAS.....	22
3.2.1	<b>Arranjos</b> .....	23
3.2.2	<b>Resistividade e Cargabilidade Aparente</b> .....	24
3.3	PROCESSAMENTO: NORMALIZAÇÃO DE CANAIS.....	26
3.4	INTERPRETAÇÃO .....	27
4	<b>LEVANTAMENTO DE DADOS DE CAMPO</b> .....	28
5	<b>MODELAGEM E INVERSÃO DE DADOS SINTÉTICOS</b> .....	31
5.1	EXPERIMENTO 1.....	31
5.2	EXPERIMENTO 2.....	32
6	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	39
6.1	MAPAS DE ISOCONTORNOS.....	39
6.2	PERFIS.....	48
6.3	MAPAS 3D.....	50
7	<b>RESULTADOS DE FUROS DE SONDAAGEM</b> .....	53
8	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	63
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	66

## 1 INTRODUÇÃO

Conrad Schlumberger na França em 1913 (COLLET, 1990), verificou que, após o corte da injeção de corrente no solo, uma diferença de potencial residual permanecia por um curto período de tempo, fruto de efeito capacitivo provocado na subsuperfície rica em sulfetos, fenômeno conhecido como polarização induzida (IP).

Pesquisadores nas décadas de 50, 60 e 70 empenharam-se no desenvolvimento do método de polarização induzida. (SEIGEL, 1949a) foi o primeiro a utilizar o conceito de cargaabilidade para o efeito capacitivo das rochas e também um dos formuladores da base matemática do método assim como também. (PELTON et al., 1978) também utilizou uma nova abordagem matemática utilizando o modelo de impedância Cole-Cole para estudar o efeito. (MADDEN et al., 1957) e (MARSHALL; CANTWELL 1967) introduziram o conceito que o efeito de IP tem dois tipos de polarização na natureza e são elas: a polarização de eletrodo e a polarização de membrana..

Para representar as diferentes origens tem os sulfetos e as argilas; os primeiros produzem a polarização de eletrodo, enquanto as argilas, por exemplo, a polarização de membrana. Na exploração mineral, é comum a preocupação com a distinção entre esses dois fenômenos, porque a polarização do tipo que as argilas promovem representa para a prospecção geofísica mineral, via de regra, fonte de ruído incorporado aos dados.

O método de polarização induzida (IP) logo mostrou ser o método geofísico mais eficaz em detectar sulfetos disseminados. Entre fins de 1970 e na década seguinte, o IP despontou como uma possível ferramenta de discriminação mineral, já que o decaimento do potencial em laboratório é dependente do mineral o fenômeno IP, contudo, não depende apenas dos minerais existentes na subsuperfície, mas do eletrólito presente e especialmente, textura das rochas influenciam o fenômeno IP (KEEVIL; WARD, 1962). Mesmo que, estudos diversos tenham demonstrado que o fenômeno no campo é dependente preferencialmente da textura da rocha ao invés de seus componentes mineralógicos (PELTON et al, 1978). A aplicação do método, contudo, não está voltada apenas à prospecção mineral. Recentemente, vários trabalhos mostraram que o método é útil também para outros fins, tais como investigações hidrogeológicas e ambientais, além de possibilitar discriminações litológicas (TITOV, 2004).

No presente trabalho há uma tentativa de identificar minério de fosfato (apatita) por meio do método de IP e de estimar a sua profundidade no meio e demais parâmetros de delimitação geométrica da ocorrência de fosfato, além da sua delimitação geométrica. Como

ponto de partida do desafio tem-se a identificação do tipo de polarização responsável pelas anomalias.

O foco principal deste trabalho foi avaliar a metodologia normalização de canais IP, usando dados brutos e sintéticos, visando a utilização rotineira no processamento de dados e possa servir como uma ferramenta a mais na interpretação de dados geofísicos e geológicos.

## 2 GEOLOGIA DA ÁREA

Durante o Cretáceo Superior, o oeste de Minas Gerais foi palco de magmatismo máfico e ultramáfico, potássico a ultrapotássico, que formaram a Província Ígnea do Alto Paranaíba. Uma série de complexos alcalino-carbonatíticos que bordejam a Bacia do Paraná com direção NW-SE se formaram, entre os quais destaca-se aqui o de Salitre. Os complexos alcalino-carbonatíticos da província foram recentemente definidos como ultrapotássicos, pertencentes à associação kamafugito-carbonatito. Petrograficamente consistem de misturas em proporções variáveis de três séries de diferenciação distintas (bebedourítica, foscorítica e carbonatítica), relacionadas muito provavelmente a um mesmo magma primitivo (flogopita picrito).

Há vários minerais de interesse econômico associados aos complexos, entre os quais se destacam fosfatos.

O principal depósito econômico de fosfato ocorre no município de Patrocínio em Minas Gerais, fazendo parte do complexo de Salitre, que é circundado por fenitos decorrentes do metassomatismo das encaixantes quartzíticas. A feição geomorfológica do complexo é um domo semicircular com uma bacia interior de drenagem que converge numa depressão, denominada Área Alagável (Lagoa Campestre) (Figura 2.1).

Quase toda a área é recoberta por uma superfície de lateritização bastante homogênea, inexistindo afloramentos. O solo laterítico tem coloração amarelo escuro, marrom em alguns pontos, com pequenos nódulos limoníticos. Na área é difícil separar o solo laterítico visualmente do solo não laterítico, pois ambos possuem as mesmas características macroscópicas.

Nas topografias mais baixas, ao redor da porção central da AG (Área Alagável) e do Córrego do Bebedouro, canais de dreno da AG ocorrem afloramentos de foscoritos, que se dividem em dois tipos.

O foscorito de maior distribuição areal é uma rocha escura, de aspecto áspero, que lembra afloramentos de canga limonítica e engloba fragmentos e cristais de magnetita fresca, sem nenhuma evidência de transporte. Essa rocha ocorre formando afloramentos e campos de blocos métricos, tombados. É normalmente duro na superfície e, quando quebrado, mostra uma coloração amarelo ocre, freqüentemente com aspecto poroso, exibindo minúsculas cavidades esféricas, o que dá à rocha um aspecto de Pumice. Essas pequenas cavidades são interpretadas como originadas da remoção do mineral apatita, por dissolução. Em superfície essa rocha pode ser descrita como um magnetitito, uma vez que é formada praticamente só por magnetita. Em subsuperfície essa rocha perde muito da sua coesão ficando então bastante friável. Os afloramentos estão parcialmente recobertos nas partes mais altas por solo laterítico transportado e, eventualmente, apresentam contato difuso com as cascalheiras da canga já descrita.

O segundo tipo de foscorito compreende os afloramentos localizados na borda da AG e



Figura 2.1 – Área Alagável.

junto à margem esquerda do Córrego do Bebedouro. Aqui, o principal afloramento forma uma pequena elevação na parte onde o Córrego do Bebedouro sai da AG. Trata-se de afloramentos de foscorito, subtipo nelsonito, que ocorrem entre o solo transportado sob a forma de corpos sem uma forma definida ou sob a forma de corpos mais tabulares, lembrando diques. A rocha é de coloração creme claro, formada principalmente por apatita e magnetita, sendo que esses minerais variam percentualmente quase de ponto a ponto. A flogopita é o acessório mais comum, mas mesmo esse é de rara observação.

Trabalhos recentes mostram a existência de grandes afloramentos de nelsonitos recobertos por densa vegetação, o que dificulta em parte o seu reconhecimento. O corpo principal de nelsonito aflora em uma área de 300x200 m<sup>2</sup> e é formado por um amontoado de blocos de tamanhos variados, indo de centímetros a vários metros. A rocha em superfície tem uma coloração cinza claro, pintalgada de preto, exibindo, freqüentemente, cavidades centimétricas preenchidas por fosfatos secundários, sendo a vavelita um dos mais comuns.

Mais ao sul, a rocha em superfície toma o aspecto de blocos em canga quase negra, muito rica em magnetita, mantendo aqui também, o aspecto poroso em amostras de mão. A sondagem mostrou que este nelsonito está fortemente intemperizado, que o contorno dos afloramentos é fortemente irregular, e os contatos são verticais. Furos executados a 2 m do afloramento encontram passagens de rocha fresca após 20 ou 30 m da superfície. Todos os testemunhos de rocha fresca mostram uma estrutura brechada, muito esporadicamente cortada por vênulas de carbonatito. A silicificação é praticamente inexistente na área.

Os depósitos de Salitre são tipicamente de origem residual, sendo sua gênese ligada a processos intempéricos que agiram sobre rochas carbonatíticas e principalmente silíco-carbonatíticas pertencente ao complexo em questão. O mecanismo dos processos intempéricos e erosivos, que conduzem a diversificações mineralógicas e estruturas zonais nos depósitos gerados, já foram abordados anteriormente. A apatita que aparece disseminada ou semi-concentrada na rocha fresca sofre um processo de concentração por remoção das olivinas e feldspatos pelos processos de intemperismo. A zanação horizontal presente nos diversos depósitos das alcalinas, também é função dos mesmos fenômenos. No caso especial dos carbonatitos, a redução de volume de rocha por ação de intemperismo é de 5:1.

O fosfato ocorre nas formas de apatita (minério principal), florencita, cranadalita, gorcexita, goiazita, etc. (fosfatos complexos de alumínio, bário e terras raras, comumente designadas fosfatos secundários). O titânio ocorre nas formas de anatásio (mineral mais

importante sob o ponto vista econômico), perowskita, ilmenita, magnetita titanífera, titanita, etc.; o anatásio resultou da meteorização da perowskita.

A espessura do manto de intemperismo é bastante variável, sendo que os furos de sondagens mostraram valores desde 5 até 250 m. É claro que a espessura do regolito é função tanto do nível que os processos intempéricos chegaram a atingir, como também a quantidade de matéria carregada pelos processos erosivos. As curvas de contorno estruturais do “bed rock” situam-se entre 850 a 1250 m.



Figura 2.2 – Cava da jazida com lago formado no seu fundo destaca-se a presença de foscorito (no círculo).

Toda a área do domo do Salitre está recoberta por um solo vermelho, de aspecto granular. Esse solo tanto está “in situ”, quanto transportado, sendo que, em superfície é difícil esta separação.

O manto de intemperismo completo é formado por um capeamento de solos vermelhos, mais ou menos espessos, variando de centímetros a vários metros. O aspecto geral é argilo-arenoso, normalmente englobando uma “areia” de magnetita. Esse solo vermelho passa gradualmente a uma cobertura de coloração amarelo ocre com as mesmas características do solo anterior. Esse alterito passa gradualmente a uma rocha fortemente intemperizada, de coloração amarelo ocre, argilosa, sendo freqüentes pequenas passagens de silexitos marrom,

duros. Como componentes dessa rocha, no caso dos bebedouritos, aparecem a magnetita, a flogopita, o anatásio e a apatita.

A passagem para o nível inferior é geralmente gradual e o efeito marcante é a mudança de coloração, que grada do amarelo para o verde. Nessa seção são perfeitamente identificados os tipos de rocha (bebedourito, foscorito, carbonatito, etc.) e seus componentes minerais. Os bebedouritos estão apenas semidecompostos, sem o anatásio, mas pode-se identificar a presença da perowskita; a passagem dessa rocha semi-alterada para a rocha fresca é geralmente brusca, sendo a faixa de transição centimétrica. Quando a rocha subjacente é um foscorito, o manto de alteração geralmente é preto, pouco argiloso, muito rico em magnetita e apatita, inconsolidado na maioria das vezes. O solo de alteração de carbonatito (raros) é quase sempre de coloração amarelo ocre e essa identificação só é possível com o auxílio de furos de sonda.

Como particularidade da área Salitre, a sondagem revelou estruturas tipo “dolinas”, preenchida por um capeamento de turfa negra depositado sobre sedimentos argilosos. Esses sedimentos têm cores que vão do amarelo pálido ao cinza. Esses depósitos sedimentares têm forma aproximada circular e podem alcançar espessuras de 130 m, sendo fruto da diluição e remoção de rochas carbonatíticas ou foscoríticas por águas subterrâneas, que formam um sistema complexo de cavernas. A sondagem executada na área mostra a presença dessas cavernas a profundidades que variam de 50 a 120 m sendo que algumas têm mais de 10 m de espaço vazio. O abatimento desse sistema de cavernas provoca o aparecimento de dolinas na superfície que, posteriormente, são assoreadas por sedimentos argilosos e turfa.

## 2.1 SEÇÃO GEOLÓGICA DA MINERALIZAÇÃO

Na zona de bebedouritos, o condicionamento do perfil é o clássico de todos os depósitos similares. Há um enriquecimento de apatitas como consequência da solubilização e remoção de minerais pretéritos, como os piroxênios e carbonatos. A redução de volume de rocha provoca o enriquecimento em apatita, que se comporta como um mineral insolúvel, permanecendo praticamente estável durante o processo intempérico. Nesses casos há uma formação expressiva de argilo minerais no perfil de intemperismo e a distribuição da mineralização comporta-se como segue.

a – Faixa superficial – aloteritas – praticamente sem mineralizações econômicas. Há presença de fosfatos secundários, principalmente de ferro e alumínio.

b – Faixa intermediária – isalteritas – zona onde está concentrada praticamente toda a apatita econômica.

c – Faixa basal – rocha alterada – zona onde a rocha está intemperizada, mas ainda não houve remoção notável dos minerais originais. Nessa zona pode haver concentração econômica, mas, de uma forma geral, os teores são baixos, entre 5 e 7%  $P_2O_5$ .

d – Rocha fresca – normalmente sem teores econômicos.

No que se refere aos foscoritos, particularmente aos nelsonitos, o perfil intempérico apresenta particularidades bastante diferentes e notáveis, a seguir descritas.

a – Faixa superficial – isalteritas estéreis – aqui não existe aloterita.

b – Faixa intermediária – Isalterita mineralizada – faixa extremamente rica em apatita e magnetita, inconsolidada. O “contato” da zona mineralizada com o capeamento estéril é praticamente pontual. A mineralização começa bruscamente.

c – Rocha fresca – normalmente o contato do nelsonito com a rocha subjacente é muito brusco (cerca de 5cm).

### 3 MÉTODO IP

#### 3.1 ORIGEM

A condução eletrolítica é a principal forma pela qual a corrente elétrica flui na subsuperfície quando não existe ou existe em pequena quantidade de minerais metálicos. Portanto, é necessária que a rocha apresente certa porosidade efetiva que permita o fluxo de corrente eletrolítica. Nos poros da rocha pode, contudo, existir materiais que geram o fenômeno IP, por meio de duas espécies de efeitos eletroquímicos, conhecidos como polarização de eletrodos e polarização de membrana

##### 3.1.1 Polarização de Eletrodo

Quando alguma partícula ou mineral metálico está presente no poro da rocha preenchida por fluido com íons, ocorre o fenômeno conhecido como polarização de eletrodo. Na superfície da partícula metálica, sob a ação de um campo elétrico, a passagem de corrente elétrica se transforma de iônica para eletrônica, isto é, do eletrólito para a partícula metálica (Fig. 3.1) (WARD 1990).

Como consequência, surge uma concentração de íons nos lados opostos do mineral metálico, em outras palavras a partícula fica polarizada. Essa polarização desaparece e a partícula retoma seu estado inicial de equilíbrio depois do corte abrupto a injeção de corrente

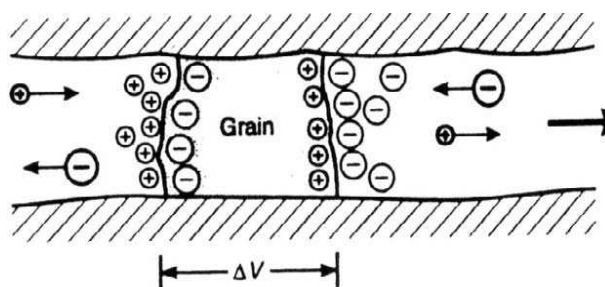


Figura 3.1 – Polarização de eletrodo  
Fonte: TELFORD, (1976).

elétrica, contudo, não é imediata e necessita de um tempo para retornar ao equilíbrio, fornecendo informações sobre a subsuperfície. Como o fenômeno ocorre nas superfícies dos grãos minerais, o método IP é útil na investigação de mineralização disseminada (TELFORD, 1976).

### 3.1.2 Polarização de Membrana

Dentro dos poros geralmente existe uma rede de minerais (argila) com carga negativa

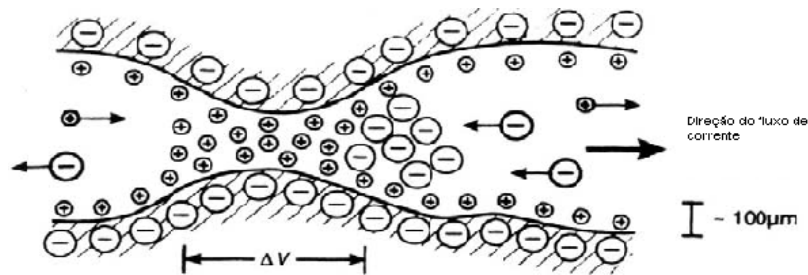


Figura 3.2 – Polarização de membrana. Cargas/íons: + positiva, - negativa  
Fonte: TELFORD (1976).

fixados na parede, numa interface rocha e fluido com íons (Fig. 3.2). Assim, os cátions são atraídos e os ânions repelidos a partir da interface, formando zonas com concentração de cátions. Sob a ação de um campo elétrico externo a zona de concentração de cátions passa a bloquear a passagem da corrente transportada pelos íons. Essa situação demora a desaparecer mesmo após a retirada do campo elétrico. Assim, surge uma sobretensão residual que pode ser medida durante aquisições de IP.

### 3.2 MEDIDAS

Os levantamentos com o método IP exigem a injeção de corrente por meio de dois eletrodos de corrente A e B e a medição da resposta é realizada por meio de dois eletrodos de potencial M e N após cessada a corrente (levantamento no domínio do tempo) ou variando-se

a frequência (levantamento no domínio da frequência). Os eletrodos podem ser dispostos segundo vários arranjos, entre os quais se destacam os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo, ambos arranjos em que os eletrodos são dispostos linearmente.

### 3.2.1 Arranjos

O arranjo dipolo-dipolo ou duplo dipolo possui igual distância entre os eletrodos de corrente e entre os eletrodos de potencial, sendo o espaçamento entre os eletrodos de corrente e de potencial mais centrais ao arranjo um múltiplo da distância usada entre os pares de eletrodos AB e MN (Fig. 3.3). O estágio de investigação cresce com o aumento do espaçamento.

