

# MODELAGEM NUMÉRICA DE DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA APLICADA NO ESTUDO DO Aqüífero DE ROCHAS CARBONÁTICAS FRATURADAS DA CIDADE DE PATOS (PB), NORDESTE DO BRASIL

**Roberto Gusmão de Oliveira<sup>1</sup>; Manoel Júlio da Trindade Gomes Galvão<sup>1</sup> & Severiano Nunes Lopes<sup>1</sup>**

**Resumo** - A cidade de Patos está situada no sertão do Estado da Paraíba e, em sua área urbana ocorre um aqüífero de rochas carbonáticas, que afloram como lentes intercaladas em gnáisses migmatizados. Em novembro/98, um poço perfurado em mármore dolomíticos fraturados no interior do Presídio da cidade, apresentou vazões superiores a 40.000 l/h. Com o objetivo de conhecer as características morfoestruturais desse aqüífero foram realizados levantamentos de resistividade elétrica. O método utilizado foi o de caminhamento elétrico para a construção de pseudo-seções de resistividade aparente com seis níveis de investigação. O arranjo empregado foi do tipo dipolo-dipolo, coplanar, com eletrodos espaçados de 10 m. Os dados de campo foram modelados por meio do *software RESIX2DI* da *Interpex Ltd*. A partir dos resultados, observa-se que a acumulação de água ocorre em sistemas de fraturas abertas localizadas preferencialmente em mármore, correlacionadas com faixas de baixa resistividade (< 10 Ohm.m). Esses sistemas articulam-se em duas direções principais, NE-SW e NW-SE, em concordância com as direções das fraturas abertas identificadas em campo. Os resultados indicam que o aqüífero é raso e possui fortes conexões com a água dos níveis superficiais.

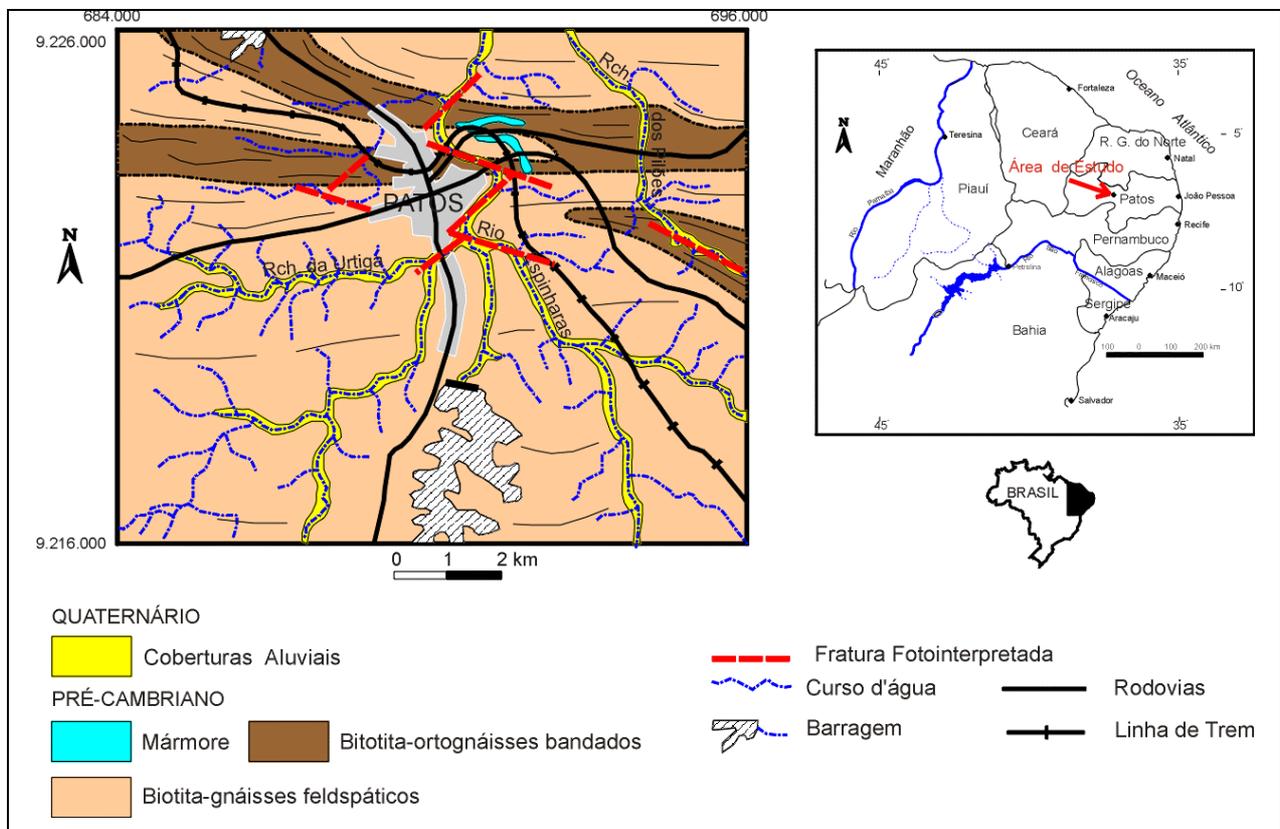
**Palavras-chave** - resistividade elétrica, modelagem numérica, Patos.

## 1. INTRODUÇÃO

---

<sup>1</sup> CPRM - Serviço Geológico do Brasil. End. : Rua das Pernambucanas, 297, Graças, 52.011-010, Recife, Pernambuco, Brasil. Fone: 0xx81.221.7456, Fax:: 0xx81.221.7645, E-mail :cprm@fisepe.pe.gov.br

A cidade de Patos possui mais de 80.000 habitantes e está situada no sertão do Estado da Paraíba (Figura 1). Em novembro/98 estava passando por graves problemas de falta d'água, motivado pela estiagem que afetava todo o sertão nordestino. Com o objetivo de abastecer a população, a Secretaria de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (SRH) e a Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado da Paraíba (CDRM) perfuraram um poço no interior do Presídio, e para surpresa geral, esse poço com apenas 25 m de profundidade apresentou vazões excepcionais para um aquífero fissural (40.000 litros/h). A partir desses fatos a CPRM - Serviço Geológico do Brasil (Superintendência de Recife) executou os trabalhos de levantamento geofísico.



**Figura 1.** Contexto geológico e geográfico da área de estudo. Mapa geológico modificado de Scheid & Ferreira (1991) e CDRM (1982).

## 2. GEOLOGIA

Segundo Scheid & Ferreira (1991), na região da cidade de Patos afloram rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (Figura 1), constituindo uma seqüência migmatizada, polifasicamente deformada, subdividida em dois domínios principais: biotita - gnáisses migmatizados e ortognaisses granito-granodioríticos. Dentro desse contexto afloram

lentes de mármore dolomítico, esbranquiçado a cinza claro, textura grosseira, com direções variando de N80<sup>0</sup>W a E-W (Gonzaga & Oliveira, 1998). Preenchendo as calhas do rio Espinharas e dos seus riachos tributários ocorrem depósitos aluviais, constituídos basicamente por areias argilosas.

Dentro do contexto do padrão de deformação frágil foram definidos nos mármores quatro sistemas principais de fraturas abertas: 70<sup>0</sup>/200<sup>0</sup>Az, 75<sup>0</sup>/250<sup>0</sup>Az, Sub/0<sup>0</sup>Az \*Direção e Sub/230<sup>0</sup>Az\*Direção. Nos gnáisses, as fraturas refletindo a tendência regional, seguem também esse padrão estrutural, porém apresentam-se fechadas. É bastante perceptível o condicionamento estrutural do rio Espinharas, que no trecho da cidade de Patos está encaixado em sistemas fraturados bem definidos, sugerindo um sistema com interconexão em formato romboédrico, característico de ambiente de distensão (Figura 1).

## 2.1. GEOGRAFIA FÍSICA

A região possui um clima semi-árido quente de baixa pluviosidade, com uma vegetação típica da caatinga xerofítica dos sertões nordestinos. Em função da ação humana, na região próxima da cidade a vegetação está rarefeita, destruída ou substituída por espécies adaptadas.

A principal bacia hidrográfica que ocorre no município é a do rio Espinharas, tendo como principais tributários os rios da Farinha, riacho da Cruz, riacho Santana e riacho da Cachoeira. Todos desenvolveram uma drenagem dendrítica, convergente em escala regional em direção ao rio Espinharas, que localmente, nas proximidades de Patos, já apresenta uma drenagem do tipo treliça, com os tributários fortemente condicionados ao padrão estrutural local (Figura 1).

A área está inserida na Depressão Interplanáltica Central (Prates, M. *et al.* 1981 *in* Scheid & Ferreira, 1991), que constitui uma depressão semi-árida que contorna o planalto da Borborema. Destacam-se também a presença de cristas e escarpas, formando relevos residuais, refletindo os aspectos erosivos diferenciais que atingiu os diversos tipos litológicos na região.