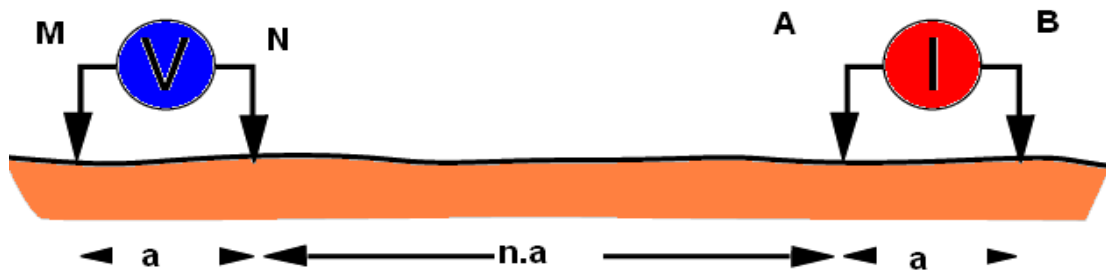


Figura 3.3 – Arranjo dipolo-dipolo

No arranjo polo-dipolo, também chamado de tripolo, um dos eletrodos de corrente fica fixado a uma distância muito grande em relação aos outros três eletrodos. Com o arranjo Polo-Dipolo, apesar do bom acoplamento dos eletrodos e da boa penetração de corrente no solo, o corpo é polarizado assimetricamente, o que produz anomalia IP mais difícil de ser interpretada.. A profundidade alcançada com o arranjo pólo-dipolo é algo do que aquela investigada com o arranjo dipolo-dipolo.

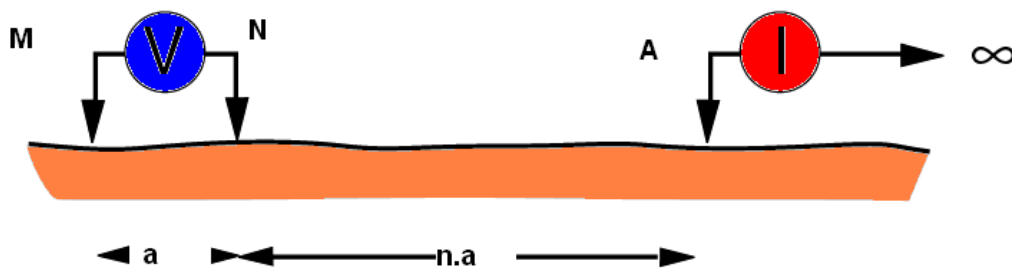


Figura 3.4 – Arranjo polo-dipolo.

### 3.2.2 Resistividade e Cargabilidade Aparentes

Os levantamentos de IP incluem o registro da corrente injetada  $I$  e da diferença de voltagem entre os eletrodos de potencial  $V_{MN}$ , por conseguinte, a resistividade aparente  $\rho_a$  é dada por meio de:

$$\rho_a = k \frac{V_{MN}}{I} \quad (\text{ohm.m}), \quad (1.1)$$

em que  $k$  é o fator geométrico dependente do arranjo.

O fenômeno de IP guarda analogia com a resposta de um circuito elétrico formado por uma resistência e um capacitor (circuito RC) série/paralelo (Fig 3.3).

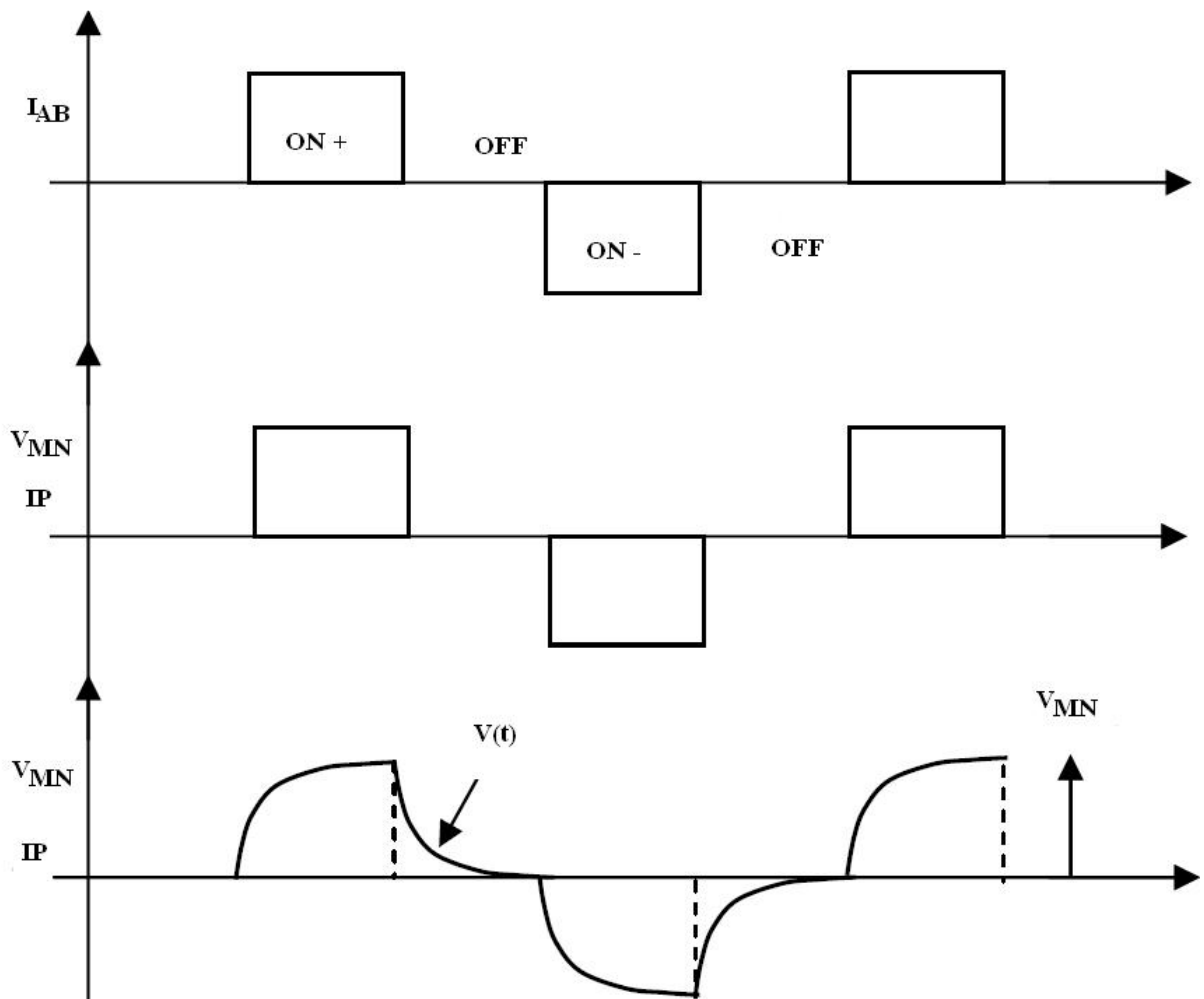


Figura 3.5 – Corrente de saída (a), voltagem de saída (b) e a curva de decaimento IP (c).

Fonte: IRIS INSTRUMENTS (2003)

A curva de decaimento ou relaxamento do efeito IP depende de vários fatores, por exemplo, textura da rocha matriz, soluções e minerais presentes, já mencionado anteriormente. No entanto, para uma mesma ocorrência mineral, a hipótese que a curva de decaimento possa ajudar na interpretação pode ser testada.

Os primeiros equipamentos de IP calculavam a área total sobre a curva de decaimento normalizada, o que é denominado cargabilidade global. No entanto, a capacidade da subsuperfície de se carregar devido ao fluxo da corrente injetada pode ser mais apropriadamente analisada a partir da amostragem da curva de decaimento em diferentes janelas ou canais de tempos  $i$ , ou seja,

$$M_i = \frac{1}{TM_i} \frac{\int_{t_{iniciali}}^{t_{finali}} V dt}{V_{MN}}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1.2)$$

em que  $M_i$  é a cargabilidade parcial do canal  $i$ ,  $TM_i$  representa o comprimento da janela de tempo do canal  $i$ ,  $V$  é a diferença de potencial entre os tempos inicial e final da janela  $i$  e  $V_{MN}$  é a diferença de voltagem ao final do pulso de corrente.

A cargabilidade global média  $M_g$ , por sua vez, é dada por:

$$M_g = \frac{\sum_{i=1}^j M_i \cdot TM_i}{\sum_{i=1}^j TM_i}, \quad i = 1, 2, \dots, j, \quad (1.3)$$

sendo  $j$  o número de canais.

### 3.3 PROCESSAMENTO: NORMALIZAÇÃO DE CANAIS

Com equipamentos mais novos, a curva de decaimento pode ser amostrada em vários canais ou se obter a média de um conjunto de janelas, o que fornece com maior exatidão a reconstrução da forma da curva de decaimento, que é informação mais valiosa, pois se modifica com a variação de parâmetros geológicos. Por exemplo, o ELREC-PRO (IRIS INSTRUMENTS 2003), permite trabalhar com até 20 canais.

O tempo de decaimento é inversamente proporcional ao conteúdo de frequências presentes na resposta IP (SUMNER 1976). As janelas imediatamente após o final do pulso de corrente são, portanto, ricas no conteúdo de alta frequência da resposta IP, enquanto as janelas próximas ao final da curva de decaimento contêm predominantemente a resposta IP de baixas frequências. Com o advento de equipamentos de campo de grande precisão, deduções da informação espectral a partir dos dados no domínio do tempo têm voltado a ser alvo de investigações recentes que incluem combinações de respostas obtidas com diferentes canais por exemplo, (SOGADE et al. 2006).

Aqui, vamos destacar a sugestão de David Smith (comunicação oral) em trabalhar com as razões para os canais iniciais  $RZ_{\text{Early}}$ , intermediários  $RZ_{\text{Inter}}$  e finais  $RZ_{\text{Late}}$ , dadas por:

$Rz$

$$RZ_{\text{Early}} = \frac{IP_{\text{Early}}}{IP_{\text{Avg}}}, \quad (1.4)$$

$$RZ_{\text{Inter}} = \frac{IP_{\text{Inter}}}{IP_{\text{Avg}}} \quad (1.5)$$

$$e \quad RZ_{\text{Late}} = \frac{IP_{\text{Late}}}{IP_{\text{Avg}}}, \quad (1.6)$$

em que  $IP_{\text{Early}}$ ,  $IP_{\text{Inter}}$  e  $IP_{\text{Late}}$  correspondem às médias de cargabilidade detectadas por canais iniciais, intermediários e finais, respectivamente, e  $IP_{\text{Avg}}$ , é igual à cargabilidade média  $M_g$  dada pela equação (1.3).

### 3.4 INTERPRETAÇÃO

A interpretação convencional utiliza o mapa de cargabilidade média total e da resistividade aparente. Procurados, via de regra, são valores de cargabilidade. A normalização apresentada nas equações 1.4 a 1.6, feita com a cargabilidade média parcial de grupos de canais pela cargabilidade média total dos canais do receptor, enfatizada conteúdos espectrais diversos.

Existem programas diversos que permitem a interpretação pelo método direto bem como pelo método inverso, este último com a informação a priori de suavidade entre os parâmetros adjacentes.

#### 4 LEVANTAMENTO DE DADOS DE CAMPO

O levantamento de IP na Área Alagável foi executado pela equipe da Fugro-Geomag, no período de 15 de novembro a 4 de dezembro de 2007. Neste levantamento foram utilizados dois tipos de arranjos, Polo-Dipolo e Dipolo-Dipolo, com espaçamento de 60 m. Foram levantadas três linhas em direção N-S e cinco linhas na direção E-W, sendo que as linhas E-W tem espaçamento entre si de 400 m e as linhas N-S, de 600 m. A fig. 4.1 mostra as linhas do levantamento realizado e as linhas de contorno representando a topografia da região; na cota mais baixa, em verde, aparece a AG (Área Alagavel), os pontos marcados no mapa indicam os furos de sondagens com seus respectivos nomes.

O levantamento foi realizado com sistema no domínio do tempo, compreendendo o transmissor VIP 4000 e o receptor ELREC-PRO, ambos fabricados pela Iris Instruments. O ELREC-PRO, como anteriormente mencionado, permite trabalhar com até 20 canais, sendo que o número de janelas depende do tempo de injeção de corrente no meio e do tipo de amostragem. Os parâmetros que o aparelho possui são:

- Tempos de injeção de corrente de 500 ms, 1s, 2s, 4 s e 8 s e.
- Modo de amostragem IP aritmético, semi-logarítmico, logarítmico Cole-Cole e programável Iris Instruments (2003).

Foram utilizados três eletrodos de corrente, feitos de aço inoxidável de uma polegada de diâmetro por um metro de comprimento a fim de minimizar a resistência de contato e ainda utilizado solução salina em cada estação de medida. Os eletrodos de potencial são de coberto acondicionado em vasilhames de porcelana (semipermeável) com solução de sulfato de cobre. Nas partes alagadas, os eletrodos de corrente e de potencial foram colocados dentro de um tubo de pvc, afim isolar os mesmos dentro da AG

Algumas características quanto à qualidade dos dados, seguem na tabela abaixo, com a média dos parâmetros usados nos levantamentos de polarização induzida.

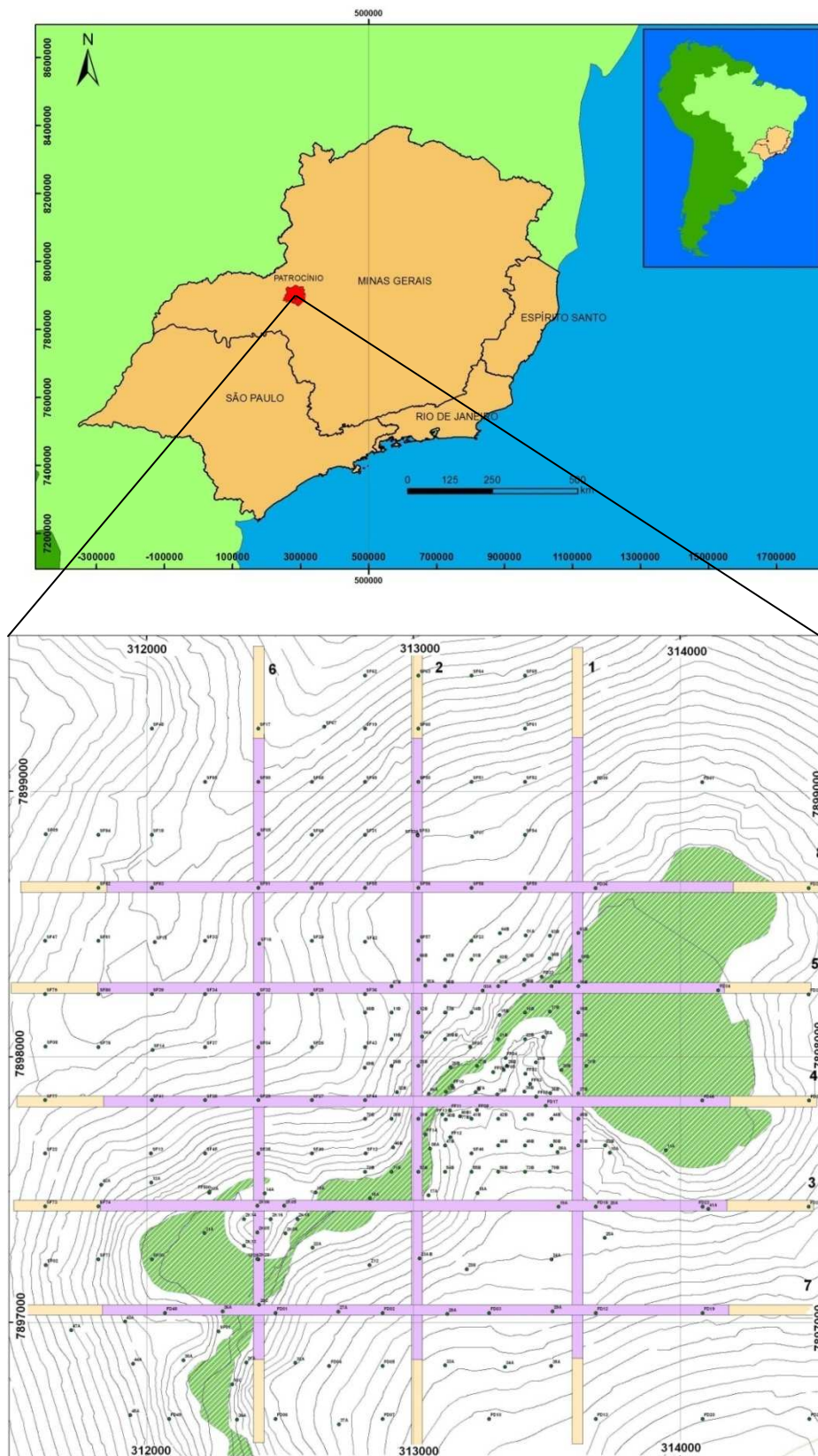


Figura 4.1 – Área Alagável (AG) localizada no município de Patrocínio, Minas Gerais. As três linhas N-S e as cinco linhas E-W levantadas com IP. A topografia da área é representada pelas curvas de nível. Cortesia geólogo Rodolfo Barbosa.

Tabela 4.1 – Média ponderada de parâmetros do levantamento.

Erro M: desvio padrão do valor de cargabilidade. Ciclos: quantidade de medidas para se obter uma leitura.

Rs: resistência de contato. I: corrente injetada. V: diferença de potencial primária

Erro M	Ciclos	Rs (kOhm)	I (Amp)	Vp (mV)
2,43	9,89	7,97	1,29	411,6

## 5 MODELAGEM E INVERSÃO DE DADOS SINTÉTICOS

Tanto para modelar como para realizar a inversão dos dados foi usado o software EarthImager 2D da empresa AGIUSA (licença da Fugro-Geomag), que emprega a técnica de elementos finitos.

### 5.1 EXPERIMENTO 1

A seção geológica revelada por furos de sondagem mostrou os seguintes horizontes:

- (a) faixa superficial com solos residuais maduros tipo coluvionares de cor vermelha (aloteritos) – sem mineralização econômica;
- (b) faixa intermediária com solos saprólitos de cor ocre ou cinza (isalteritos) – onde ocorre quase toda a apatita econômica com a formação expressiva de argilo minerais que, entre outros, produzem anomalias de IP;
- (c) faixa basal (rocha alterada) – ainda com minerais originais, podendo ter interesse econômico, e
- (d) rocha fresca – com baixos teores de minerais de valor econômico, mas com fraturas que podem estar preenchidas por soluções ou argilo-minerais e minerais como a magnetita, a pirrotita e a pirita, todos geradores dos fenômenos de IP.

Com base na seção geológica, o modelo de resistividade e cargabilidade terão três horizontes, aloterito, isalterito e rocha fresca. O foco principal do trabalho é delimitar os horizontes geológicos: aloterito, isalterito e rocha fresca como também testar a normalização dos canais do receptor como metodologia que possa ajudar nessa separação

Os parâmetros do modelo geológico são reunidos na tabela 5.1: Eles foram eleitos com base em medidas de campo obtidas com o método IP e a geologia correspondente, mas ainda assim são valores assumidos aproximados.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram, em sua porção superior, as pseudo-seções de, respectivamente, resistividade e cargabilidade aparentes que seriam obtidas sobre o modelo

mostrado na porção inferior da figura. O eixo horizontal representa a linha que teria sido medida no campo e o eixo vertical, a profundidade. Tanto a resistividade como a cargabilidade crescem do azul para o vermelho.

A fig. 5.3 mostra tanto a solução de resistividade como a de cargabilidade obtidas pela inversão das medidas sintéticas mostradas na porção superior das fig. 5.1 e 5.2, respectivamente. Estes resultados são tanto melhores quanto mais semelhantes forem

Tabela 5.1 – Parâmetros de resistividade e cargabilidade para o modelo físico.

MODELOS	RESISTIVIDADE		CARGABILIDADE	
	$\rho$ ohm.m	Côr	M mV/V	Côr
Aloterito	100	verde	10	azul marinho
Isalterito	1000	laranja	15	azul
Rocha fresca	2000	vermelho	50	verde

A solução para o modelo físico de resistividade (acima, na fig. 5.3) mostra uma leve assimetria e é a sua porção central a mais semelhante do modelo (abaixo, na figura 5.1). A solução para o modelo de cargabilidade (abaixo, na figura 5.3), por sua vez, é mais assimétrica, mas a semelhança da porção central com o modelo (abaixo na figura 5.2) é maior do que no caso anterior. Em decorrência do vínculo da suavidade, as interfaces que separam aloterito, isalterito e rocha fresca tornam-se gradativas. No campo, contudo, as interfaces podem não ser tão bruscas, como as do modelo físico sintético mostrado nas porções inferiores das figuras 5.1 e 5.2.

## 5.2 EXPERIMENTO 2

Para simular o resultado que seria obtido com a inversão dos dados de campo após normalização, foram construídos modelos que enfatizam as respostas das fontes geradoras nos níveis mais rasos de investigação, nos níveis intermediários e também nos níveis mais profundos, correspondentes, respectivamente, aos sinais no espectro de alto, intermediário e baixo conteúdo de frequências. A cargabilidade do corpo é de 50 mV/V e a do meio 21,1 mV/V. O arranjo é o polo-dipolo com espaçamento de 60 m. É simulada a topografia da AG.

As figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram os resultados obtidos. Na parte superior dessas figuras aparece uma pseudo-seção de dados sintéticos de carga aparente, no meio a solução obtida com a inversão retratar, por se tratar do modelo físico gerador dos dados sintéticos.

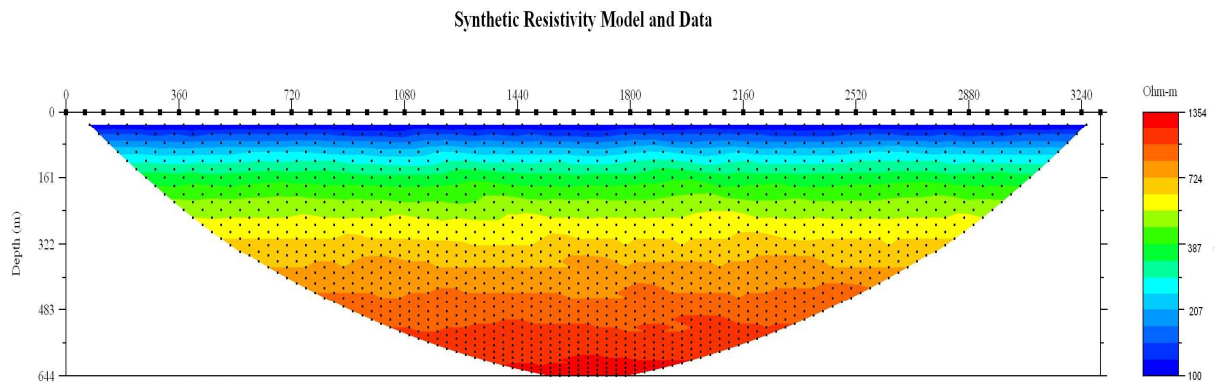


Figura 5.1(a) – Pseudo-seção de resistividade aparente obtida com o arranjo polo-dipolo.

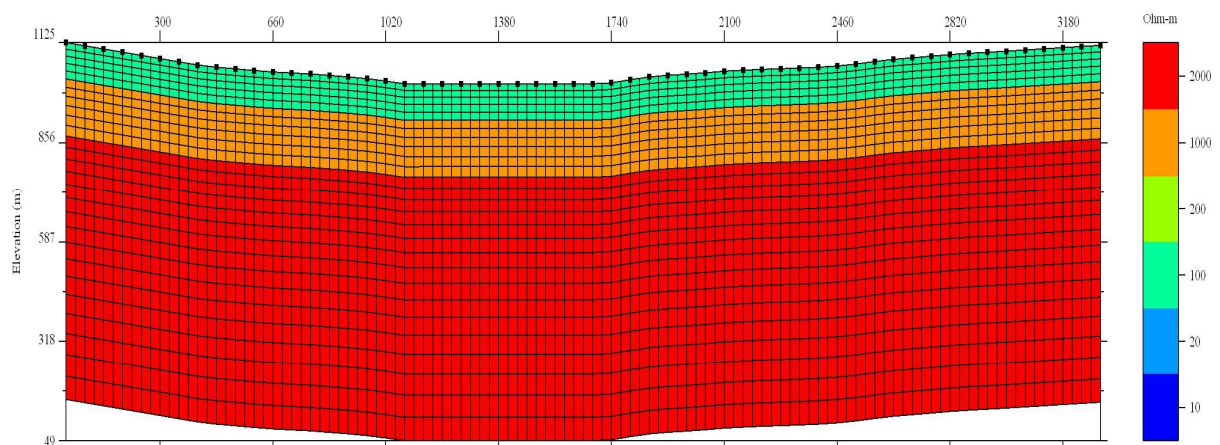


Figura 5.1 (b) – Arranjo pólo-dipolo sobre o modelo físico.

Synthetic Chargeability Model and Data

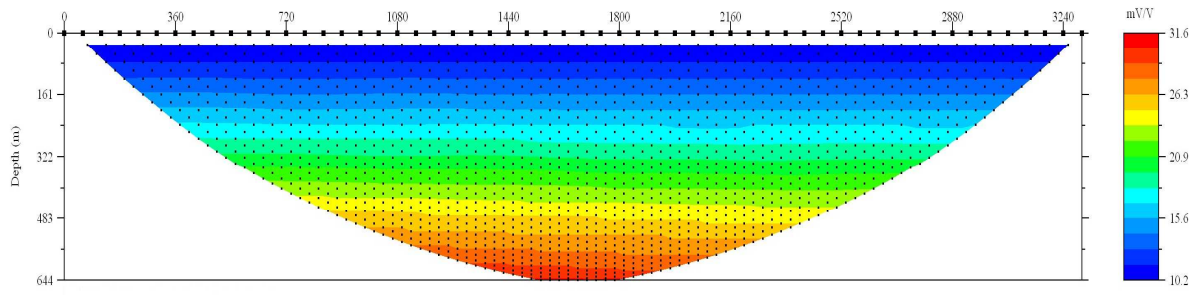


Figura 5.2 (a) – Pseudo-seção de cargabilidade aparente obtida com o arranjo polo-dipolo

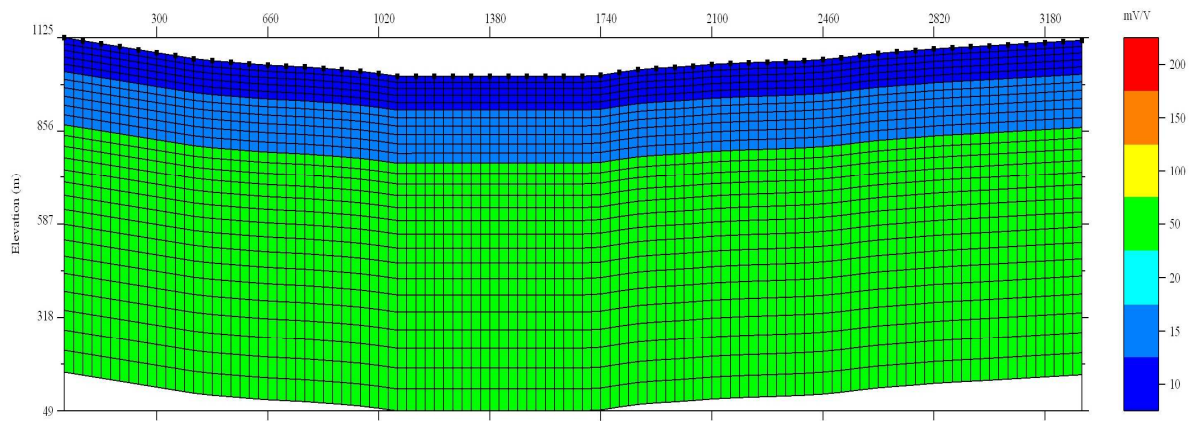


Figura 5.2 (b) – Arranjo polo-dipolo sobre o modelo físico.

### IP Survey Planner Results

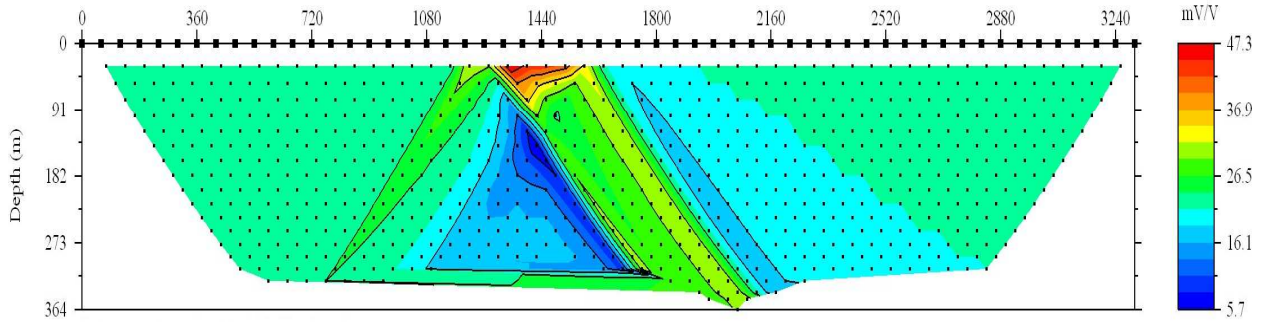


Figura 5.4 (a) – Estudo simulando IP Early, pseudo-seção de cargabilidade aparente obtida com o arranjo polo-dipolo.

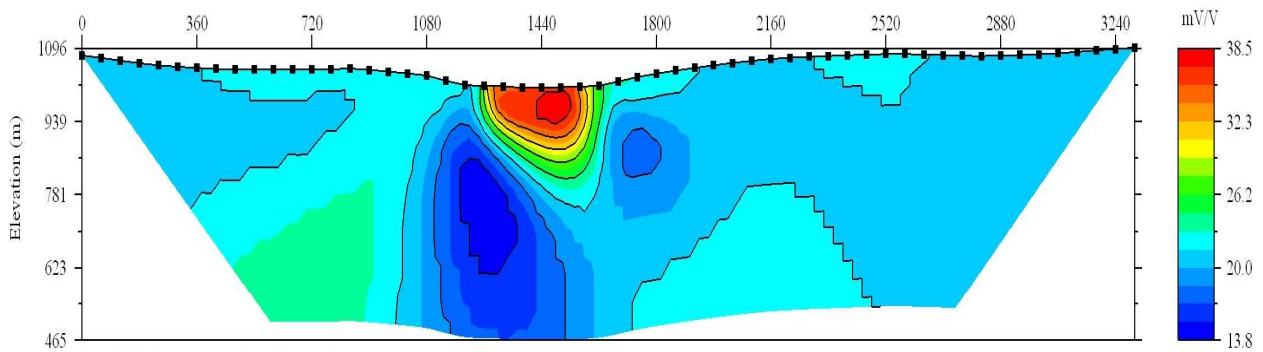


Figura 5.4 (b) – Solução de cargabilidade obtida pela inversão da cargabilidade aparente.

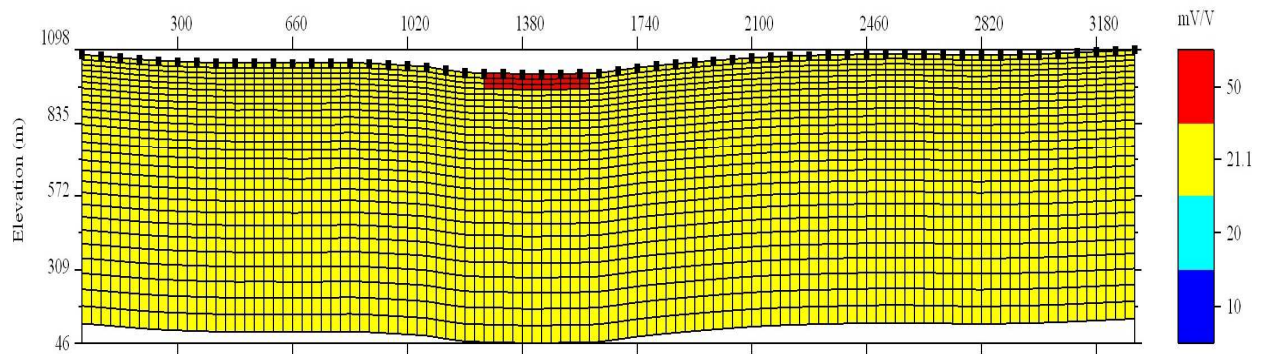


Figura 5.4 (c) – Modelo físico de cargabilidade gerador da pseudo-seção

### IP Survey Planner Results

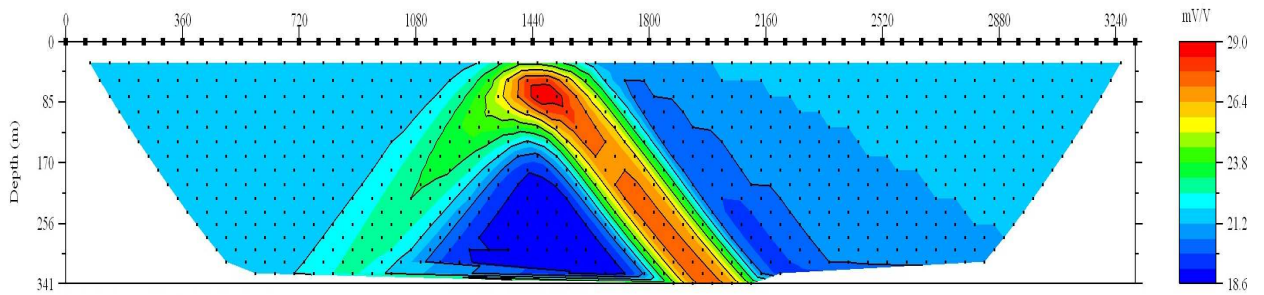


Figura 5.5 (b) – Solução de cargabilidade obtida pela inversão da cargabilidade aparente.

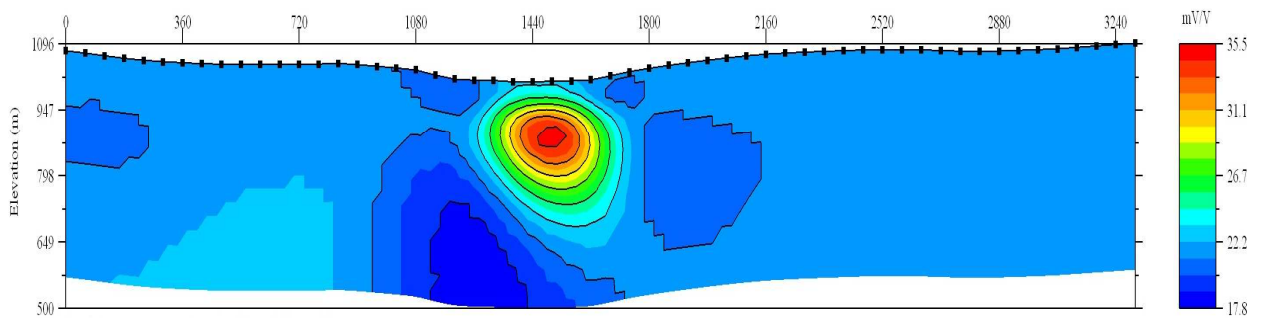


Figura 5.5 (a) – Estudo simulando IP Inter, pseudo-seção de cargabilidade aparente obtida com o arranjo polo-dípolo.

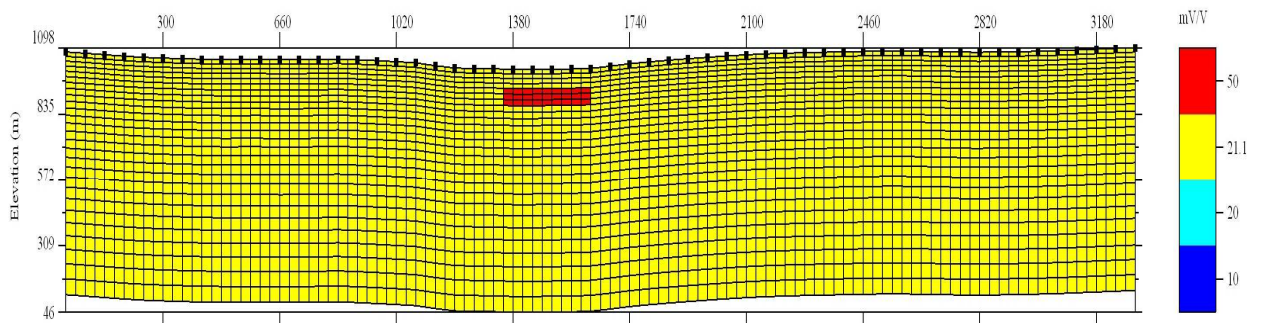


Figura 5.5 (c) - Modelo físico de cargabilidade gerador da pseudo- seção

### IP Survey Planner Results

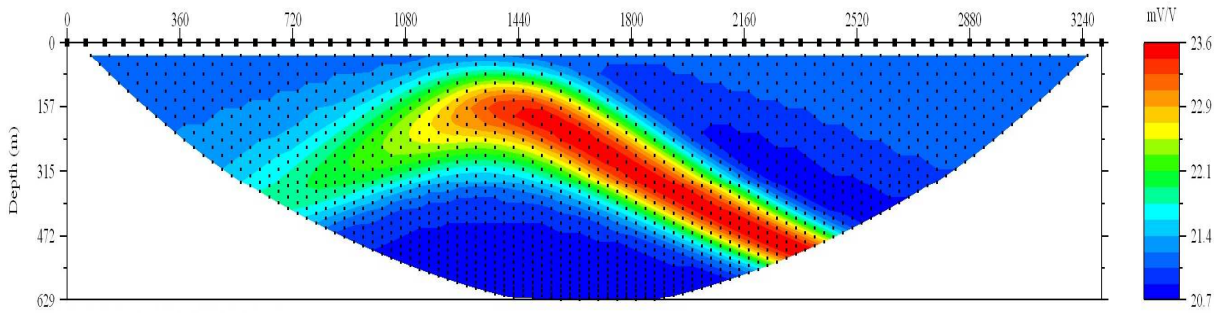


Figura 5.6 – Estudo simulando IP Later. Pseudo-seção de cargabilidade aparente obtida com o arranjo polo-dipolo

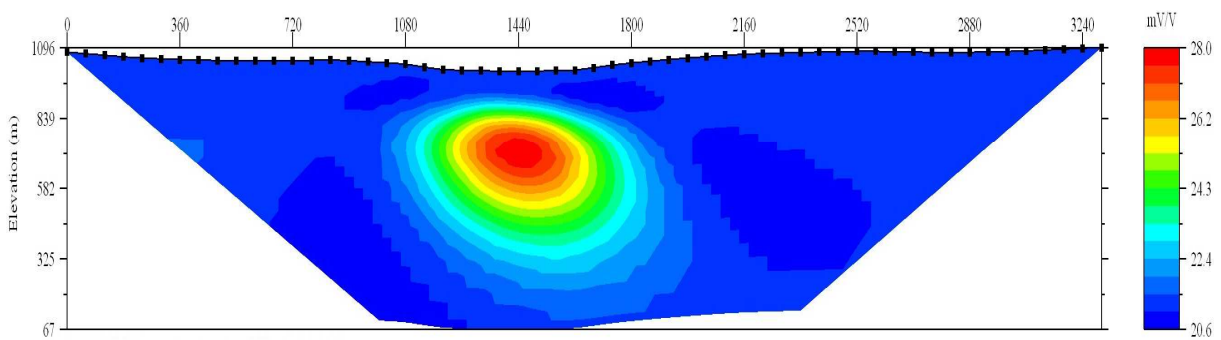


Figura 5.6 (b) - Solução de cargabilidade obtida pela inversão da cargabilidade aparente.