## 3 - HIDROGEOLOGIA

Na região são encontrados dois tipos de aquíferos, cada um deles com características hidrogeológicas semelhantes:

- a) Aquífero Fissural;

## b) Aquífero Poroso Sedimentar.

O aquífero fissural caracteriza-se pelo fato da água estar armazenada e circular nos espaços abertos das rochas (fraturas, fendas e diáclases). Além de ser um meio totalmente heterogêneo e anisotrópico, ocorre uma interdependência entre a qualidade e quantidade de suas águas com fatores externos como o clima, relevo, etc. Na região estão condicionados às rochas cristalinas do Complexo Gnáissico-Migmatítico. Os melhores aquíferos estão correlacionados com a presença de mármore fraturados.

Os aquíferos porosos são constituídos por aluviões, que ocupam principalmente o vale do rio Espinharas, formando bolsões isolados devido as irregularidades da superfície do substrato cristalino. Nesses bolsões estão localizados diversos poços amazonas, de grande diâmetro, que são explorados em pequenas irrigações. Esse aluviões podem representar importante fonte de alimentação e recarga para o sistema aquífero fissural.

## **4. ASPECTOS RELACIONADOS À POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA**

Tomando como base a metodologia adotada por Foster *et al.* (1988) para a definição diversas classes de vulnerabilidade, considerando o tipo e forma de ocorrência dos aquíferos (se livres, fissurais ou confinados), profundidade do nível d'água ou teto do aquífero confinado, litologias existentes acima da zona não saturada, grau de permeabilidade, grau de fraturamento e conteúdo de argila, a área de estudo pode ser classificada como de elevada vulnerabilidade e de alta potencialidade de risco de contaminação.

## **5. LEVANTAMENTO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

### **5.1. O PROBLEMA**

O problema principal a ser resolvido foi identificar faixas de rochas fraturadas preenchidas por água, em lentes de mármore localizadas dentro da área urbana edificada (Figura 02). Nesse tipo de situação hidrogeológica o método mais recomendável é o do caminhamento elétrico, com a construção de pseudo-seções, visando a investigação do substrato em profundidade. As edificações, esgotos subterrâneos, ruas muito transitadas e rede elétrica foram os principais obstáculos para a execução do trabalho, que foi realizado nas áreas abertas disponíveis em torno do Presídio. Portanto, as condições da área de estudo impediram um levantamento ideal, restringindo-se ao que

foi possível quanto às localizações das seções e, a um espaçamento que permitiu uma investigação limitada à profundidade máxima de 20 m.

## **5.2 - O MÉTODO**

Foi utilizada a técnica de caminhamento elétrico, que consiste na execução de perfis, onde um transmissor injeta corrente no terreno mediante um par de eletrodos (A e B), fincados na superfície. Simultaneamente um receptor mede a variação do potencial elétrico em um outro par de eletrodos (M e N). O quociente entre a diferença de potencial e a intensidade de corrente, multiplicado por uma constante que depende do afastamento entre os eletrodos, fornece o valor da resistividade aparente. Para cada distância de afastamento entre AB e MN obtém-se uma profundidade de investigação. Utilizando-se mais de uma distância, a estrutura do terreno é investigada por meio de pseudo-seções de resistividade aparente, assim denominadas, porque sua escala vertical não representa a verdadeira profundidade de investigação, e o valores das resistividades refletem a somatória dos efeitos das diferentes resistividades das várias litologias do subsolo.

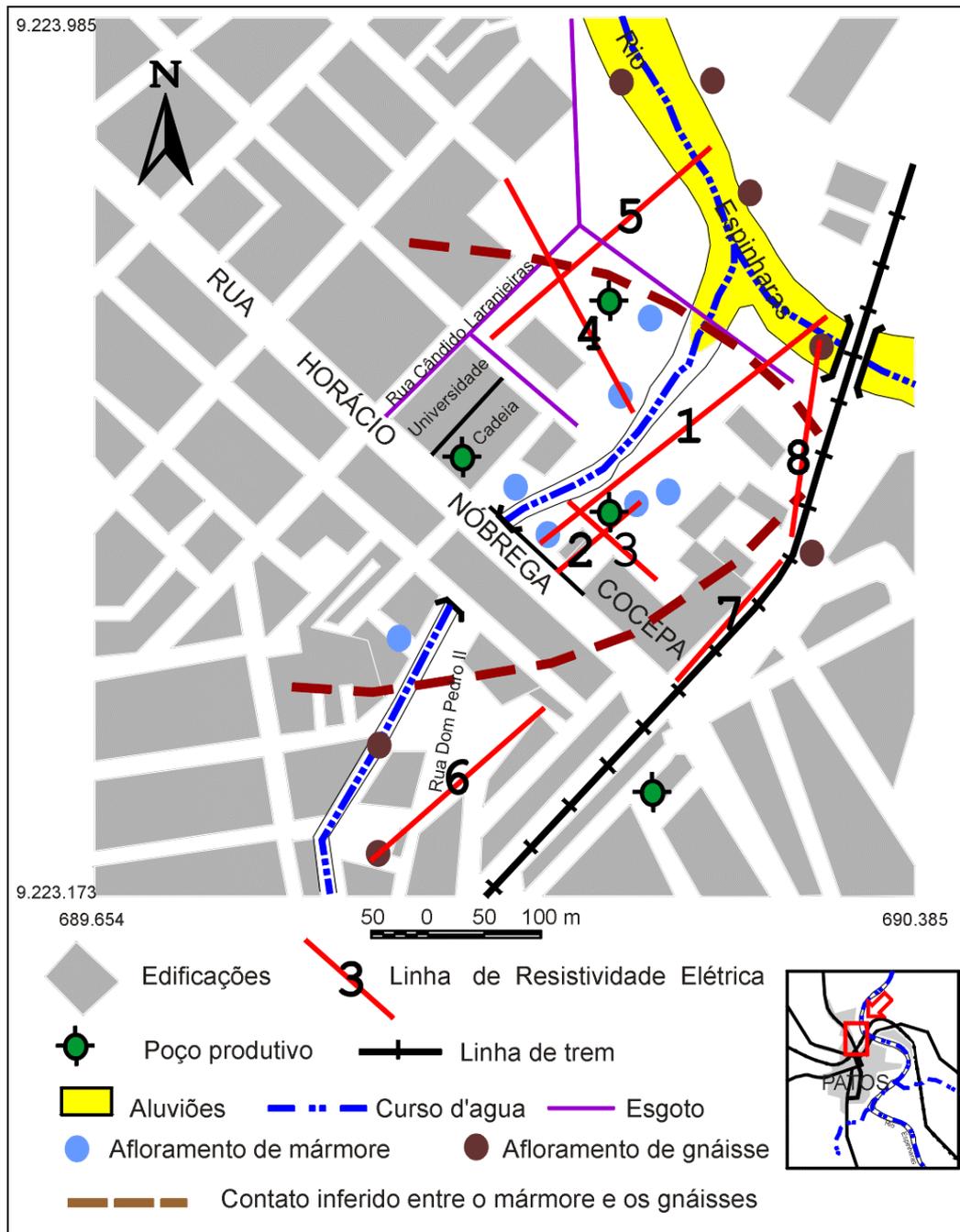
Neste levantamento foram realizadas pseudo-seções (Figura 2) com arranjo dipolo-dipolo, eletrodos em arranjo geométrico coplanar, espaçados de 10 m, com 6 níveis de investigação em profundidade. Na área do Presídio foram realizados 1.500 m lineares de perfis, separados em 8 Linhas (Figura 2) entre os dias 26/11 e 04/12/98.

## **5.3. O EQUIPAMENTO**

Foi utilizado um eletroresistímetro marca B&B, modelo GES 1/72, de corrente contínua, alimentação 24 volts, com eletrodos de aço inoxidável; e um receptor marca Protek, modelo 505, com eletrodos não polarizáveis. O sistema foi acoplado com carretéis e fios nº 10.

## **5.4. TRATAMENTO DOS DADOS**

Os valores de resistividade aparente foram calculados e interpolados manualmente ao mesmo tempo em que o levantamento era executado. Isso permitiu uma avaliação em tempo real da qualidade dos dados que estavam sendo gerados. Em concordância com a análise preliminar dos dados foi possível replanejar o trabalho a cada momento. Após a execução de todo o levantamento, os dados foram tratados por meio de técnicas computacionais, que serão descritas a seguir.



**Figura 2.** Detalhe da área urbana da cidade de Patos, com localizações das linhas de resistividade elétrica, dos poços produtivos e dos afloramentos de mármores e gnáisses migmatizados. Modificado de Gonzaga & Oliveira (1998) e de carta do IBGE.

### 5.5. MODELAGEM DOS DADOS

Os dados de campo foram modelado por meio do software *RESIX2DI da Interpex Ltd.* (Interpex 1997). Esse programa calcula a resposta direta de um semi-espço homogêneo usando uma rotina de elementos finitos desenvolvida por Rijo (1977). Ele emprega um método rápido de inversão por mínimos quadrados de dados de resistividade

aparente, usando uma técnica de otimização não-linear, que está descrita em detalhes em Loke & Barker (1995), e uma técnica quasi-Newton que evita o consumo de tempo no cálculo das derivadas parciais (Loke & Barker, 1996). O método de regularização escolhido para estabilizar a inversão foi baseado em *Occam's Razor*, o qual otimiza suavemente. Como o alvo da pesquisa foram as fraturas, foi dada preferência para ênfase aos limites verticais, uma vez que a maioria delas aflora com atitude subvertical.