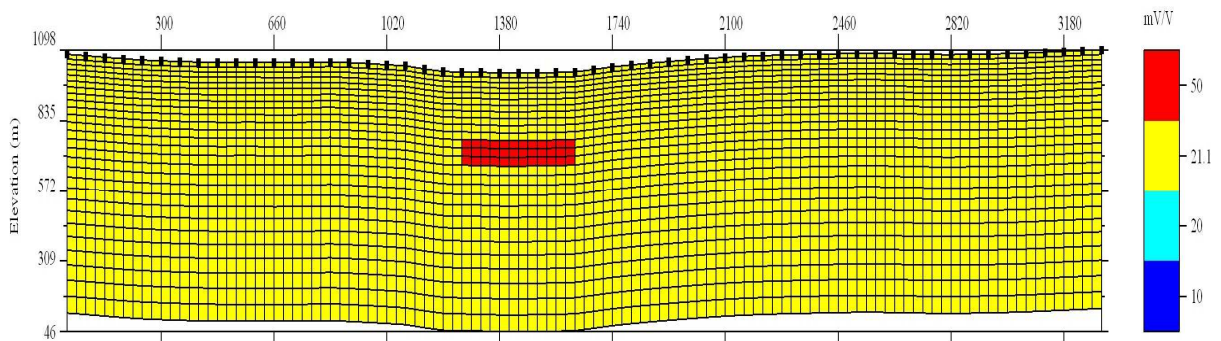


Figura 5.6 (c) - Modelo físico de cargabilidade gerador da pseudo- seção.

O conjunto de figuras mostra que a solução da inversa detecta o alvo, nas diferentes profundidades, mas a sua delineação não é possível porque a informação a priori é a de suavidade entre os parâmetros das células contíguas da malha que representa o modelo físico, enquanto alvo e encaixante possuem contraste abrupto..

A figura 5.7 mostra a contribuição de cada grupo de janela na resposta IP. O eixo dos x indica a posição das estações de medidas. O eixo y, o valor da normalização. Em vermelho é mostrada  $Rz_{Early}$ , em verde,  $Rz_{Inter}$  e, em azul,  $Rz_{Late}$  (equações 1.4, 1.5 e 1.6, respectivamente).

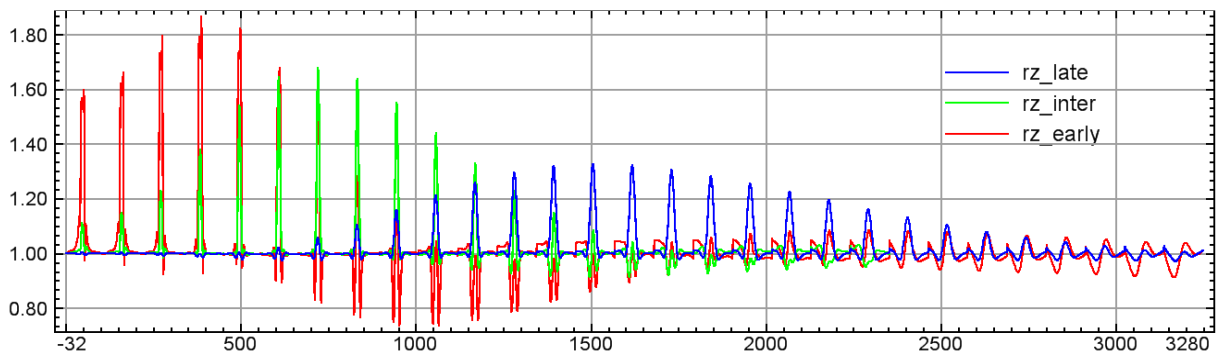


Figura 5.7 – Contribuição de  $Rz_{Early}$ , em vermelho,  $Rz_{Inter}$ , em verde, e  $Rz_{Late}$  em azul.

O eixo x representa as estações de medida ao longo de uma linha, o eixo y representa a amplitude do sinal medido.

## 6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 MAPAS DE ISOCONTORNOS

O programa usado para a apresentação gráfica dos dados foi o OSAIS MONTAJ da Geosoft (licença FUGRO-Geomag).

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam os mapas de isocontornos de cargabilidade média relacionada a todos os canais de amostragem da curva de decaimento da voltagem ( $IP_{Avg}$ ) e a resistividade aparente, respectivamente.

As figuras 6.3, 6.4 e 6.5, mostram os mapas de isocontornos de cargabilidade média dos dez primeiros canais, dos dez canais centrais e dos dez últimos canais de amostragem da curva de decaimento IP, respectivamente.

Finalmente, as figuras 6.6, 6.7 e 6.8 reúnem os mapas de isocontornos da normalização da cargabilidade média dos canais iniciais, centrais e finais, respectivamente, pela cargabilidade global média, ou seja, na ordem, as razões inicial, intermediária e tardia.

A cargabilidade média global e as parciais, o resultado da normalização e a resistividade crescem do azul para vermelho.

Todas as figuras construídas com base na cargabilidade e na resistividade mostram valores altos na direção NW-SE. A exceção ocorre com o mapa da razão inicial, que indica que nas zonas mais rasas, a cargabilidade é maior a E-SW.

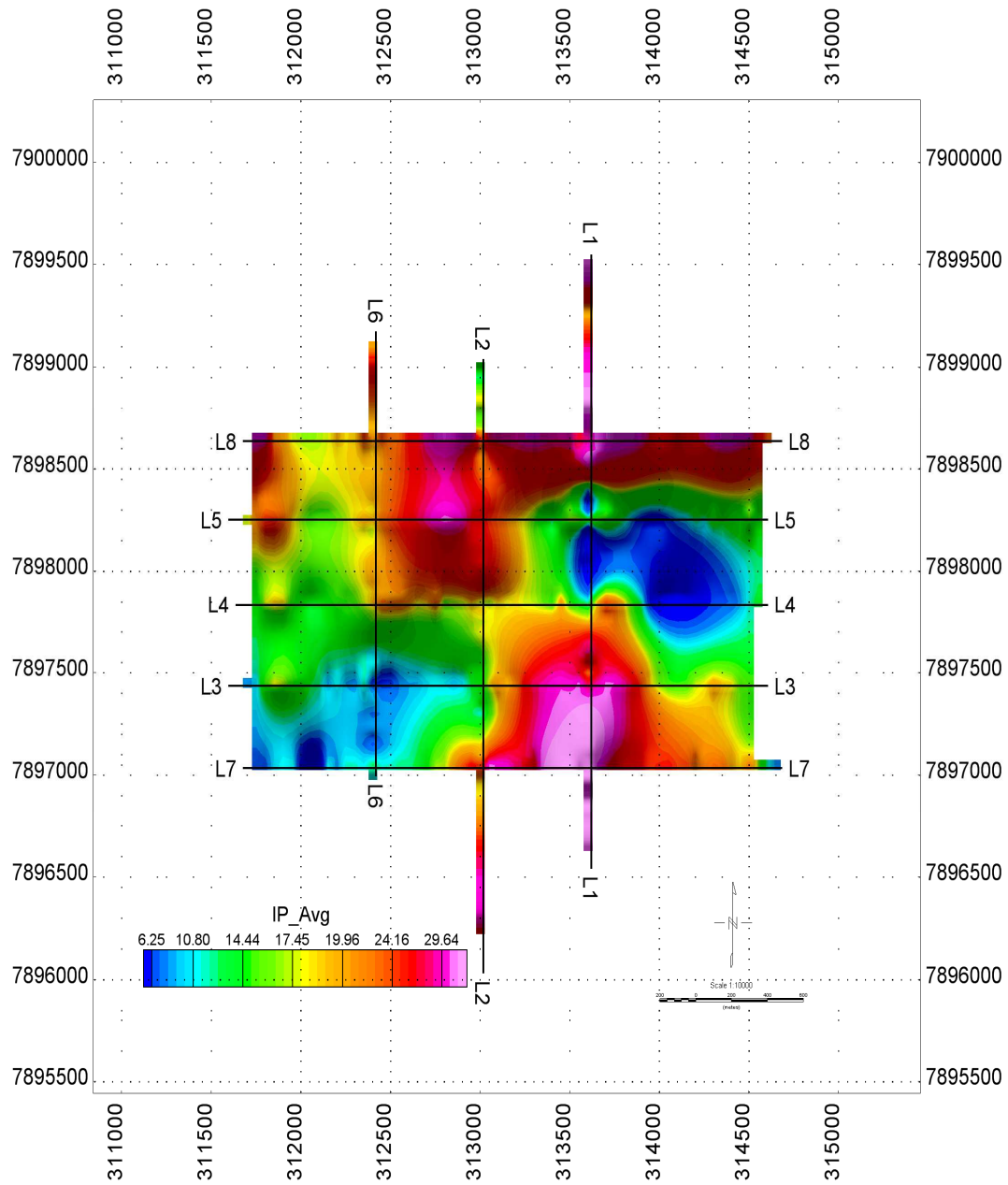


Figura 6.1 – Mapa de isocontornos de cargabilidade média (IP\_Avg).

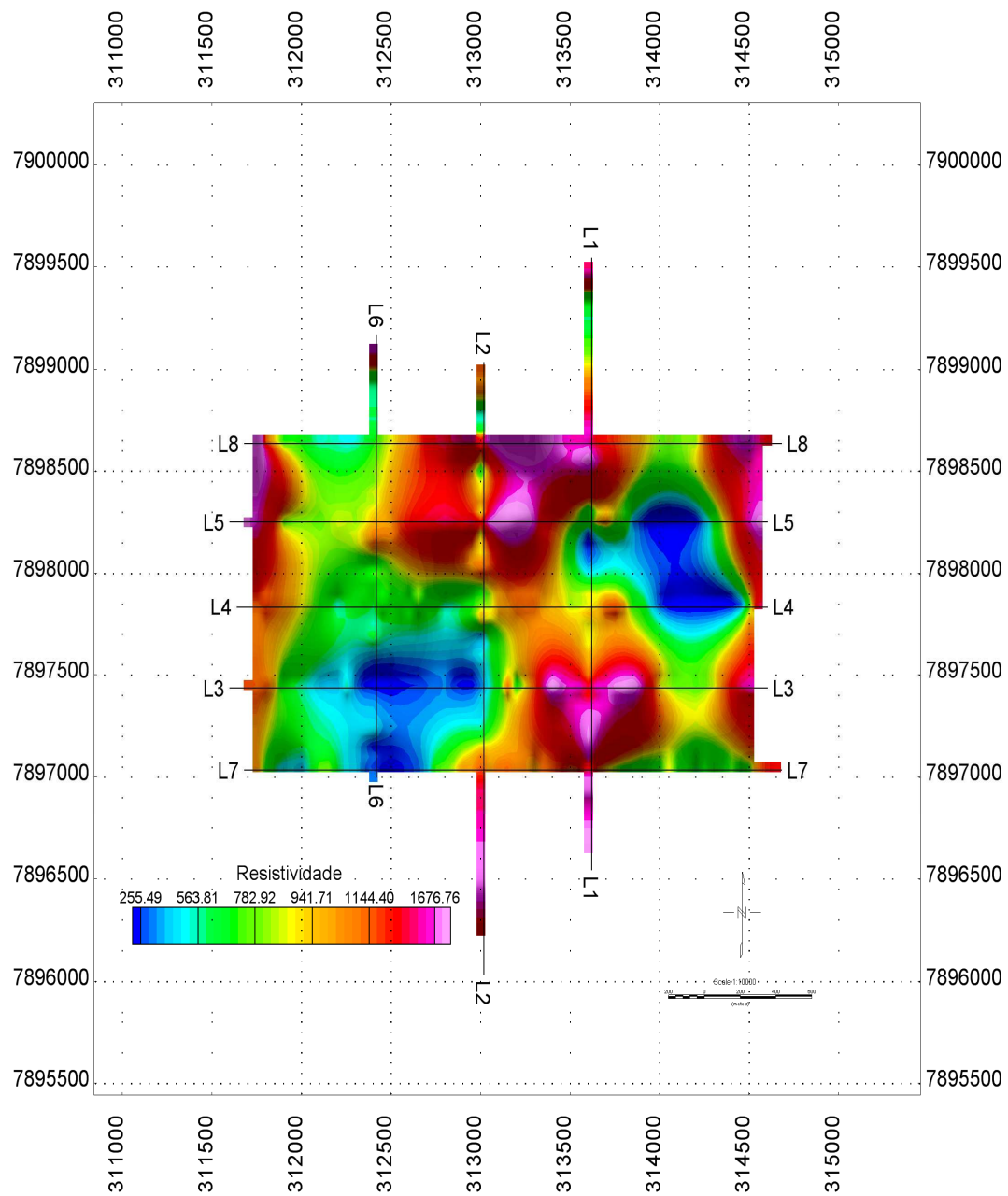


Figura 6.2 – Mapa de isocontornos de resistividade aparente ( $\rho_a$ ).

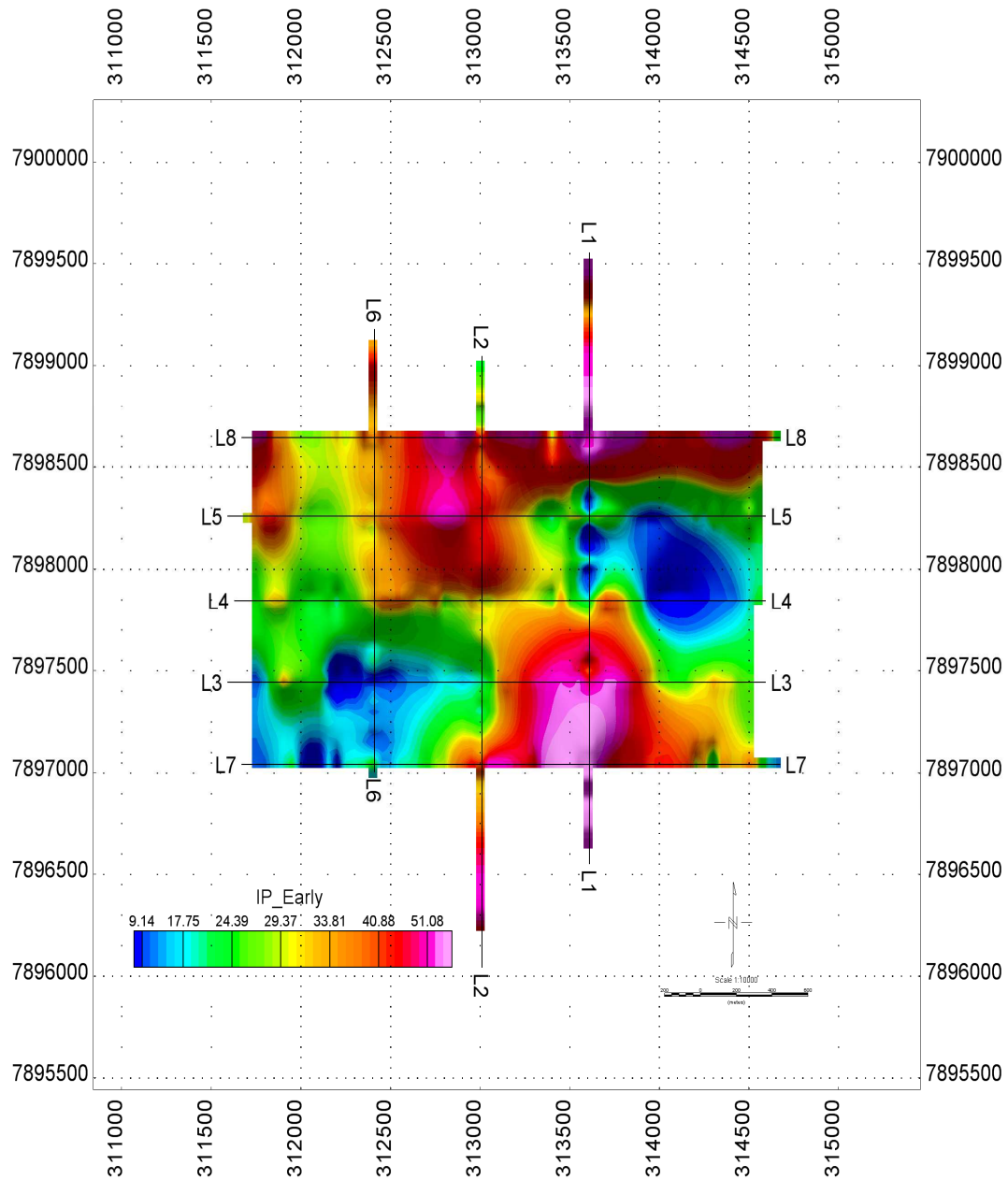


Figura 6.3 – Mapa de isocontornos de carga média dos dez primeiros canais ( $IP_{Early}$ ).