A rotina de trabalho consistiu em gerar, a partir dos dados observados, um modelo de resistividade e profundidade, que foi comparado matematicamente e visualmente com os dados observados, a partir de um modelo sintético de resistividade aparente. As pseudo-seções, com os valores de resistividade aparente coletados no campo, os modelos de resistividade aparente (sintético) e os modelos de resistividade e profundidade são apresentados em conjunto com as figuras.

Após o tratamento computacional dos dados, os modelos de resistividade e profundidade foram integrados com informações geológicas e hidrogeológicas. Essa integração de dados permitiu a construção de seções geoeletricas que serão apresentadas a seguir.

## **6. RESULTADOS**

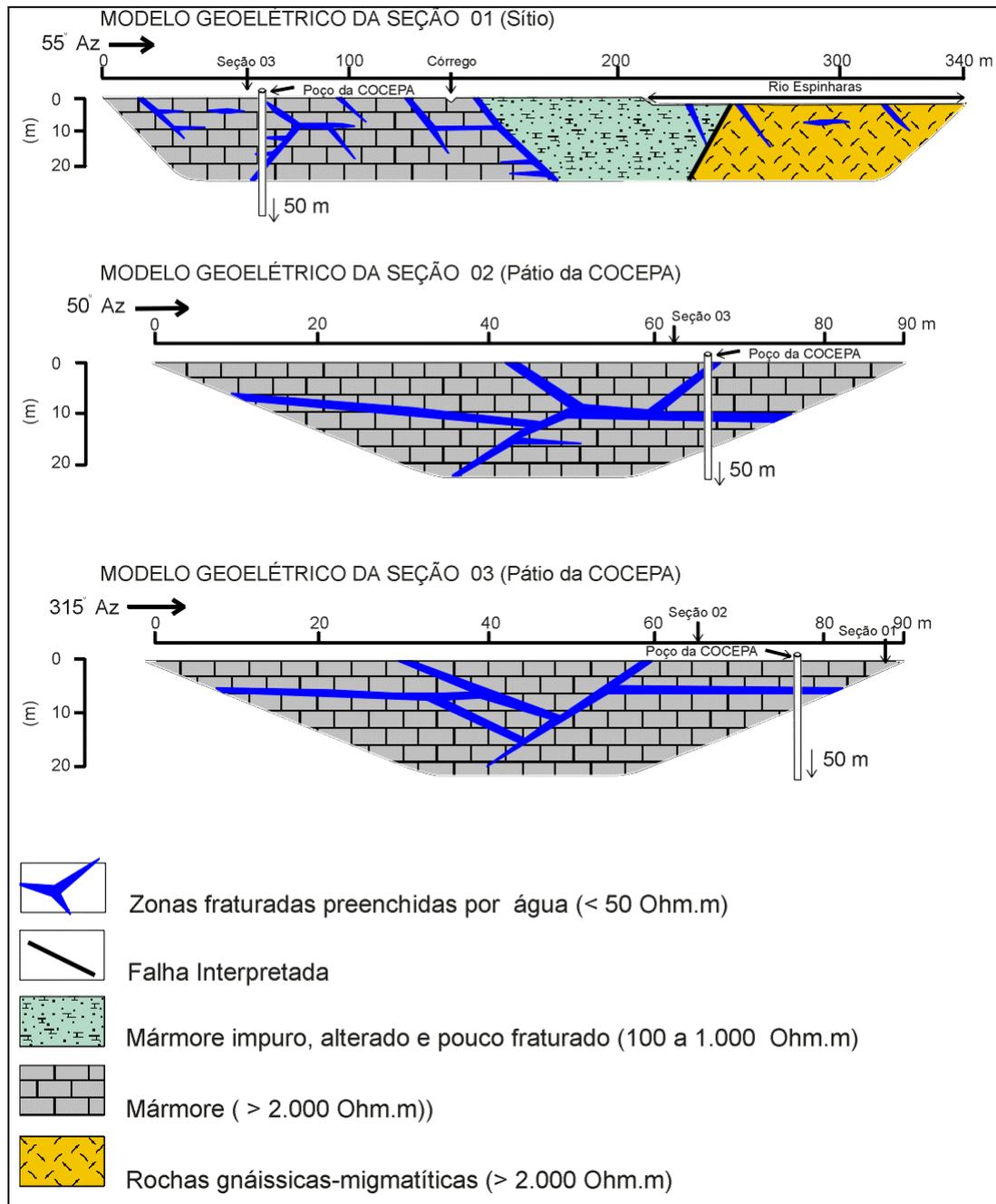
As interpretações das seções foram realizadas com base nos dados de resistividade elétrica, geológicos e estruturais. Essa introdução de informações geológicas permite reduzir a ambigüidade inerente aos métodos geofísicos.

### **6.1. LINHA 1**

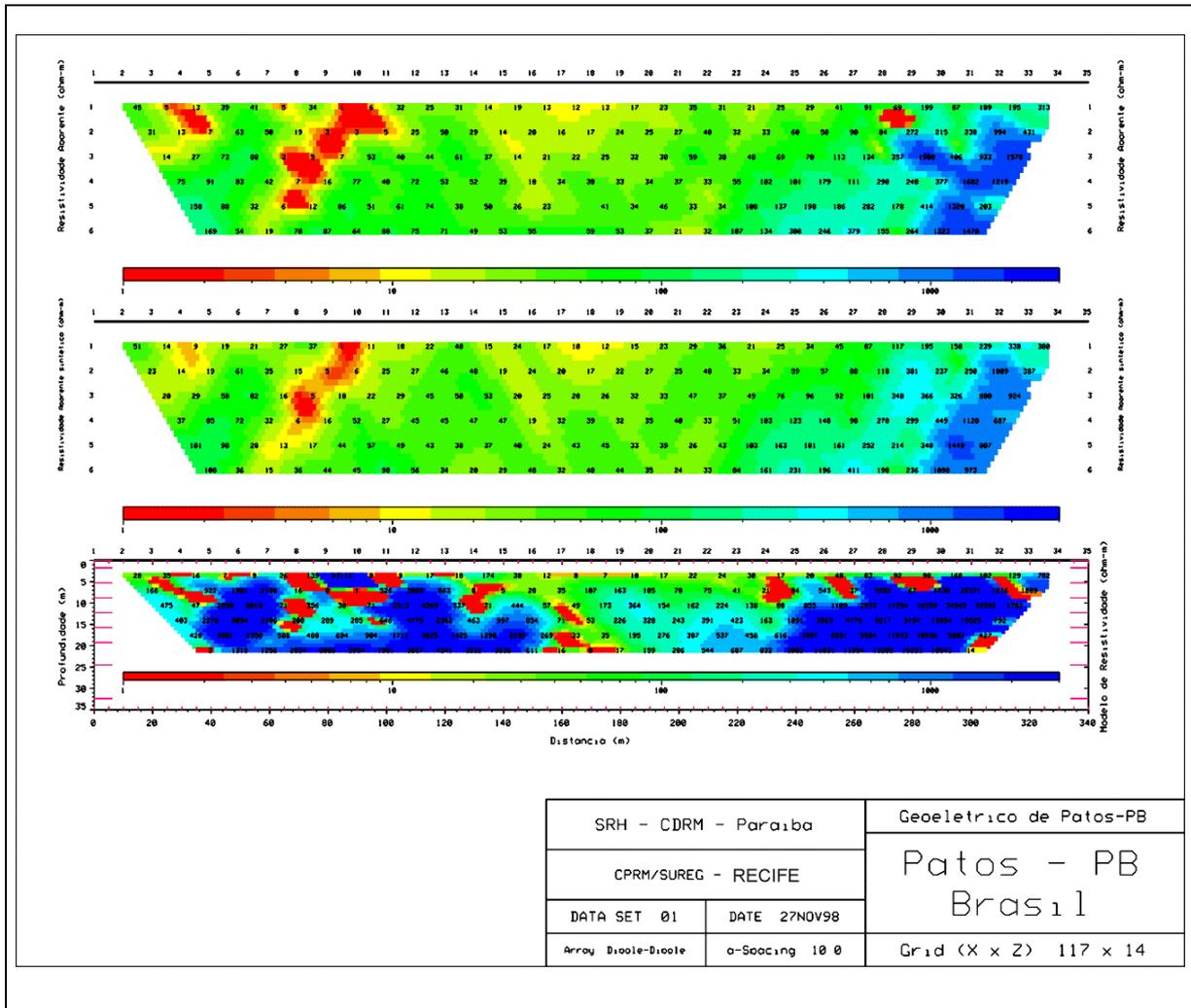
Esta seção foi localizada 20 m a nordeste do poço da COCEPA. No seu início, próximo a Rua Horácio Nóbrega, ocorrem afloramentos de mármore, e no seu final, no leito do rio Espinharas, afloram gnáisses migmatizados. O contato entre a zona de domínio dos mármore e a zona de domínio dos gnáisses está claramente marcada por forte contraste de resistividade nas proximidades do barranco do rio (Figuras 3 e 4).