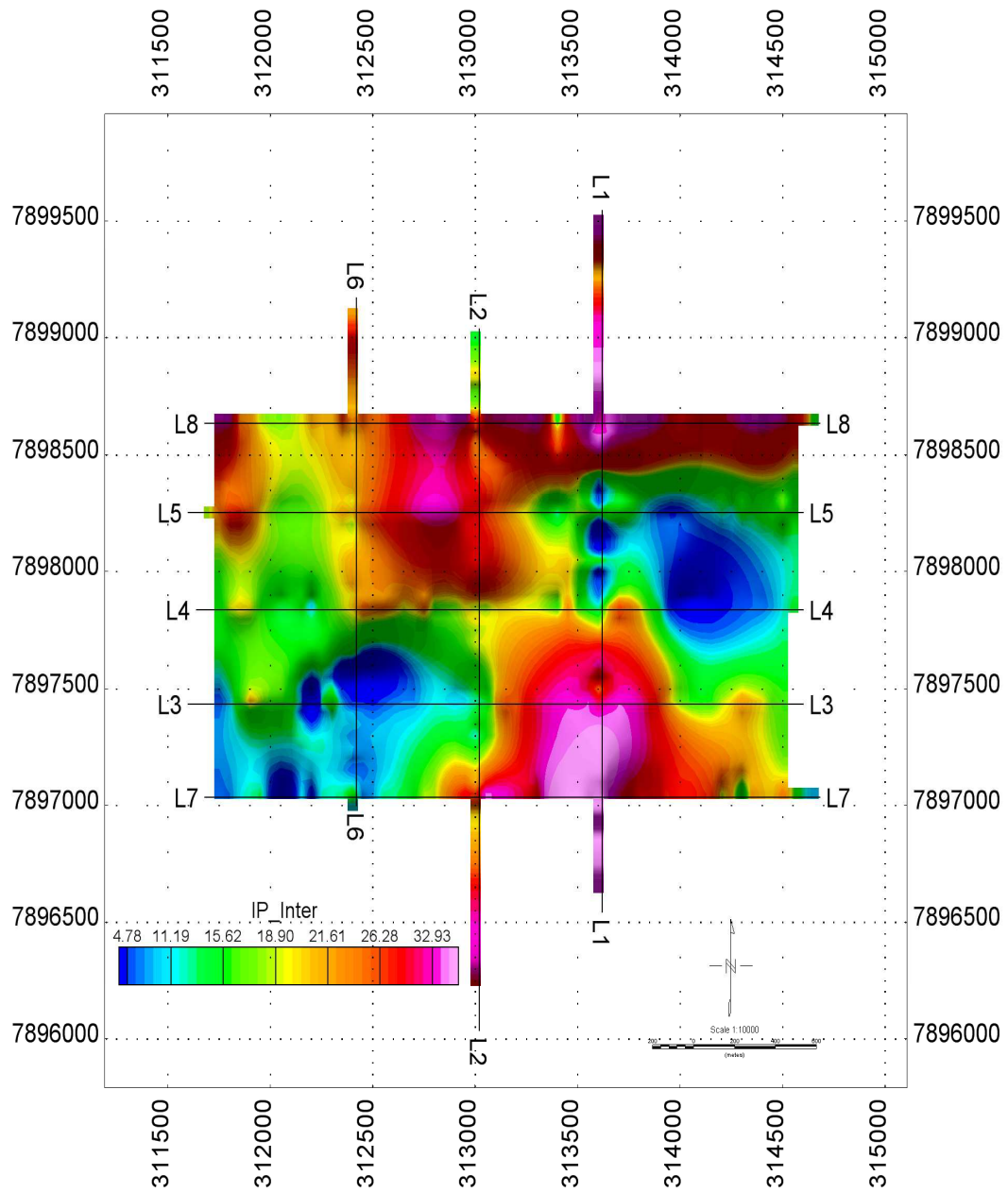


Figura 6.4 – Mapa de isocontornos de capacidade média dos canais centrais (IP<sub>Inter</sub>).

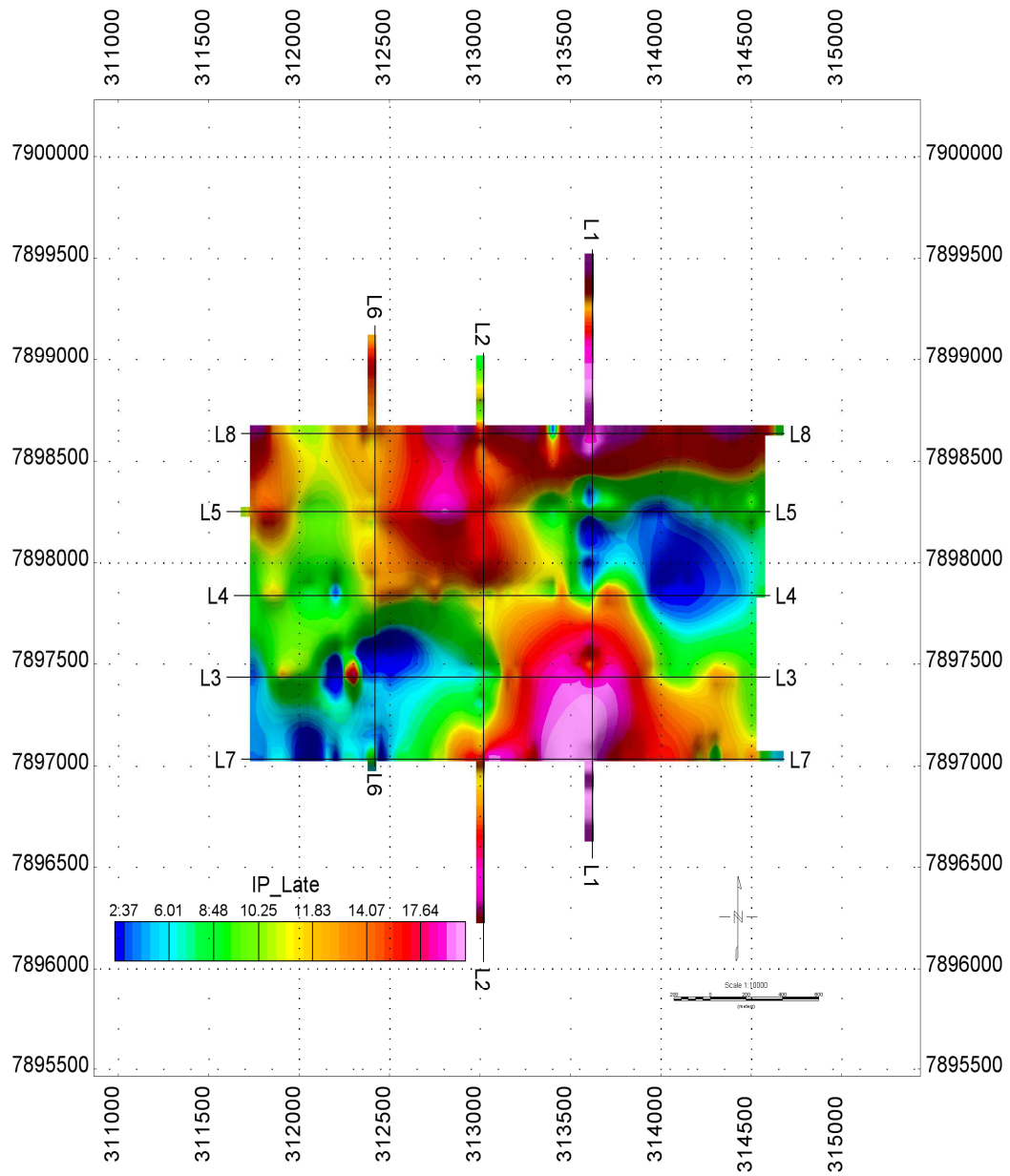


Figura 6.5 – Mapa de isocontornos de carga média dos últimos 10 canais ( $IP_{Late}$ ).

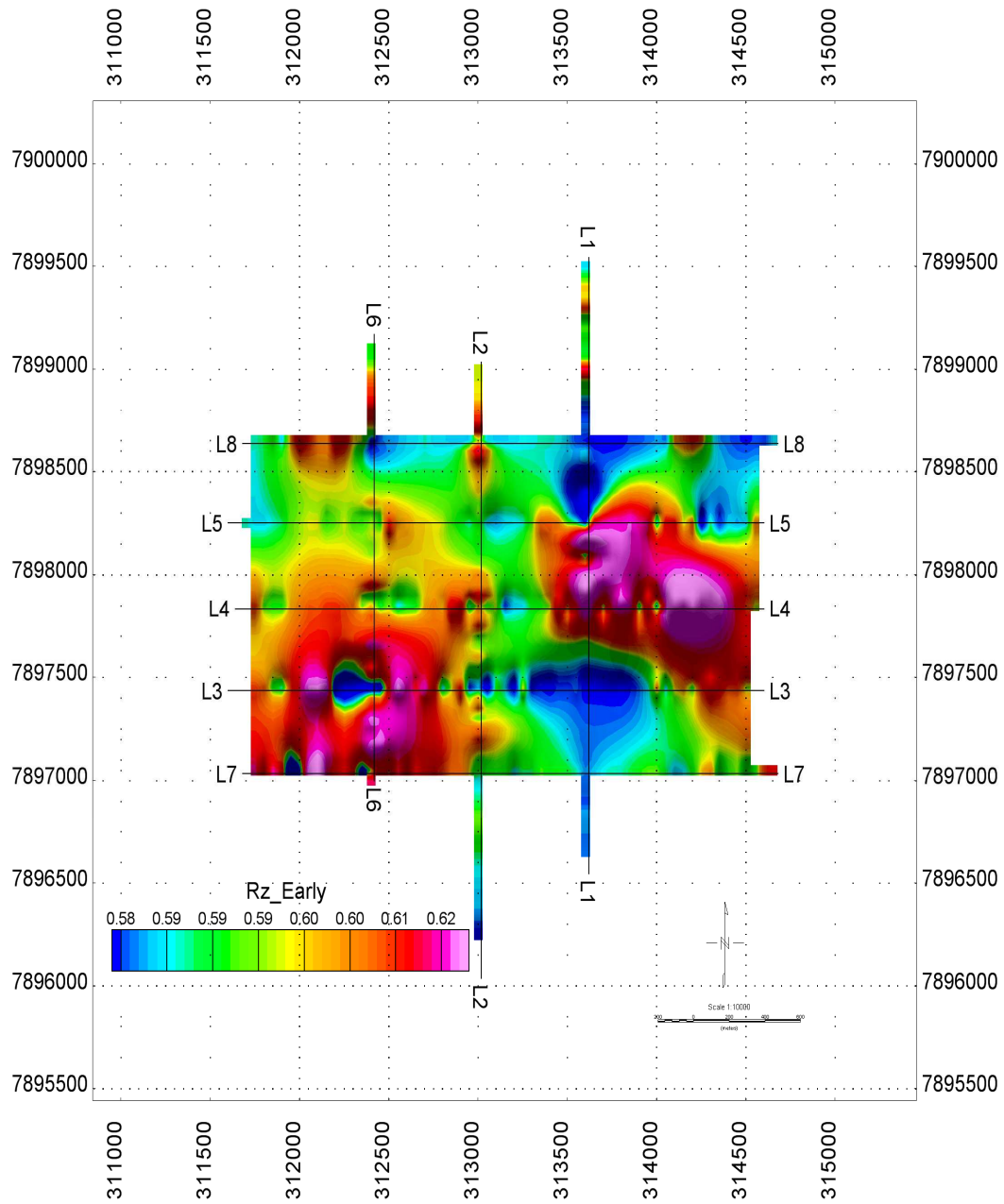


Figura 6.6 – Mapa de isocontornos da razão inicial ( $Rz_{Early} = IP_{Early} / IP_{Avg}$ ).

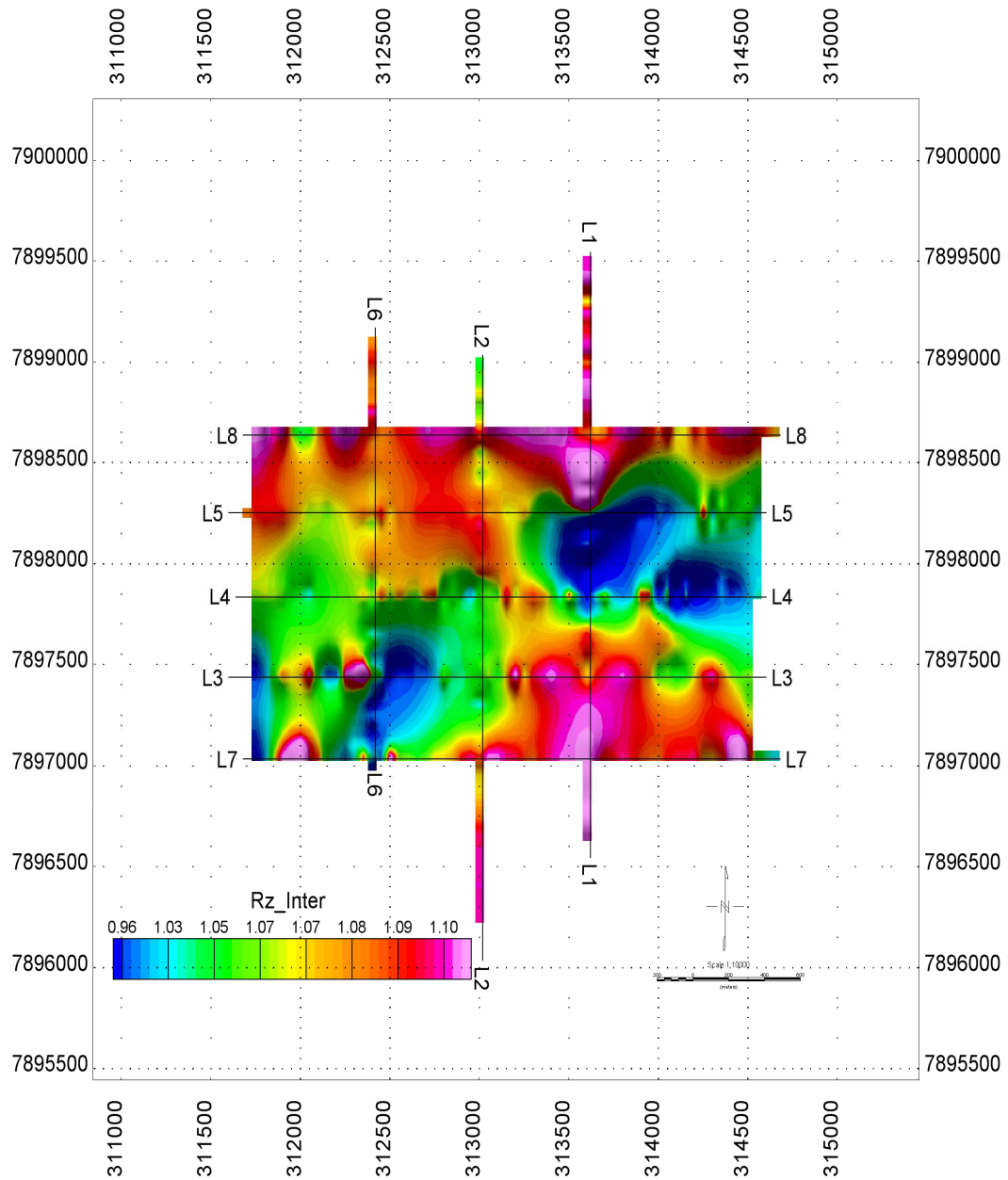


Figura 6.7 – Mapa de isocontornos da razão intermediária ( $Rz_{Inter} = IP_{Inter} / IP_{Avg}$ ).

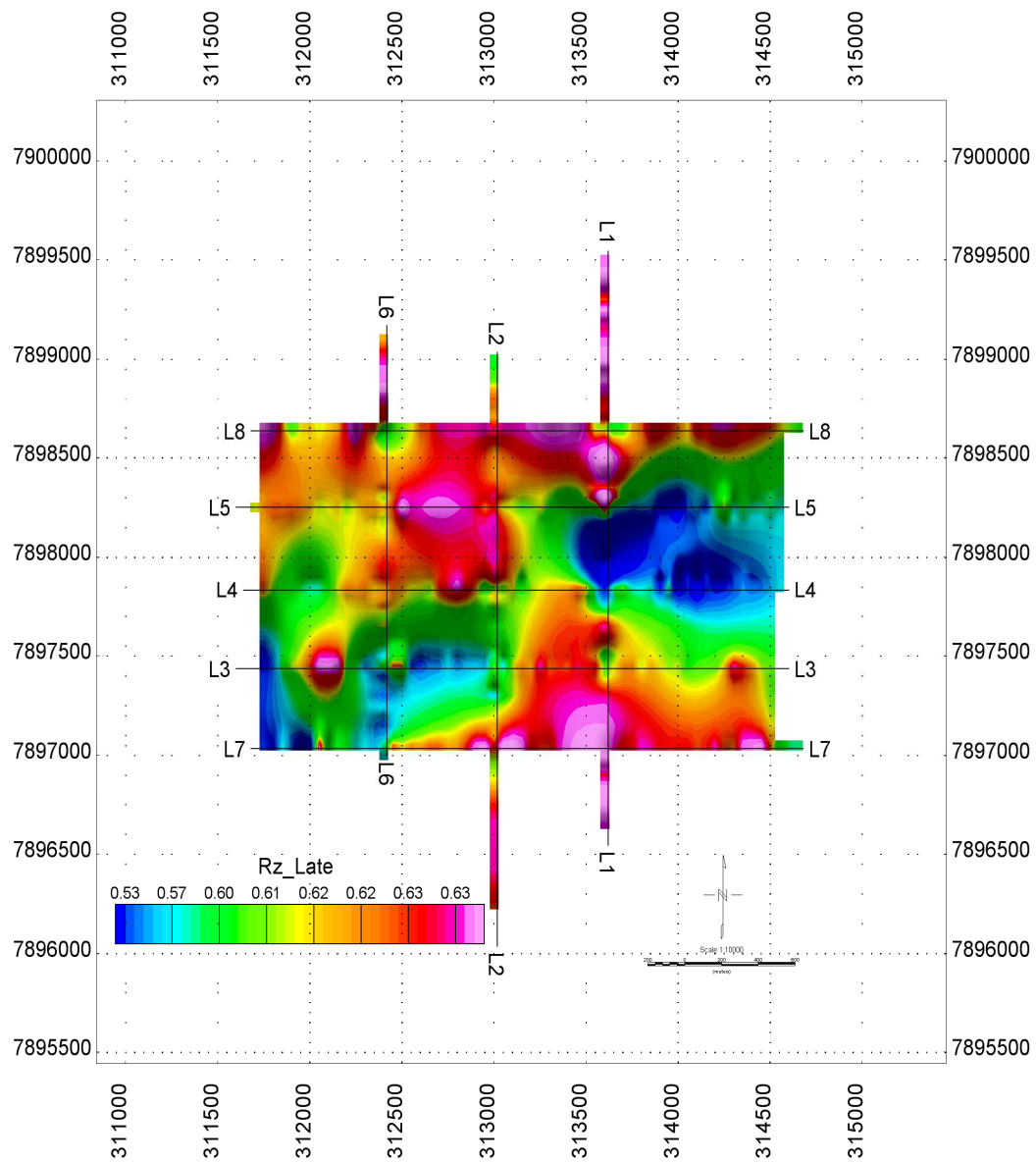


Figura 6.8 – Mapa de isocontornos da razão tardia  $Rz_{Late}$  ( $IP_{Late} / IP_{Avg}$ ).

## 6.2 PERFIS

A maior influência da normalização é indicada pelos perfis de cargabilidade  $Rz_{Early}$ ,  $Rz_{Inter}$  e  $Rz_{Late}$  de cada uma das oito linhas levantadas, mostrados, respectivamente, em verde, azul e vermelho nas figuras de 6.9 a 6.16. Comparando-se todos os perfis, é possível verificar que, em geral, é o perfil de  $Rz_{Late}$  que possui valores anômalos mais significativos do que as demais.

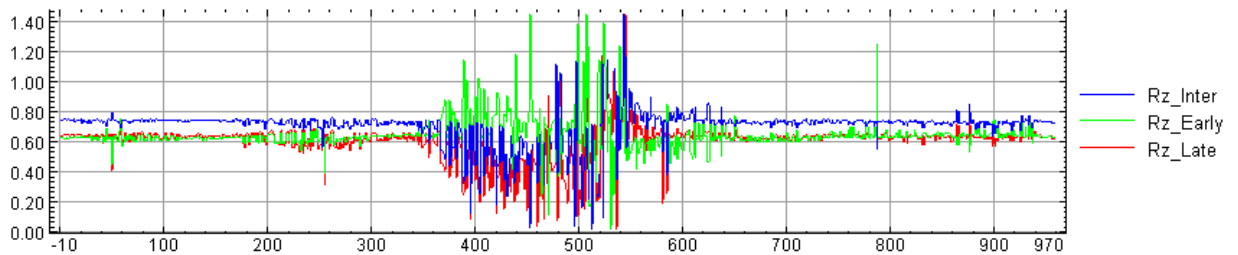


Figura 6.9 – Normalização da linha 1. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

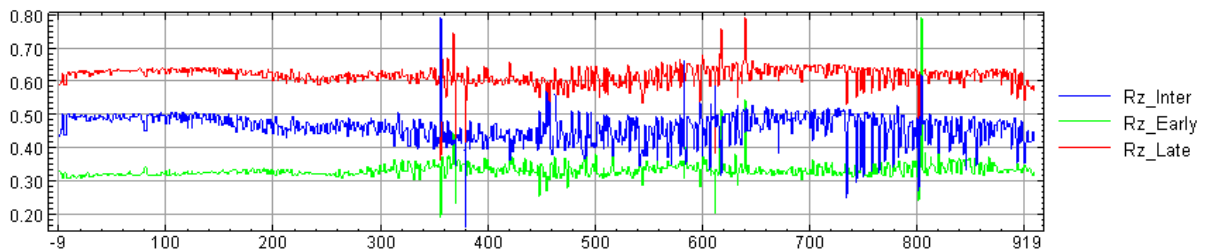


Figura 6.10 – Normalização da linha 2. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

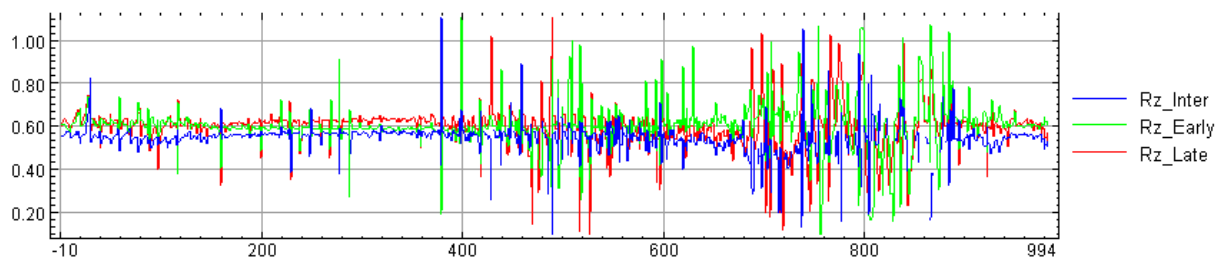


Figura 6.11 – Normalização da linha 3. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

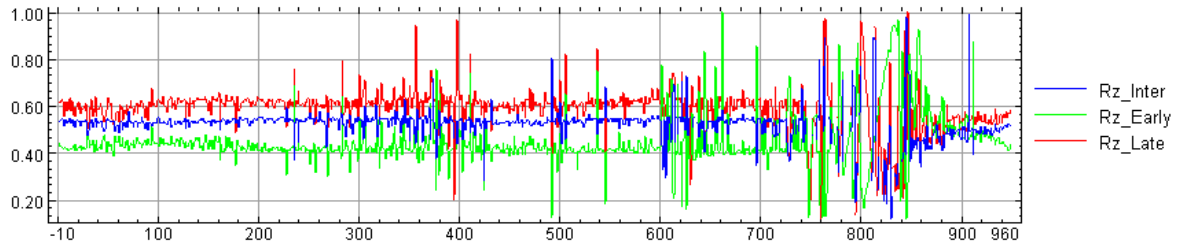


Figura 6.12 – Normalização da linha 4. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

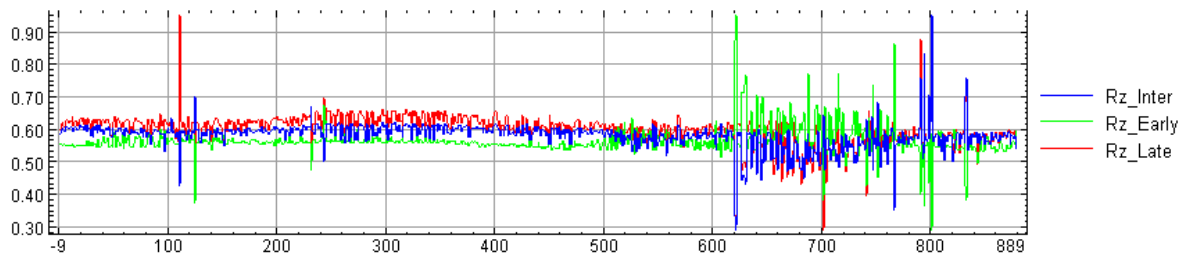


Figura 6.13 – Normalização da linha 5. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

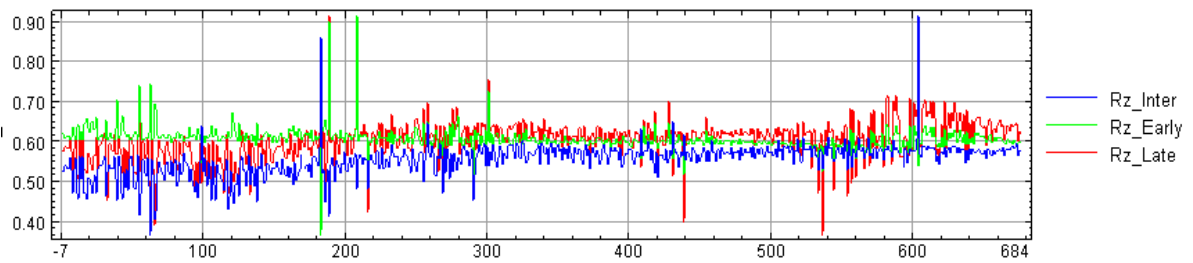


Figura 6.14 – Normalização da linha 6. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

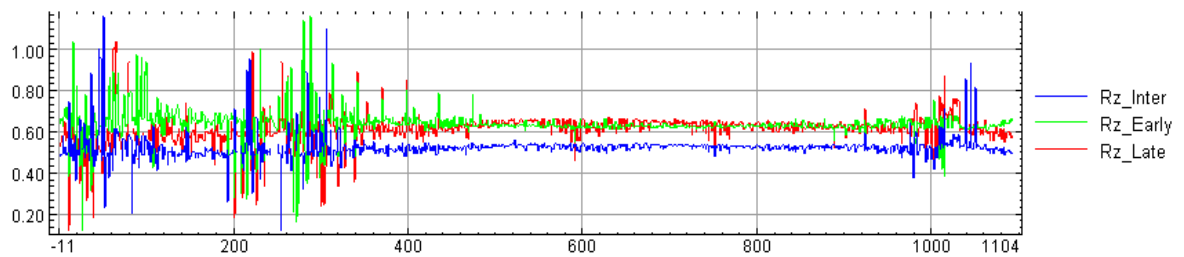


Figura 6.15 – Normalização da linha 7. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

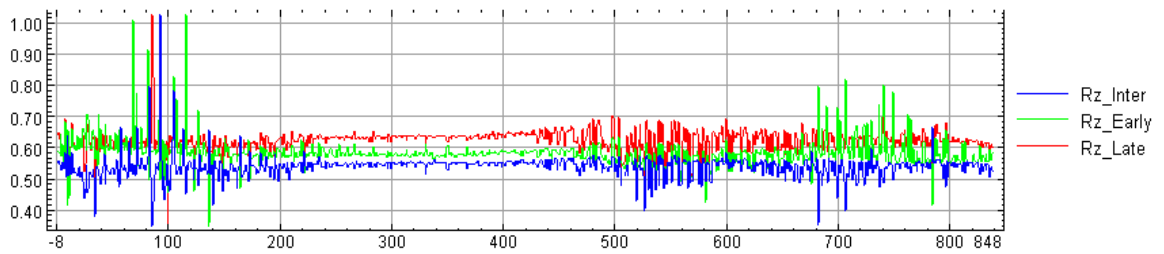


Figura 6.16 – Normalização da linha 8. Eixo x (estações) e eixo y (amplitude do sinal).

### 6.3 MAPAS 3D

As figuras 6.17 a 6.20 mostram diferentes visões 3D dos possíveis corpos mineralizados em que os valores em azul representam altos valores de cargabilidade ou IP\_Avg.

O mapa 3D foi gerado no OASIS MONTAJ; sendo que cada linha levantada possui informação de profundidade permitindo uma visualização dos corpos em profundidade.

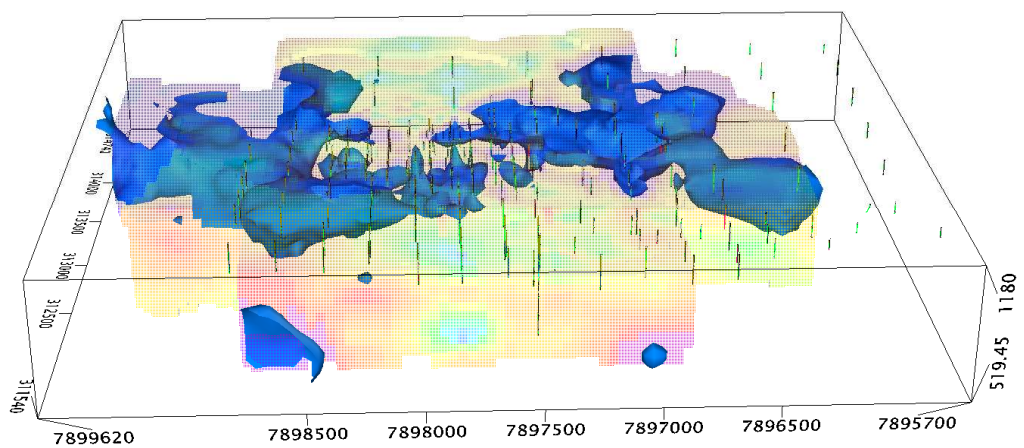


Figura 6.17– Mapa 3D de cargabilidade com o furos de sondagens .

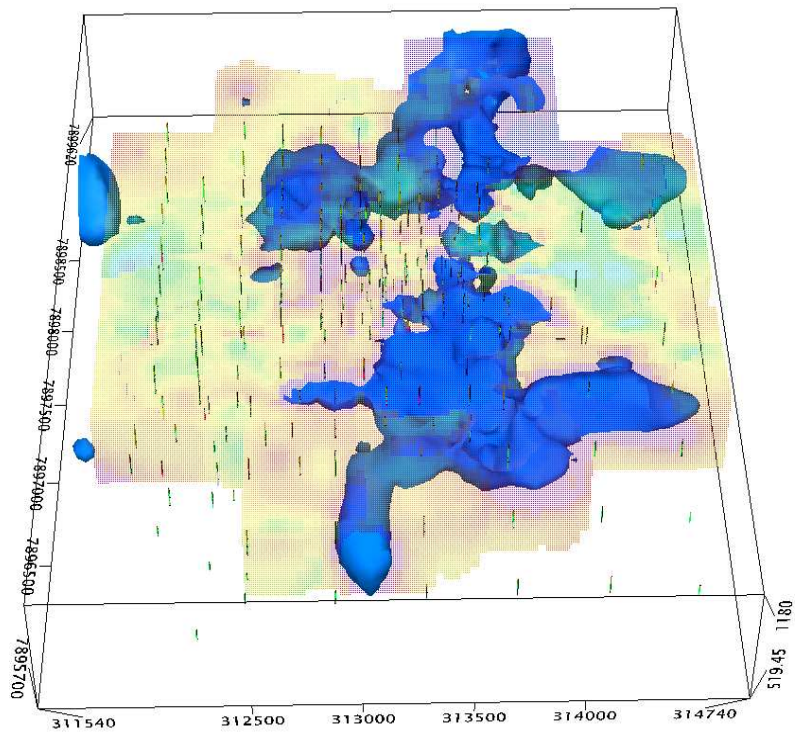


Figura 6.18 – Mapa 3D de cargabilidade na direção norte-sul .

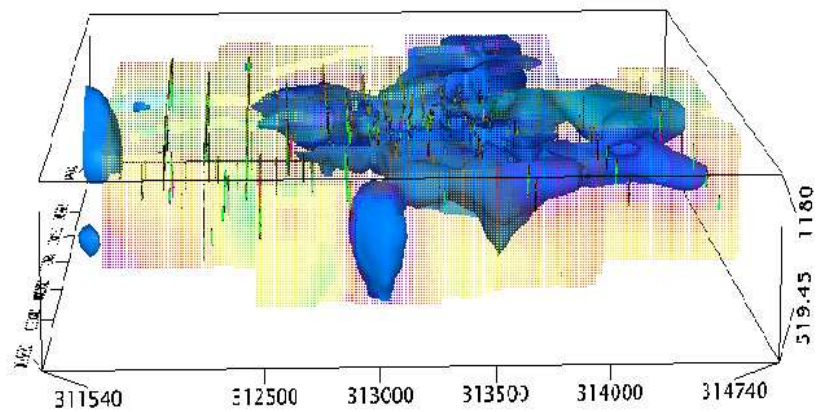


Figura 6.19 – Mapa 3D de cargabilidade com o foco na profundidade dos corpos mineralizados.

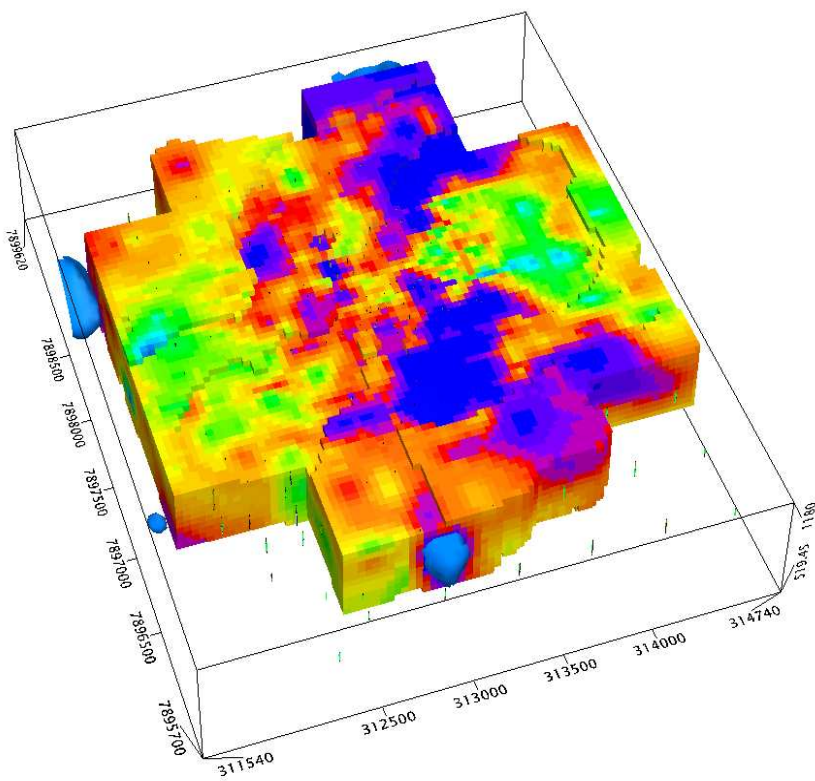
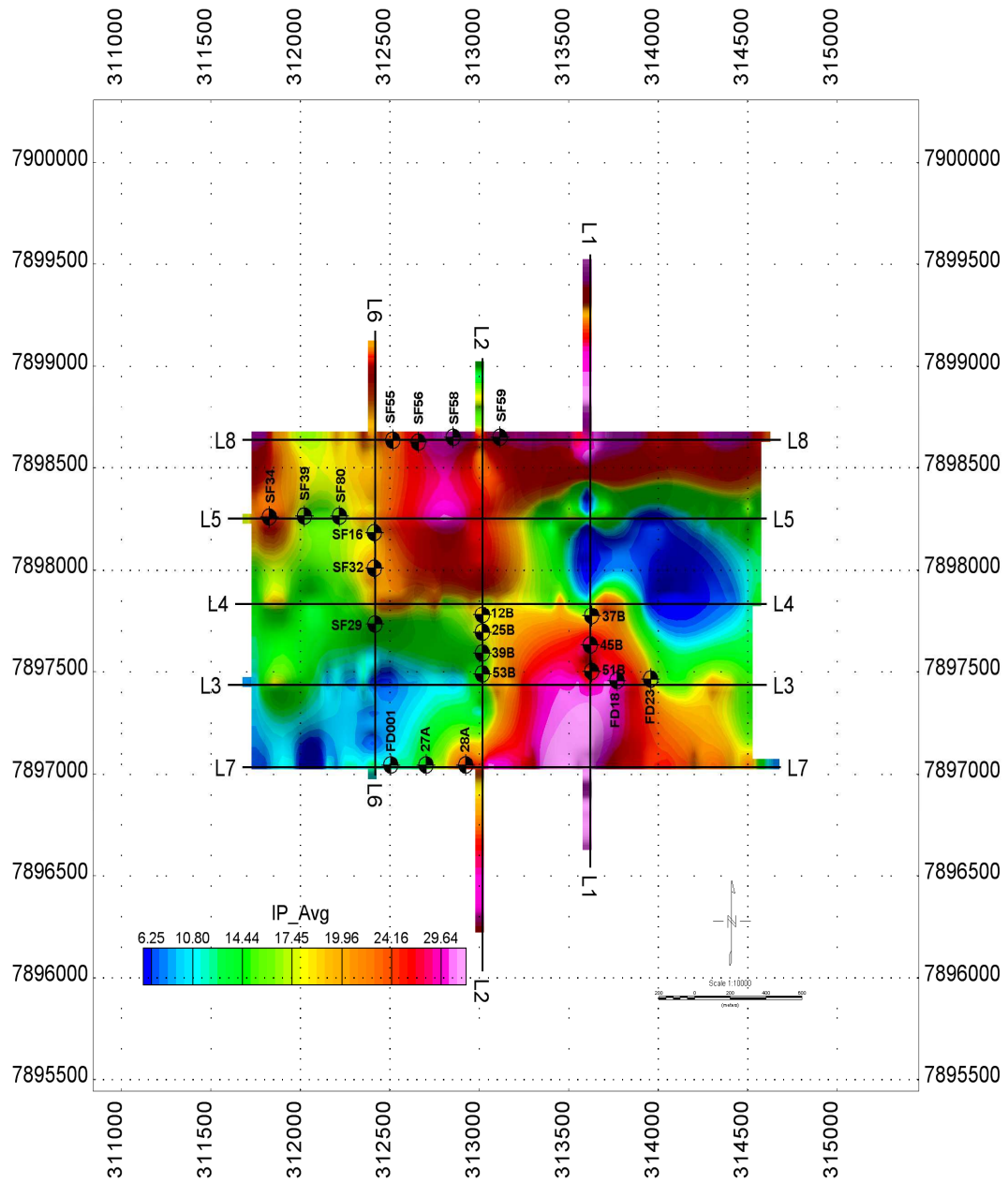


Figura 6.20 – Bloco 3D de cargabilidade.