No trecho centro-nordeste da seção foram definidos mármore alterados e poucos fraturados. É possível inferir para essa região um solo autóctone mais espesso. As resistividades não muito altas (< 500 Ohm.m) podem indicar a presença de argilas ou rochas impregnadas com água, refletindo o comportamento de coberturas cristalinas alteradas. Os sistemas fraturados, identificados a partir do padrão retilíneo e interligado das faixas de baixa resistividade, ocorrem principalmente na metade sudoeste da seção.

Uma dessas zonas (65 m) coincide com a posição do poço da COCEPA. As fraturas posicionadas nos gnáisses são rasas e estão relacionadas com pequenos vales e um córrego poluído no leito seco do rio.



**Figura 4.** Modelo geolétricos qualitativos das linhas 1, 2 e 3, construídos a partir dos modelos de resistividades obtidos por inversão dos dados de resistividades aparentes das pseudo-seções medidas em campo. Eles integram informações geofísicas, geológicas e hidrogeológicas.



**Figura 4.** Pseudo-seção da linha 1 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.

## 6.2 - LINHAS 2 E 3 (PÁTIO DA COCEPA)

Estas seções foram levantadas no pátio da COCEPA, em posição adjacente ao poço. Ao longo das duas seções domina um sistema de fraturamento intenso e interligado (Figuras 3, 5 e 6). Os baixos valores de resistividade sugerem a presença de água. No entanto, observa-se que as fraturas estão restritas aos primeiros 15 m de profundidade; a partir daí o padrão de resistividade demonstra o predomínio de rochas compactas.

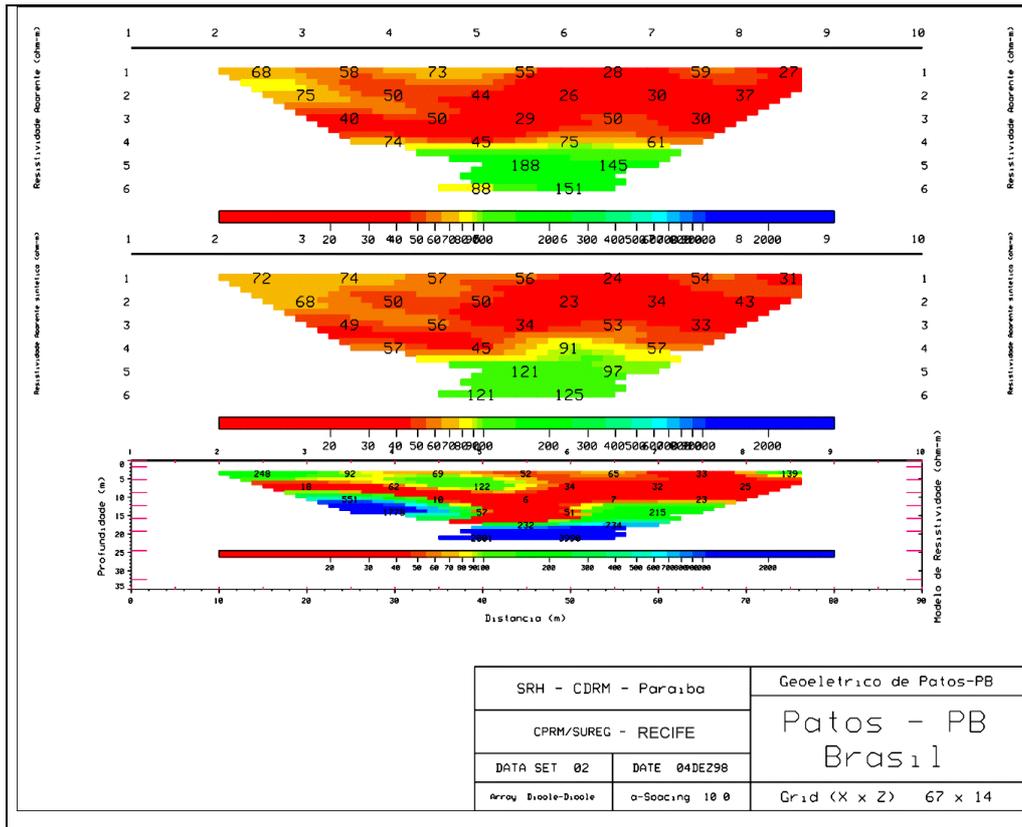
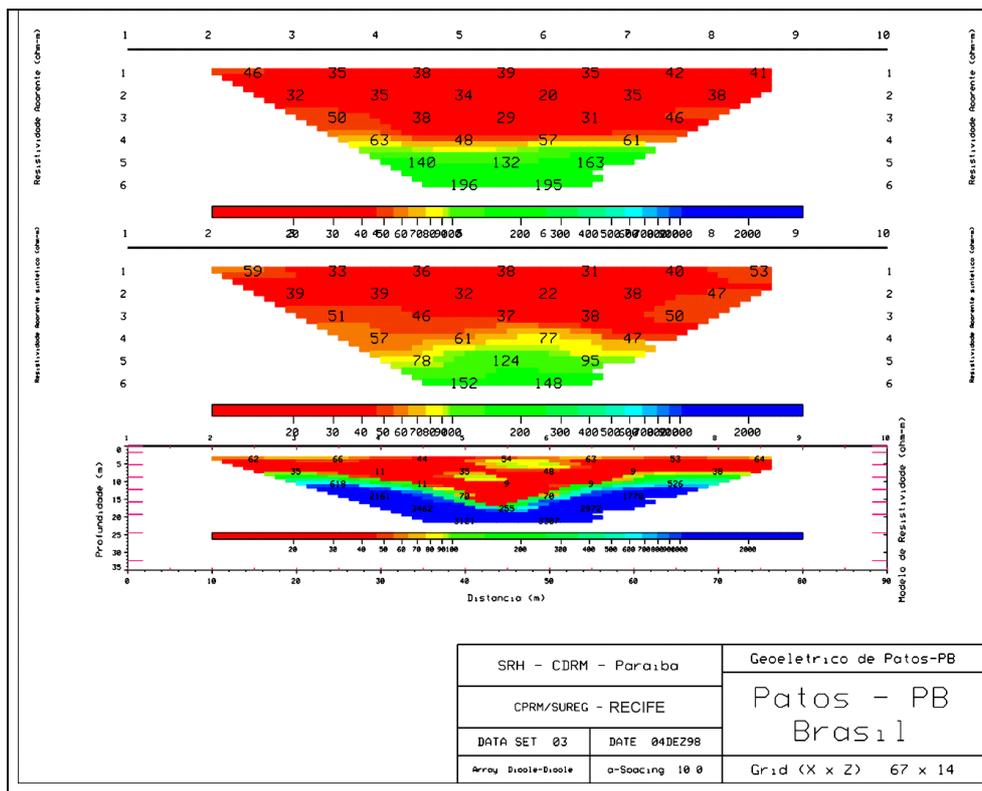


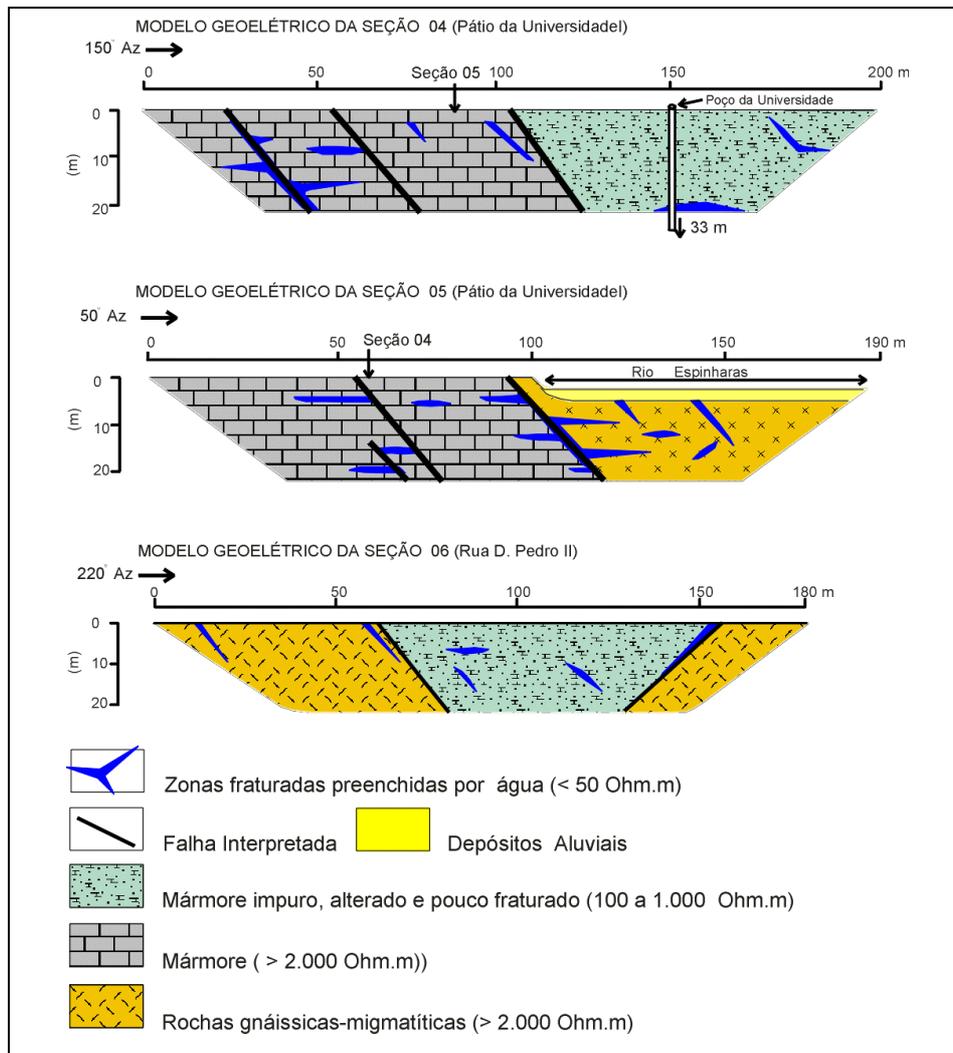
Figura 5. Pseudo-seção da linha 2 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.