## **7 RESULTADOS DE FUROS DE SONDAGEM**

Na Figura 7.1 os furos de sondagens possuem sua localização geográfica no mapa de cargabilidade total. Os resultados dos furos de sondagens são mostrados nas figuras 7.2 a 7.9. A coluna estratigráfica compreende as seguintes litologias e feições abaixo descritas.

- 1 – Capeamento(CAP): materiais estéreis (não mineralizados) em fosfato e/ou titânio.
- 2 – Bebedourito(BEB): rochas que apresentem 50% de piroxênio a olho nu e/ou contenham perowskita.
- 3 – Foscorito (FCR): grupo de rochas constituídas por variações modais em apatita, magnetita e silicato.
- 4 – Carbonatito: carbonatito-Ca (sövito) e carbonatito-Mg (beforsito);
- 5 – Fenda: material não recuperado na sondagem com indícios suficientes para se caracterizar como fenda.
- 6 – Perdas: material não recuperado na sondagem, porém sem argumentos suficientes para caracterizar-se como fenda.
- 7 – Água: água propriamente dita, bem como lamas e afins que não são passíveis de recuperação.
- 8 – Titânio: nas formas de anatásio, perowskita, ilmenita, magnetita titanífera, titanita, etc.



7.1 Figura – Mapa de isocontornos de capacidade total com os furos de sondagens.

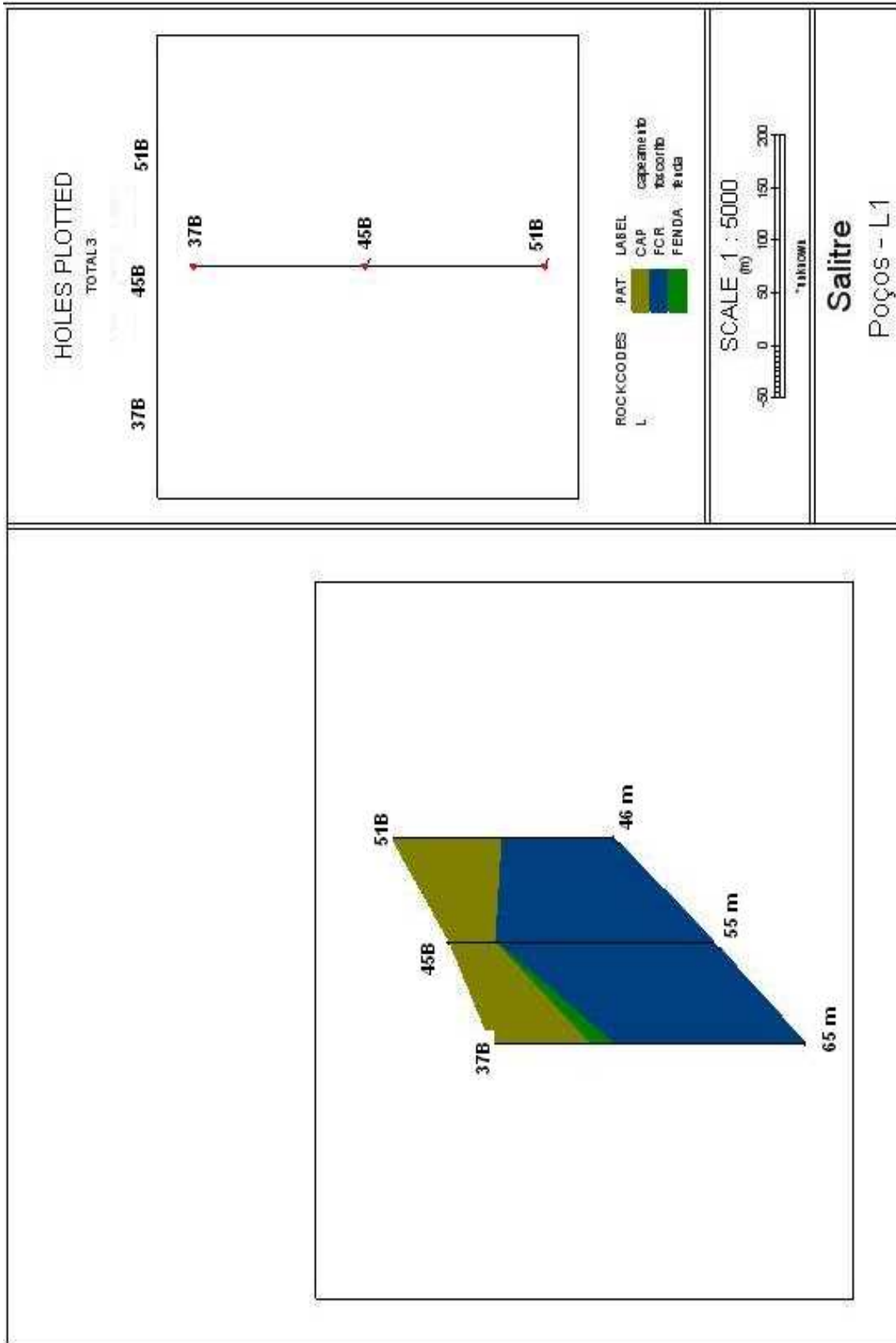


Figura 7.2– Descrição litológica da linha 1.

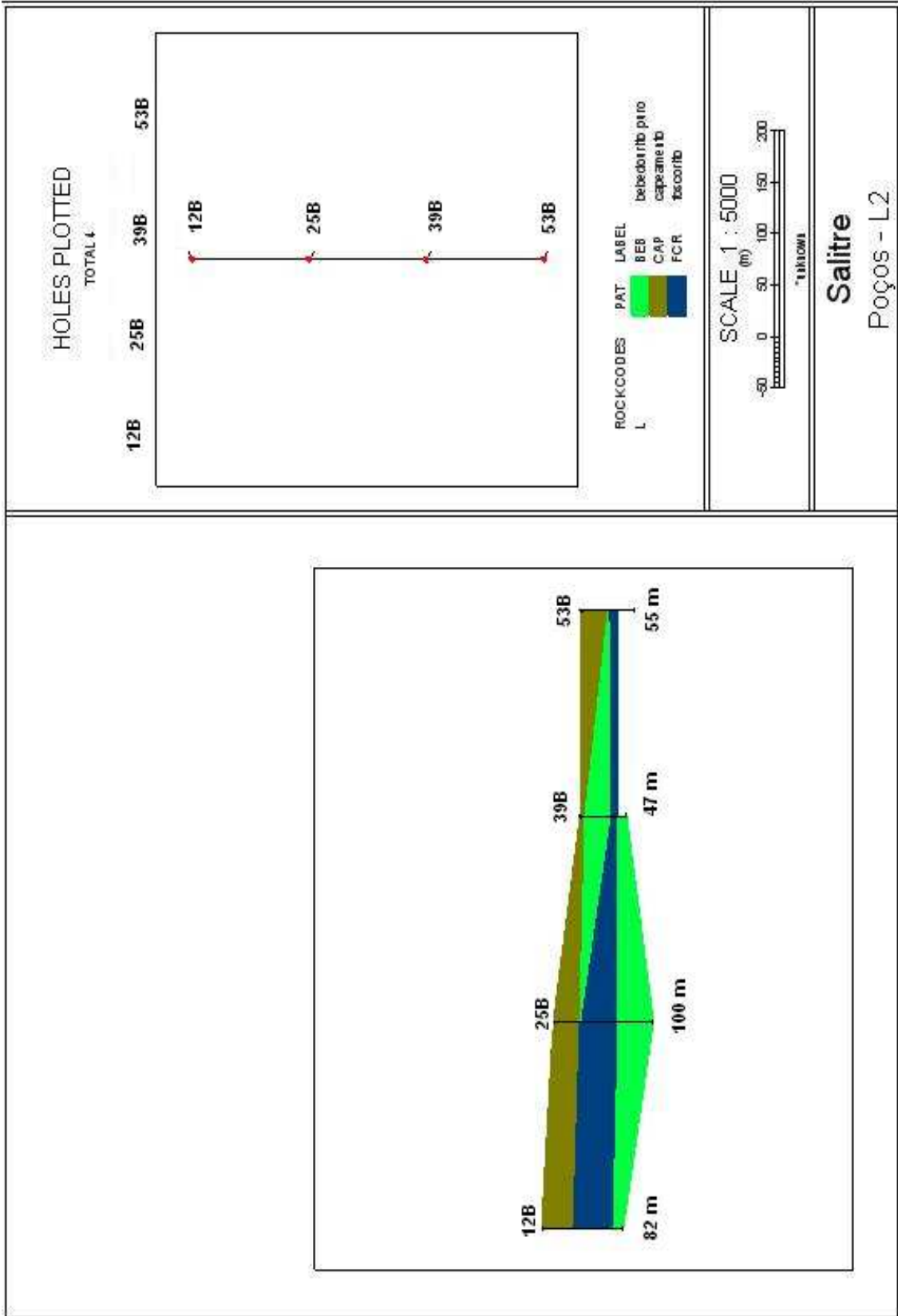


Figura 7.3– Descrição litológica da linha 2.

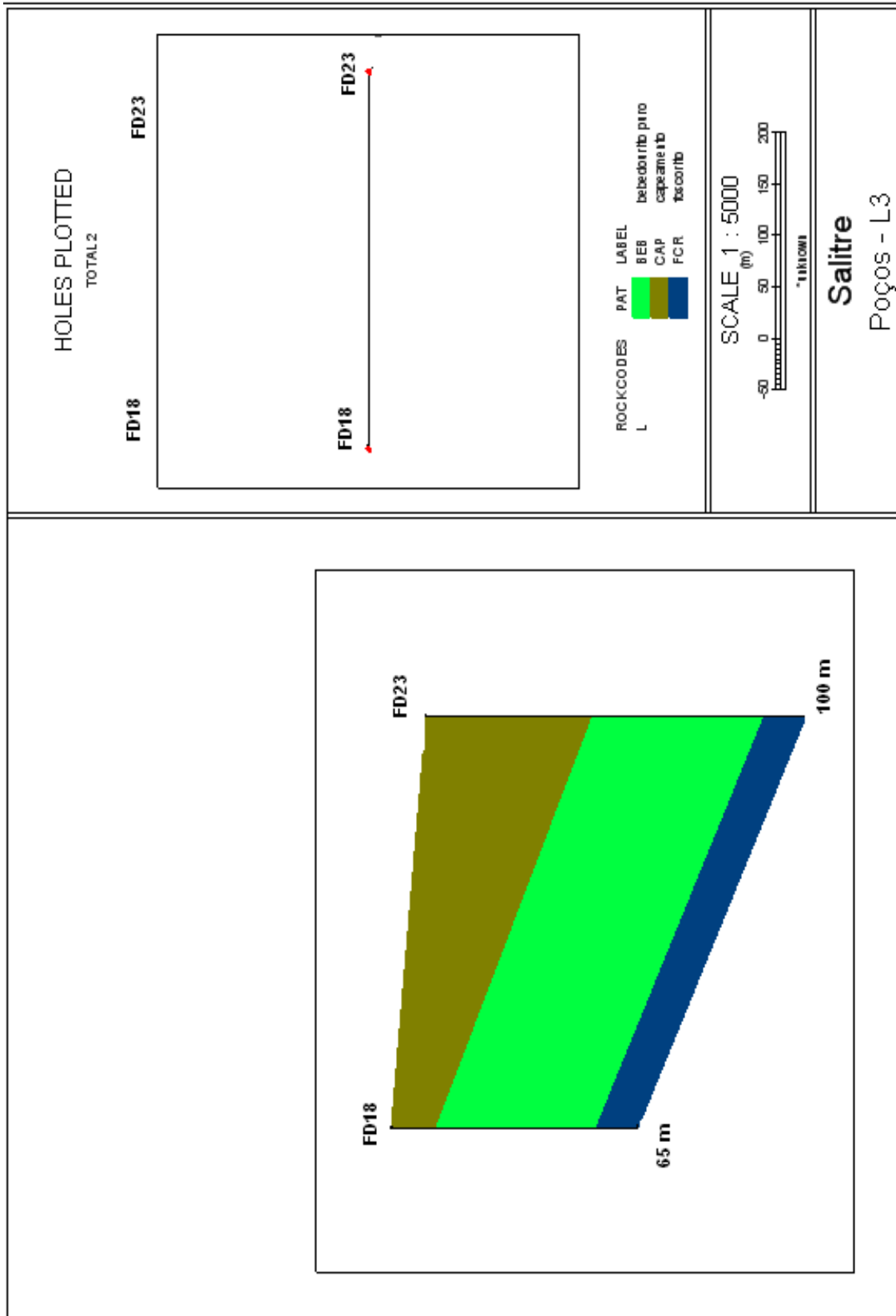


Figura 7.4 – Descrição litológica da linha 3.

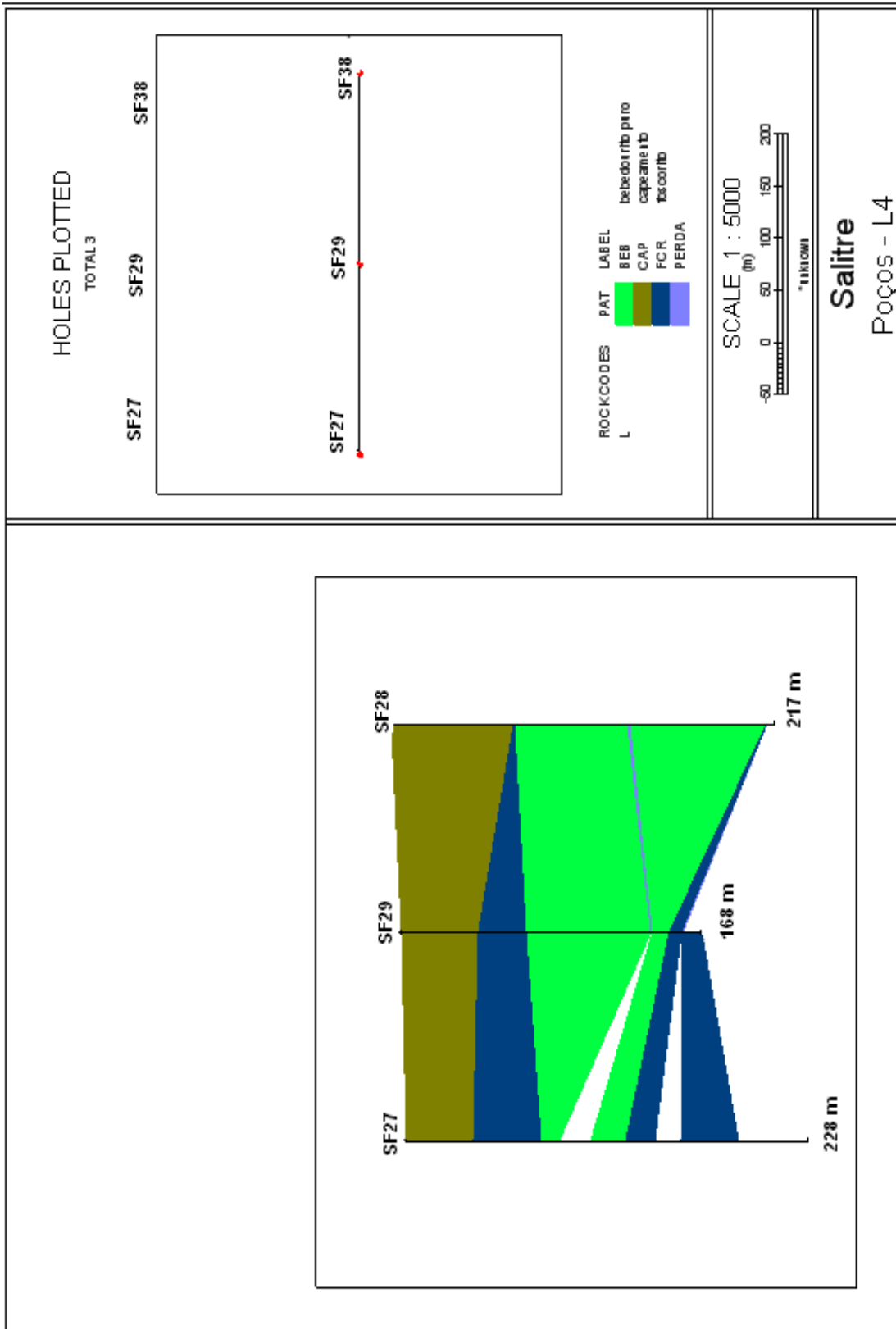


Figura 7.5 – Descrição litológica da linha 4.

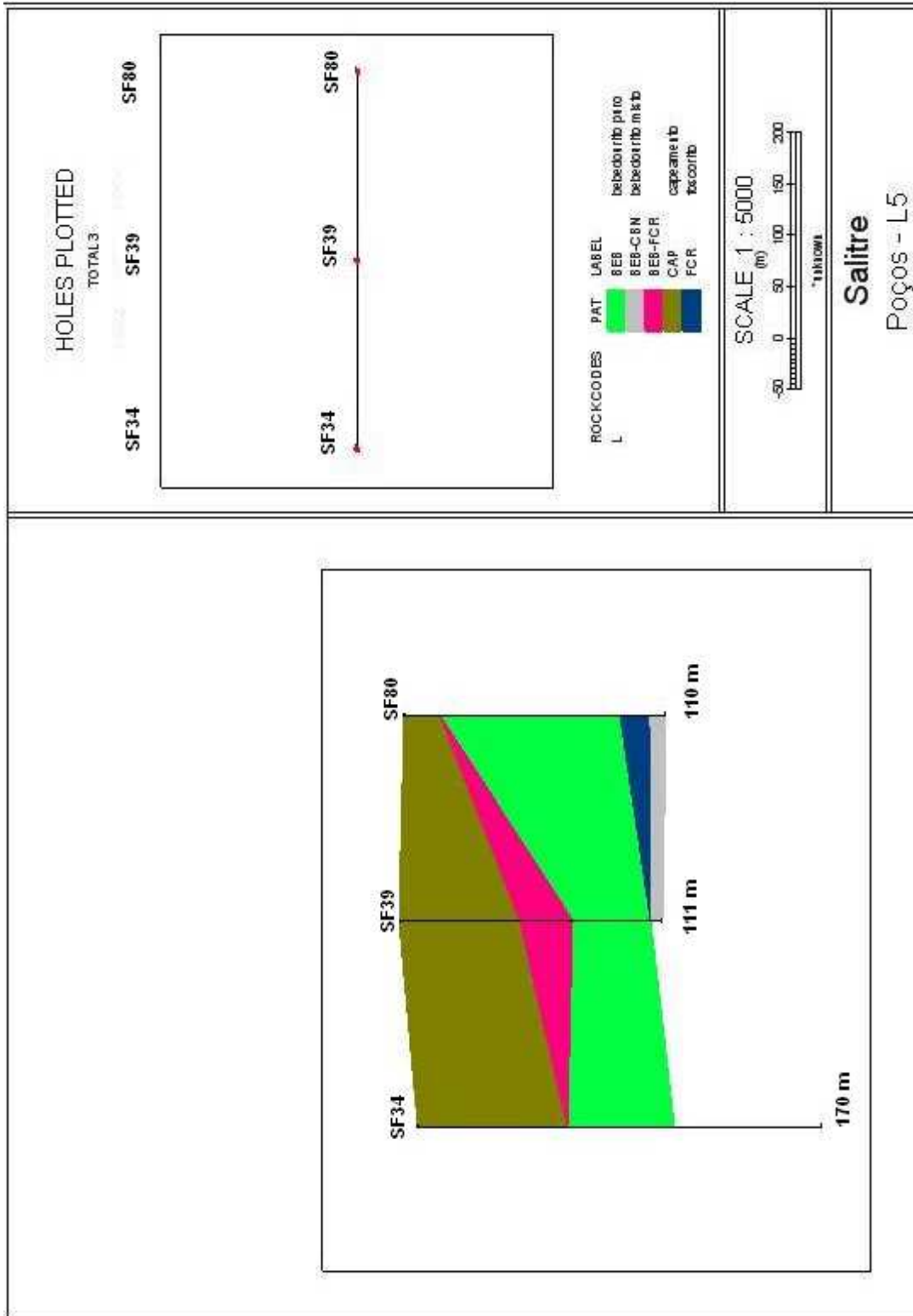


Figura 7.6 – Descrição litológica da linha 5.