**Figura 6.** Pseudo-seção da linha 3 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes

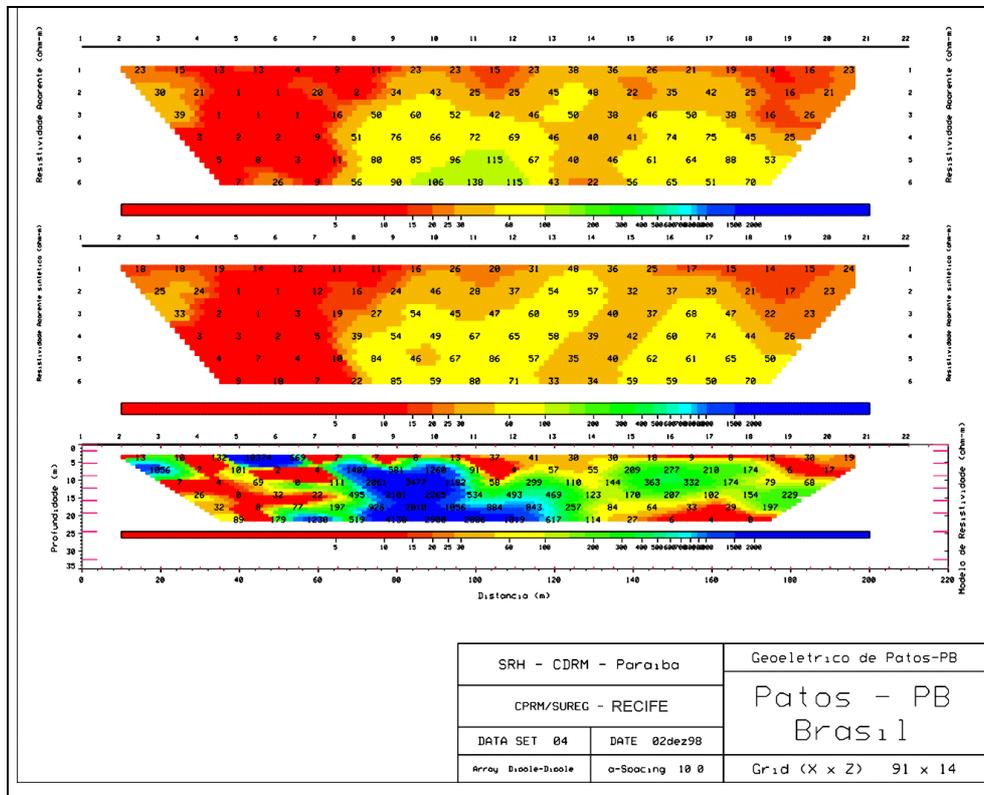
### 6.3. LINHA 4 (PÁTIO DA UNIVERSIDADE)

Esta seção foi levantada no pátio da universidade, ao lado do ginásio em construção. Observa-se que o padrão de baixa resistividade, relacionado com zonas fraturadas, ocorre na extremidade noroeste da seção, em um terreno baldio, localizado adjacente à extremidade da rua Cândido Laranjeiras (Figuras 7 e 8). É possível interpretar a presença de uma falha, cujo padrão de resistividade atinge profundidades superiores a 20 m e, a partir da qual, ramificam-se fraturas horizontais. Nesse local ocorre uma pequena quebra de relevo, com um pequeno vale que interliga-se com a calha do rio.



**Figura 7.** Modelos geoeletricos qualitativos das linhas 4, 5 e 6, construídos a partir dos modelos de resistividades obtidos por inversão dos dados de resistividades aparentes das

pseudo-seções medidas em campo. Eles integram informações geofísicas, geológicas e hidrogeológicas.



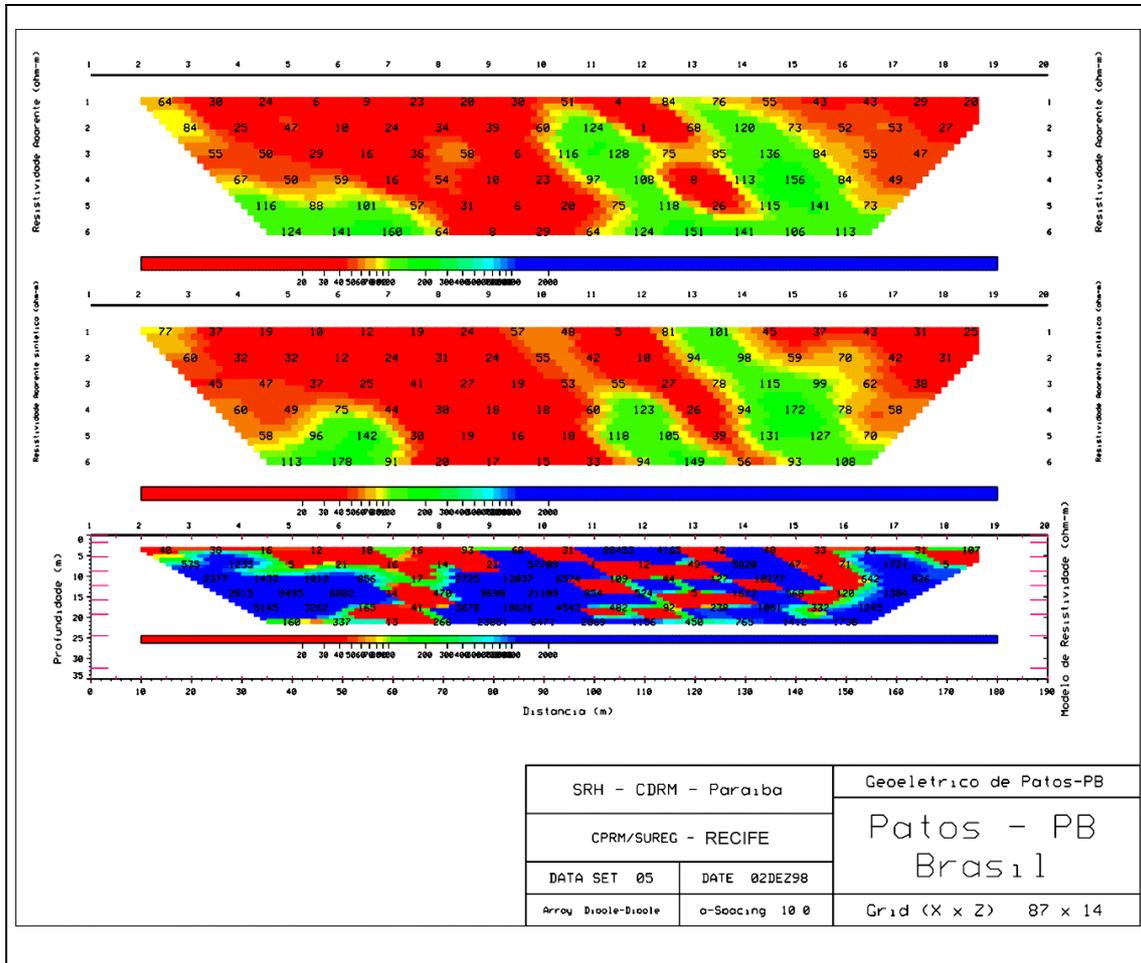
**Figura 9.** Pseudo-seção da linha 4 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.

Na parte central da seção dominam rochas compactas (resistividades altas) com fraturas rasas. Na extremidade sudeste, a parte rasa da seção apresentada baixas resistividades que podem indicar infiltração a partir do córrego poluído que ocorre nas proximidades. Em profundidade estão localizadas zonas de baixa resistividade que podem representar fraturas relacionadas à alimentação do poço localizado em posição lateral a esse trecho do perfil.

#### 6.4. LINHA 5 (PÁTIO DA UNIVERSIDADE)

Essa seção foi realizada em posição perpendicular a seção 4. Destacam-se dois sistemas principais de fraturas, possivelmente relacionados com falhas e com o contato mármore/migmatito (Figuras 8 e 10). Observa-se que o sistema de fraturas com mergulho, interliga-se com o sistema horizontalizado. Com exceção das zonas fraturadas, todo o resto da seção é constituído por rochas compactas de alta resistividade (>2.000 Ohm.m).

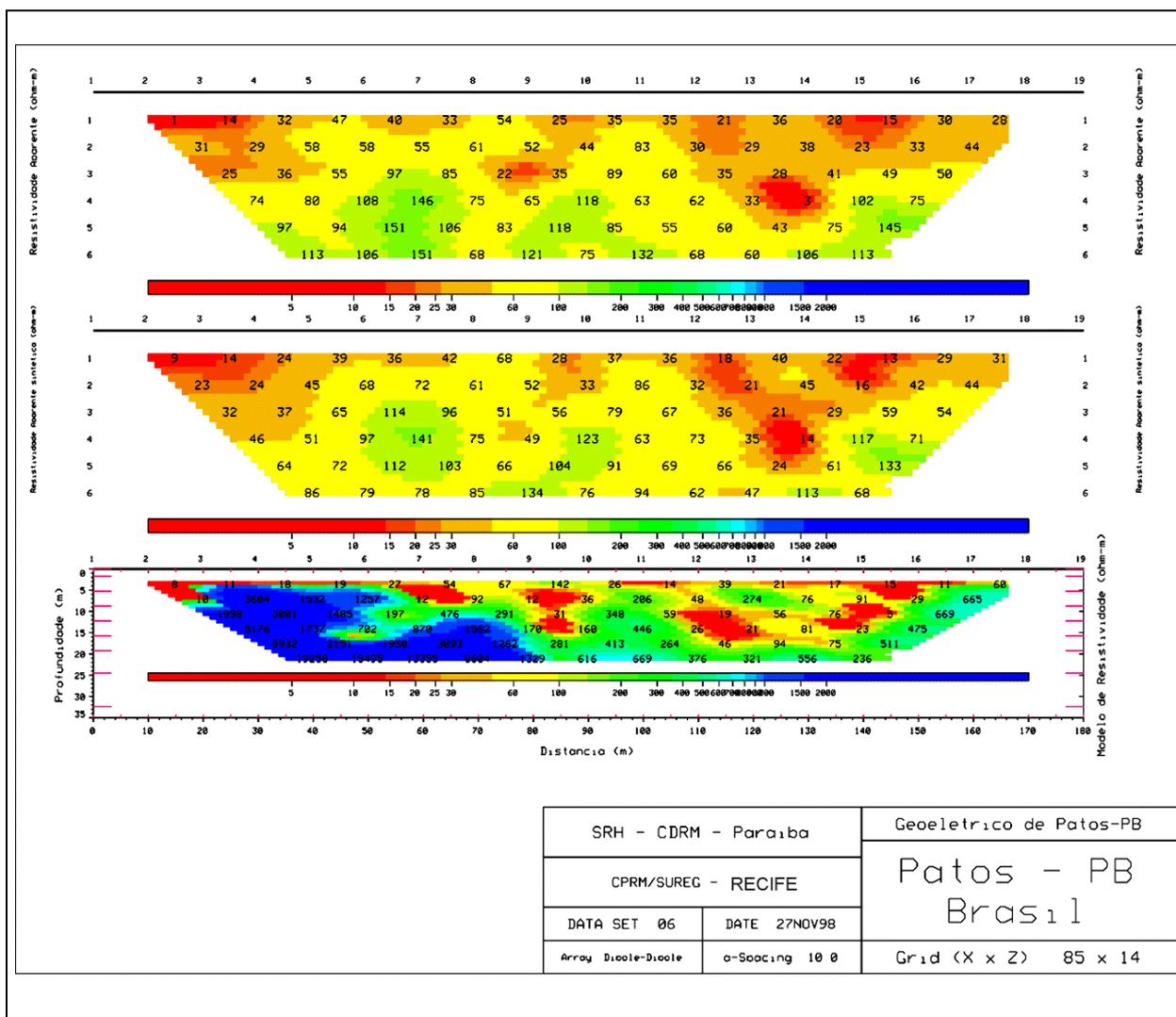
Os sistema fraturados aparentemente prosseguem além da profundidade de 20 m, exceto as fraturas interpretadas no Complexo Gnáissico.



**Figura 10.** Pseudo-seção da linha 5 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.

### 6.5. LINHA 6 (RUA DOM PEDRO II)

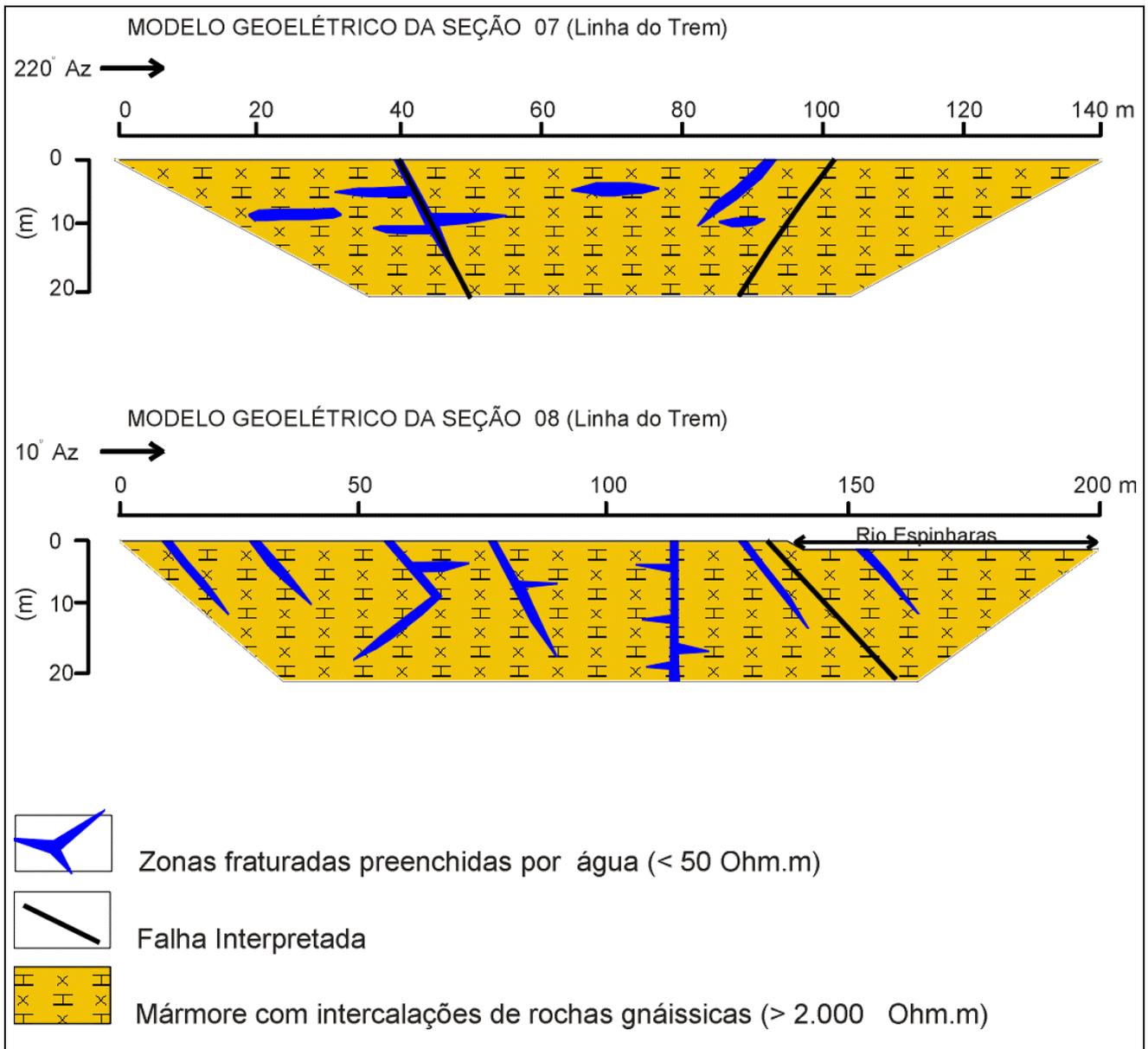
Essa seção foi realizada em um área descampada que ocorre em torno da rua Dom Pedro II. Observa-se que as fraturas interpretadas são discretas e sem interligações (Figuras 8 e 11). Esse aspecto levou a interpretação na parte mediana da seção, onde dominam resistividades inferiores a 500 Ohm.m, de um corpo litológico com alterações parciais para argila. É possível esperar para essa região um solo autóctone mais espesso, ou presença de material alóctone, talvez um aterro. É possível que o local tenha sido em épocas anteriores um baixo topográfico com presença de corpo d'água, o que teria causado uma alteração mais profunda do substrato, seja ele mármore ou gnáisse.