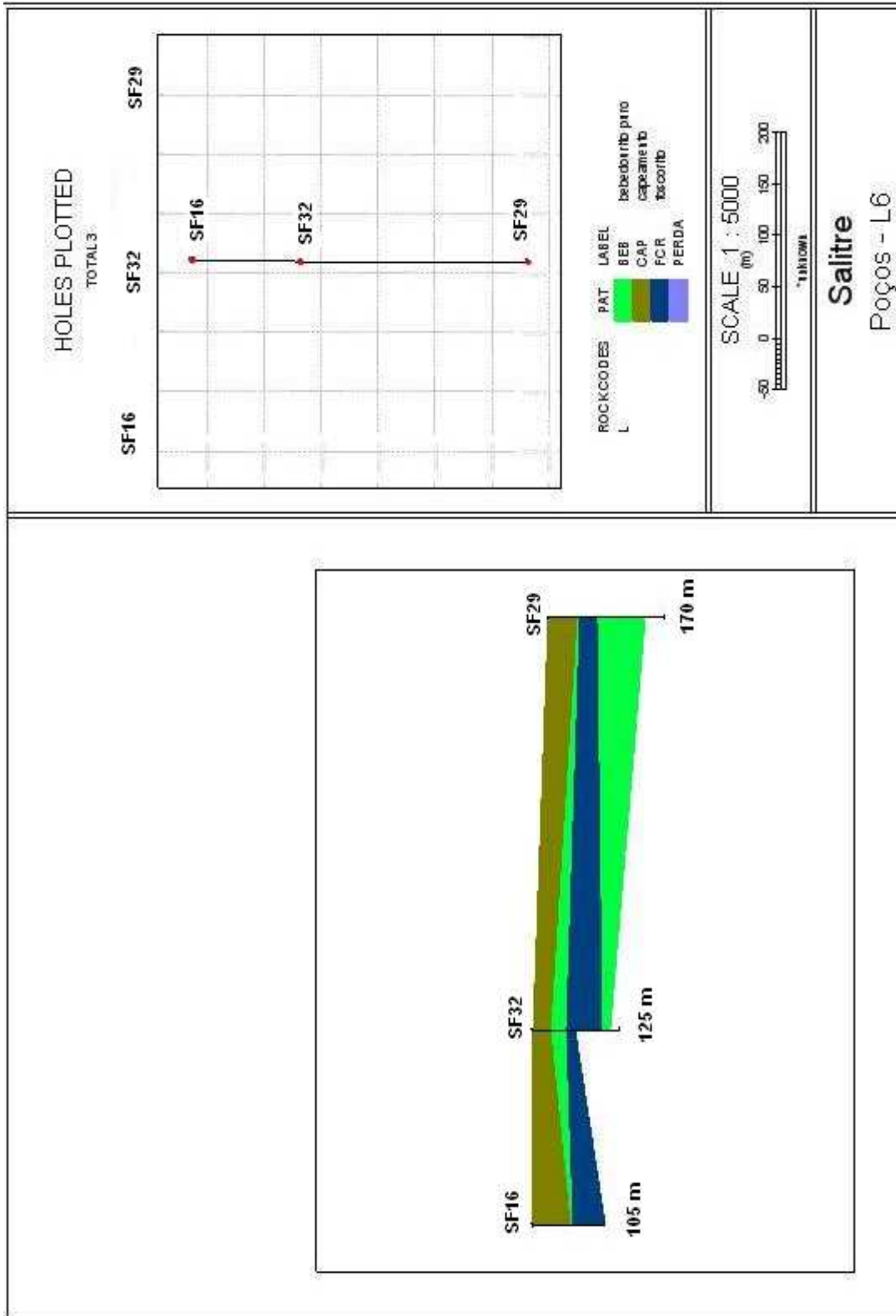


Figura 7.7 – Descrição litológica da linha 6.

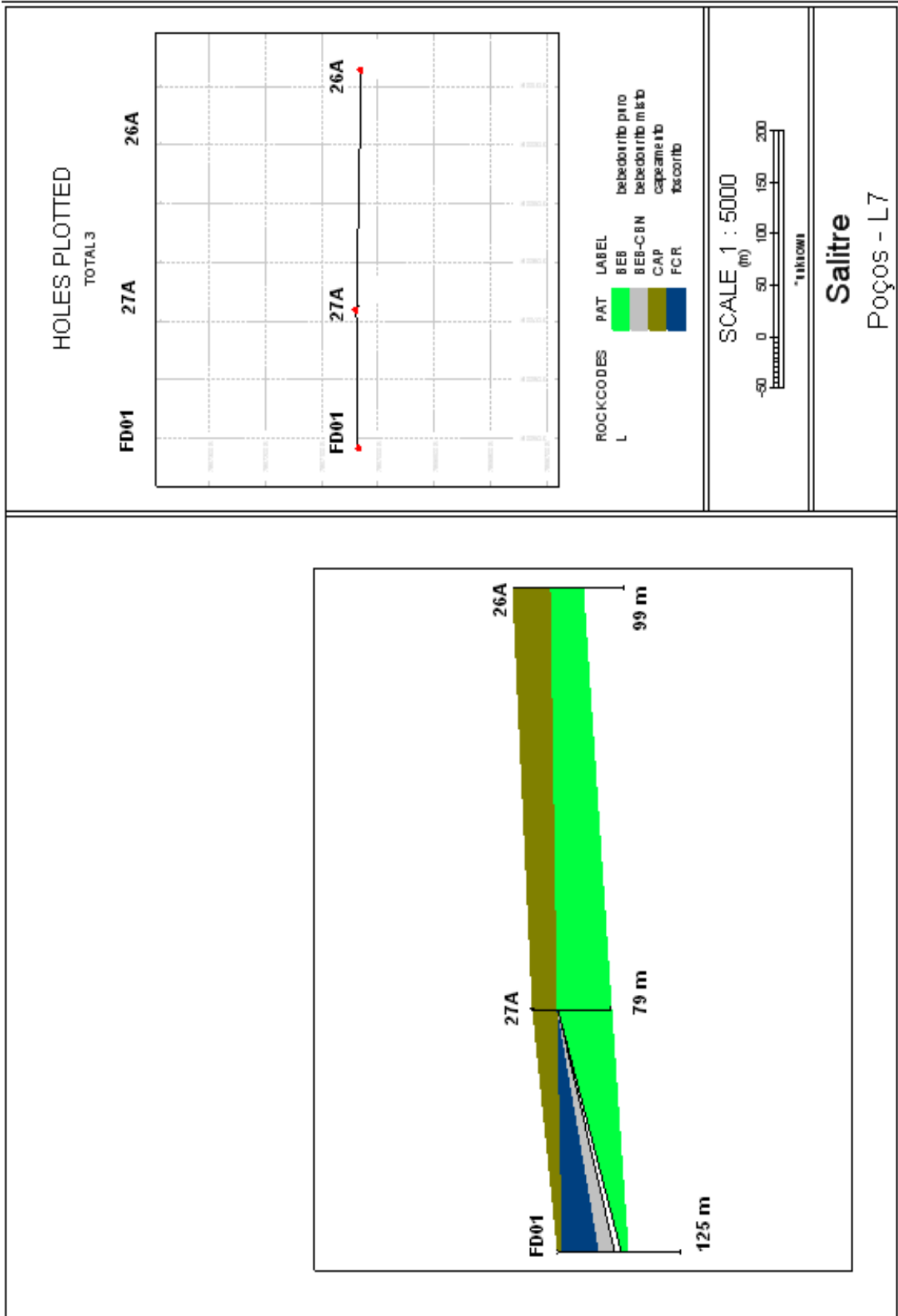


Figura 7.8 – Descrição litológica da linha 7.

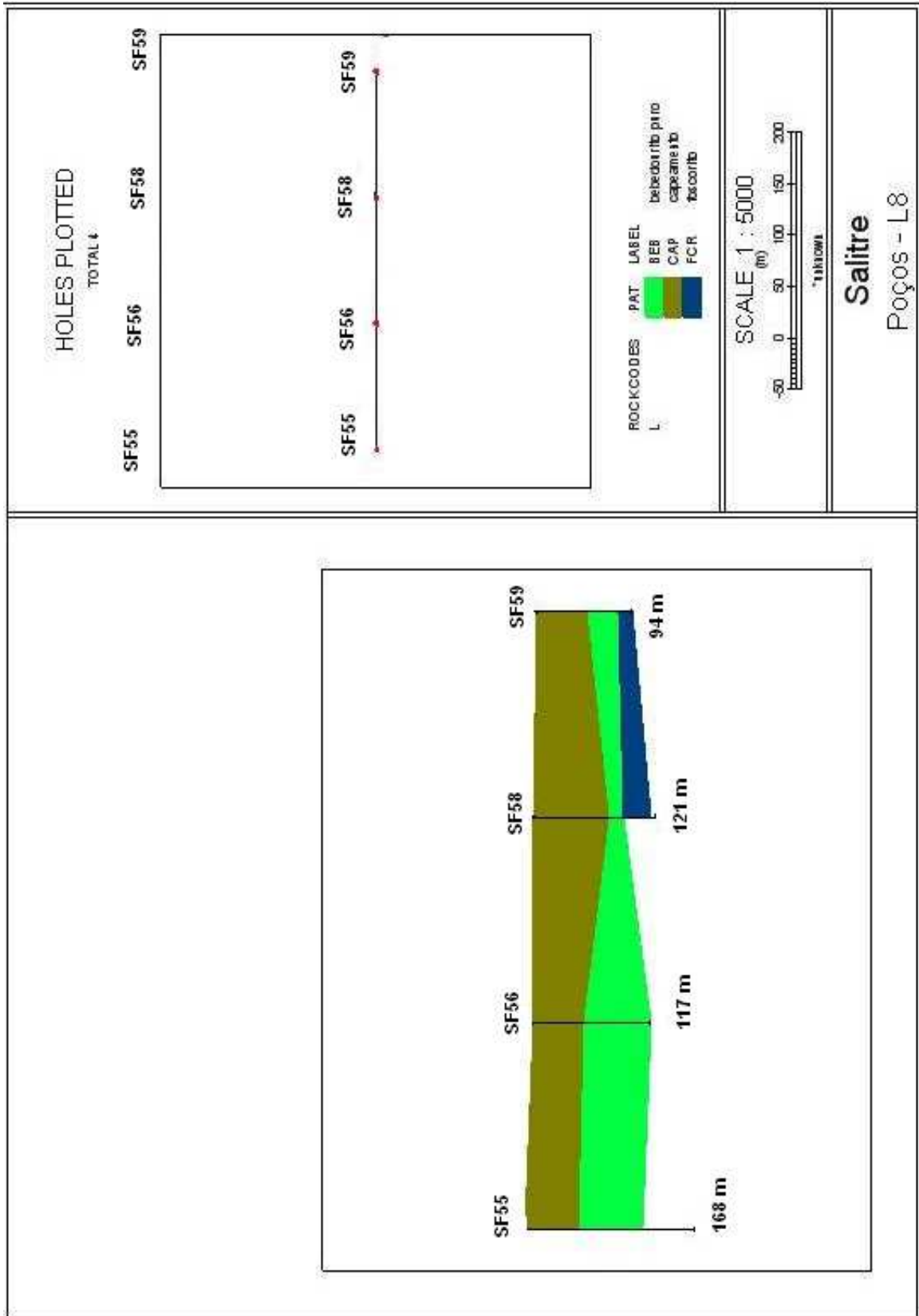


Figura 7.9 – Descrição litológica da linha 8.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi aplicar o processo de normalização de canais, afim de se identificar feições estruturais (falhas e fraturas) e especialmente a identificação de três horizontes geológicos distintos: aloteritos, ou solos residuais maduros; isalteritos, ou solos saprolíticos, que representam o jazimento econômico, e topo da rocha fresca.

A fonte do fenômeno IP e dos valores anômalos de cargabilidade são minerais que provocam tanto a polarização de membrana, caso das argilas, como à polarização de eletrodos, como magnetita, pirita, pirrotita além da grafita.

A modelagem *forward* e a inversão mostraram ser possíveis discriminar as fontes geradoras do fenômeno IP a partir da normalização. O perfil normalizado Early (Rz\_Early) apresentado na figura 5.7 responde à influência do corpo, indicando a presença de um corpo superficial como também a normalização Rz\_Inter na cor verde. Na mesma figura, o perfil de Rz\_Late responde com defasamento em relação ao primeiro e ao segundo perfil, sendo que o mesmo está ligado à resposta de um corpo mais profundo. O sinal nos primeiros níveis possui uma amplitude maior e diminuem com a profundidade, devido a sua atenuação no meio geológico.

As figuras 6.6, 6.7 e 6.8 mostram os mapas obtidos com as normalizações Rz\_Early, Rz\_Inter e Rz\_Late. Comparando-se as três figuras normalizadas com o mapa IP\_Avg, é possível identificar certa semelhança com os mapas de Rz\_Inter e Rz\_Late. Isso explica porque o mapa de cargabilidade média só teve eficácia em determinar o ponto com maior concentração de foscorito, que gera altos valores de cargabilidade e também com altos valores de resistividade.

Os perfis normalizados que tiveram correspondência com os furos de sondagem, onde os perfis que possuem maiores amplitudes estão associados a presença de foscorito (alto valor de cargabilidade). As figuras 6.10, 6.12, 6.14 e 6.16 são as linhas (2, 4, 6 e 8) que tiveram como resposta o Rz\_Late associado ao mineral de interesse.

Visualizando o mapa em planta de resistividade da Área Alagável (figura 6.2), é possível verificar valores baixos de resistividade na área alagada (valores em azul), localizada na porção NE da malha, com forma aproximadamente circular; e outra zona também menos

resistiva na porção SW da malha, também com característica circular. Ambas as zonas citadas acima estão localizadas em uma área de baixo relevo e, no caso do Bebedouro.

Integrando-se os dados de geofísica e os de geologia (furos de sondagens), é possível identificar alguns alvos dentro da malha pesquisada que é de interesse da prospecção.

O primeiro horizonte a ser comentado é o aloterito, na maioria das vezes apresentou-se resistivo e com baixos valores de cargabilidade, porém em algumas partes mostrou valores anômalos de IP, possivelmente gerados pela magnetita, argilo minerais e água saturada.

Já o isalterito, há uma forte variação nos valores de resistividade e cargabilidade, também associado a presença de magnetita e argilo-minerais.

Para o topo rochoso os altos valores de resistividade e cargabilidade podem ser associados a silicatos. Os altos valores anômalos de cargabilidade nos mapas de IP\_Avg e Rz\_Late, apresentam uma indicação de carbonatitos e foscoritos em profundidade.

O método IP identificou a fonte da anomalia que possivelmente pode ser associado ao limite do topo rochoso, este representado pelo carbonatito, quando se encontra fraturado e saturado com água, ou mesmo com uma intrusão contendo minerais tais como: magnetita, pirrotita, pirita.

Em vista a necessidade de sempre mais informação na pesquisa geofísica, o trabalho aqui apresentado é uma nova ferramenta de processamento na prospecção mineral.

A normalização de canais IP, mostrou que decaimentos rápidos com voltagem inicial grandes, podem gerar mesmo valores IP\_Avg que decaimento mais lentos com valores iniciais mais baixos.

Furos de sondagens mostram que o intemperismo na área varia muito, de centímetros a dezenas de metros. A magnetita e a apatita têm uma variação na concentração da superfície ao topo rochoso.

O mapa de IP\_Avg mostra apenas uma visão da anomalias, sendo que os mapas normalizados de IP, possibilita termos uma análise da anomalia em profundidade, ou seja, facilita compreender a origem da anomalia.

O trabalho aqui realizado buscou uma nova ferramenta no processamento dos dados de IP afim auxiliarem ainda mais na interpretação geofísica e na alocação de furos de sondagem.

Para futuros trabalhos na área é recomendado o adensamento da malha na área pesquisada e também a utilização de métodos tais como: imageamento, magnetometria e radiometria, a fim de se obter um modelo mais realista da área.

## REFERÊNCIAS

COLLETT, L. S. History of the Induced-Polarization Method, in Induced Polarization: Applications and Case Histories. **Chapter 1 SEG's**, 1990.

IRIS INSTRUMENTS. **ELREC Pro User's Manual**. Orléans: [S.n], 2003, 63 p.

KELLER, G. V.; FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical Methods in Geophysical Prospecting** Oxford: Pergamon , 1966.

KEEVIL, N. B.; WARD, S. H. Electrolyte Activity: its effective on induced polarization. **Geophysics**, v. 27, p. 677 – 690. 1962.

MADDEN, T. R.; FAHLQUIST, D. A.; NEVES, A. S. **Background Effects in the Induced Polarization Method of Geophysical Exploration**. MIT Report to U.S. Atomic Energy Comm. RME – 3150. 1957.

MARSHALL, D. J.; MADDEN, T. R. Induced polarization: a study of its causes, **Geophysics**, v. 24, p. 790–816. 1959.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Madrid: Paraninfo, 1982, 578p.

PELTON, W. H.; RIJO, L.; SWIFT, C. M. Inversion of Two-Dimensional Resistivity and Induced Polarization Data. **Geophysics**, v. 43, p. 788-803. 1978.

PELTON, W. H. et al. Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multi – frequency IP. **Geophysics**, v. 43, p. 588 – 609. 1978.

SEIGEL, H. O. A Theory for Polarization Effects (for step Excitation Function). In: WAIT, J. R. (Ed.). **Overvoltage Research and Geophysical Applications**. Tulsa: Pergamon, 1959a, p. 4-21.

\_\_\_\_\_. Mathematical Formulation and Type Curves for Induced Polarization. **Geophysics**, v. 24, p. 547 - 563. 1959b.

SOGADE, J. A. et al. Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes. **Geophyscs**, v. 71, n. 3, p. B75-B84. 2006.

SUMNER, J. S. **Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976, 277p.

TELFORD, W. M. et al. **Applied Geophysics**. 1.ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1976. 860p.

TITOV, K. et al. **Induced Polarization of Unsaturated Sands determined Thorough time Domain Measurements**. *Vadose Zone*, 3, 2004. p.1160-1168.

WARD, S. H. The Resistivity and induced polarization methods. In: Ward, S. H. (ed.) **Geotechnical and environmental geophysics: investigations in geophysics**. Utah: Salt Lakey, 1988, p.169–189.