**Figura 11.** Pseudo-seção da linha 6 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.

## 6.6. LINHAS 7 E 8 (LINHA DO TREM)

Essas seções foram levantadas ao longo da rua lateral à linha de trem, onde está localizada a garagem da empresa de transporte Guanabara. A subdivisão em duas foi causada pela presença do bueiro de um riacho no trecho mediano da rua. O final da linha 8 ocorre no leito do rio Espinharas, onde afloram gnáisses. As duas seções apresentam um intenso padrão de fraturamentos que afetam gnáisses e mármores (Figuras 12, 13 e 14). Na maioria dos casos as fraturas apresentam profundidades inferiores a 15 m.



**Figura 12.** Modelos geoeletricos qualitativos das linhas 7 e 8, construídos a partir dos modelos de resistividades obtidos por inversão dos dados de resistividades aparentes das pseudo-seções medidas em campo. Eles integram informações geofísicas, geológicas e hidrogeológicas.

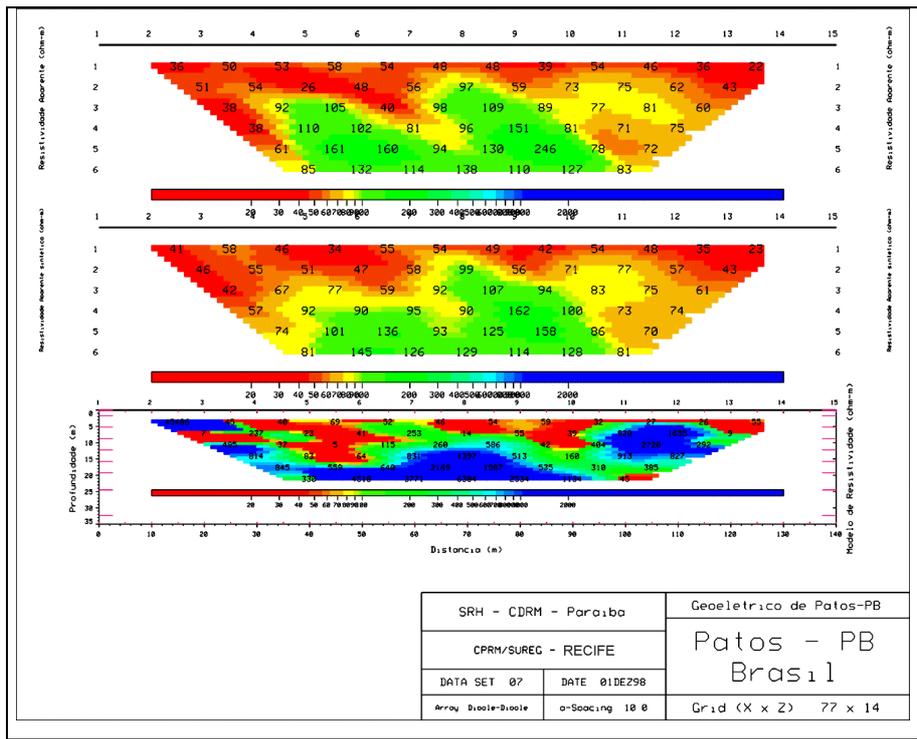


Figura 13. Pseudo-seção da linha 7 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.

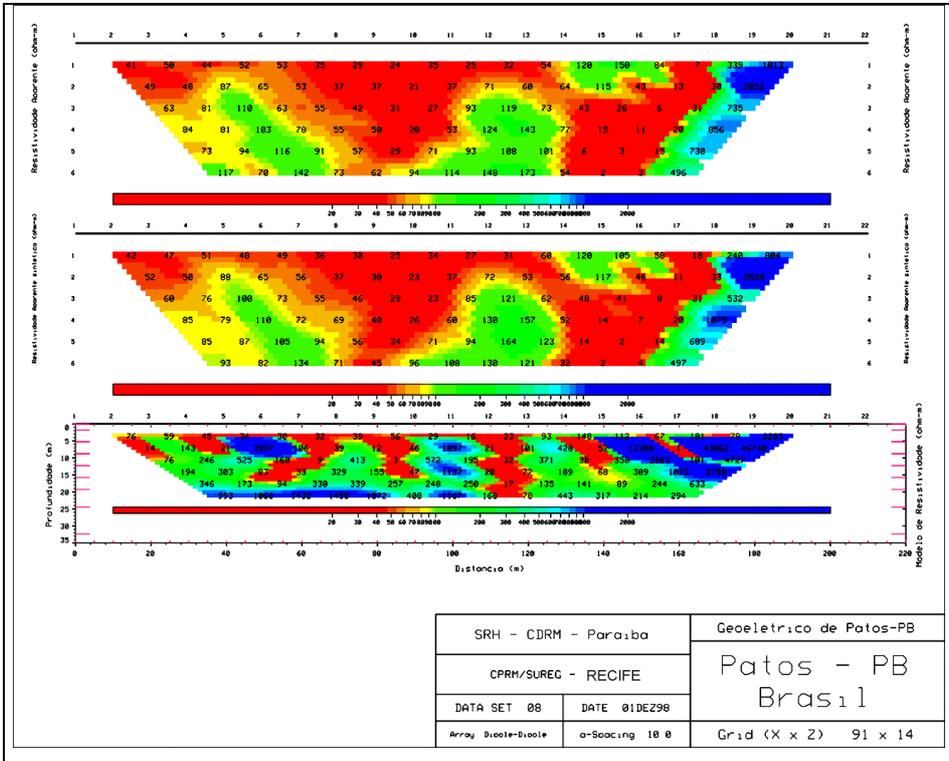
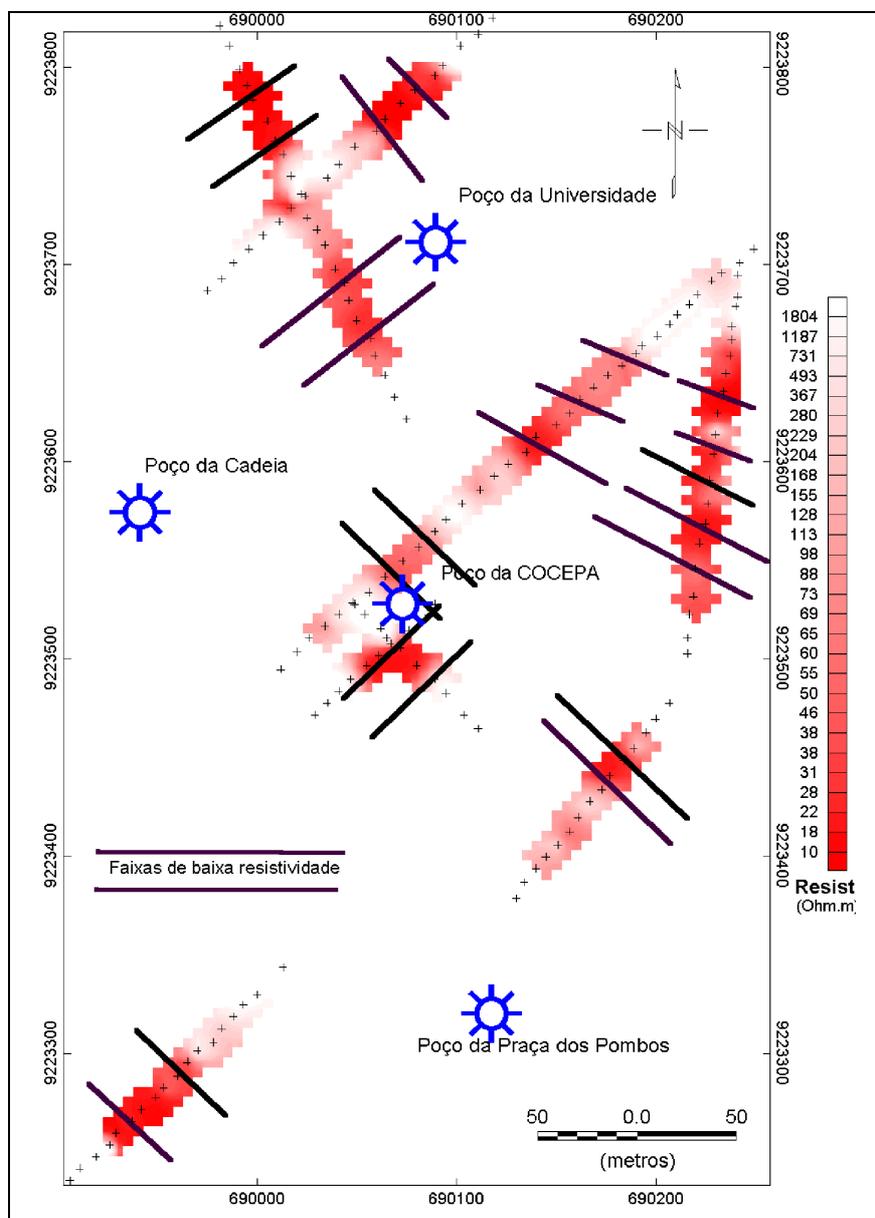


Figura 14. Pseudo-seção da linha 8 e modelo de resistividades e profundidades obtido por inversão das resistividades aparentes.

## 6.7. REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EM MAPA

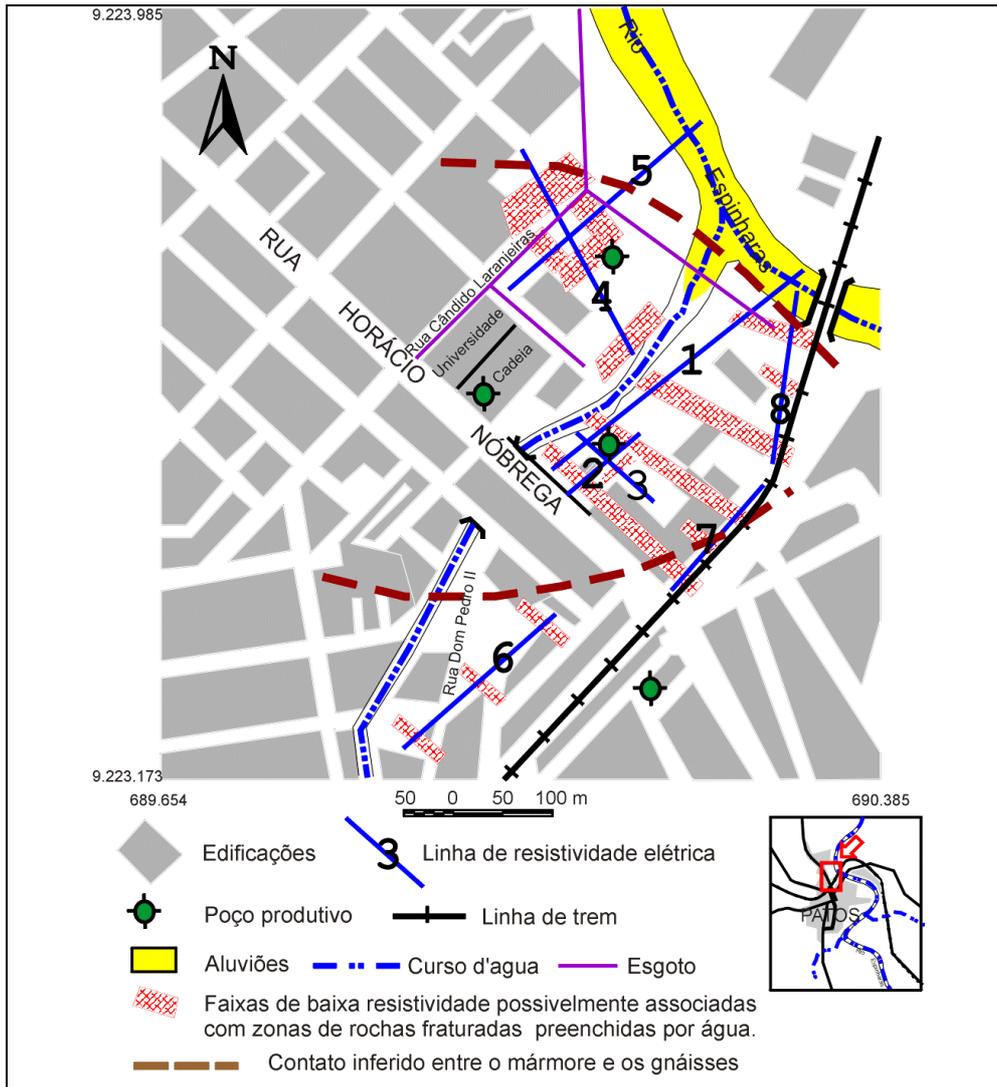
Os dados dos modelos de resistividades e profundidades foram interpolados por mínima curvatura, considerando a profundidade de 15 m. O objetivo desse procedimento foi a visualização da variação do comportamento do sistema fraturado com a profundidade e a identificação da distribuição em mapa desse sistema. O resultado está apresentado na Figura 15. Os tons mais avermelhados correspondem as zonas de baixas resistividades, que são interpretadas como faixas de rochas fraturadas preenchidas por água.



**Figura 15.** Resultado da interpolação dos dados de resistividade para profundidade de 15 m. Os tons mais avermelhados representam faixas de baixa resistividade, provavelmente relacionadas com rochas fraturadas preenchidas com água.

Observa-se que os sistemas fraturados articulam-se em duas direções principais: NE-SW e NW-SE. Em função da pequena cobertura do levantamento, não é possível afirmar a direção exata, porém, é possível verificar a concordância dessas direções com aquelas das fraturas abertas identificadas no campo.

A Figura 16 é também uma representação em mapa dos resultados do levantamento. Verifica-se que o poço da COCEPA (40.000 litros/h) está posicionado no encontro de sistemas de fraturas. O prolongamento desses sistemas coincide com a posição do poço do Presídio. Destaca-se também uma área muito favorável no terreno baldio ao lado da rua Cândido Laranjeiras, vizinho ao pátio da Universidade. É importante também verificar a correlação de zonas fraturadas com o contato nordeste, inferido entre os mármore e os gnáisses.



**Figura 16.** Detalhe da área urbana da cidade de Patos, com localizações das seções de resistividade elétrica, dos poços produtivos e das faixas de baixa resistividade, possivelmente associados com zonas de rochas fraturadas preenchidas com água.

## 7 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES DOS RESULTADOS

O padrão de deformação frágil é definido nos mármore por quatro sistemas principais de fraturas abertas:  $70^{\circ}/200^{\circ}\text{Az}$ ,  $75^{\circ}/250^{\circ}\text{Az}$ ,  $\text{Sub}/0^{\circ}\text{Az}^*\text{Direção}$  e  $\text{Sub}/230^{\circ}\text{Az}^*\text{Direção}$ . O rio Espinharas, na região da cidade de Patos, está encaixado em fraturas bem definidas, sugerindo um sistema em formato romboédrico, característico de ambiente de distensão.

A análise e a correlação dos dados de resistividade com informações geológicas conhecidas permitiu identificar três tipos de padrões geoeletricos (fraturas, falhas, mármore, mármore alterado e gnáisses).

Observa-se que a acumulação de água no aquífero fissural da região do Presídio ocorre em sistemas de fraturas abertas localizadas preferencialmente em mármore, em parte interconectadas e, correlacionadas com faixas de baixa resistividade (< 10 Ohm.m).

O contato entre a zona de domínio dos mármore, com a zona de domínio dos gnáisses está claramente marcada por forte contraste de resistividade, que pode indicar a existência de estruturas favoráveis à presença de água.

As fraturas ocorrem de forma regular e espaçada, com os sistemas individuais apresentando interconexões entre fraturas com mergulho forte e fraturas horizontalizadas (em corte). Eles articulam-se em duas direções principais, NE-SW e NW-SE, em concordância com as direções das fraturas abertas identificadas em campo.

Nas proximidades do poço da COCEPA ocorre um padrão de fraturamento intenso e interligado, porém observa-se que as fraturas estão restritas aos primeiros 15 m de profundidade; a partir desta profundidade os valores de resistividade demonstram o predomínio de rochas compactas. Observa-se também, que o prolongamento desse sistema de fraturas coincide com a posição do poço do Presídio.

Os resultados indicam que o aquífero é raso e possui fortes conexões com a água dos níveis superficiais. Por isso, devido a sua alta vulnerabilidade e a presença de cargas contaminantes de diversas naturezas (esgotos sanitários, resíduos sólidos, etc), é necessário que haja um contínuo monitoramento da qualidade das suas águas.

## **7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- CDRM. 1982. *Mapa Geológico do Estado da Paraíba, escala 1:500.000*. CDRM/DNPM.
- FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R.C.; ROCHA, G.A. 1988. Riscos de poluição de águas subterrâneas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5*, São Paulo, Anais, ABAS, p. 175-185.
- GONZAGA, F.A.S.; OLIVEIRA, J.J.C. 1998. *Estudo geológico preliminar da área do Presídio Regional de Patos*. CDRM, Divisão de Hidrogeologia e Sondagem, Campina Grande, PB. 3 p.
- LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1995. Least-square deconvolution of apparent resistivity pseudosection. *Geophysics*, **60**:6(1682-1690).
- LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44** (131-152).
- INTERPEX LTD. 1997. RESIX2DI, 2D Resistivity and induced polarization smooth inversion. User's Manual, V1. 185 p.

RIJO, L. 1977. *Modelling of Electric and Electromagnetic Data*. Ph.D Thesis, University of Utah, Michigan.

SCHEID, C ; FERREIRA, C. A. 1991. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenético-previsional (folha SB.24-Z-D-I – Patos). Escala 1:100.000, Estados de Pernambuco e Paraíba*. Brasília, DNPM/CPRM.