

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Geociências

Monografia

**Geofísica aplicada (eletrorresistividade) à prospecção de aquíferos na Formação
Serra Geral – RS**

TF Nº: 22/53

Samuel Sekito Matsuura

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental

São Paulo

2022

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e guia durante todo o período como estudante universitário.

À minha família, especialmente aos meus pais pelo apoio incondicional durante toda a minha vida e pelo investimento no ensino de qualidade mesmo nos momentos de dificuldade.

A todos os professores que estiveram presentes durante a minha vida acadêmica, especialmente ao professor José Domingos Faraco Gallas, por ter sido meu orientador, pela oportunidade, pela sua paciência, disponibilidade de sempre estar me ajudando diretamente e por todos os ensinamentos passados.

Aos meus amigos que fizeram parte da minha formação, pela confiança e todas as boas experiências que me motivou para chegar até o final desta etapa.

Ao Henrique Soares de Sá, por ter me dado um norte para a escolha do tema para o Trabalho de Formatura, por todo o apoio e oportunidades dadas.

A todos que direta ou indiretamente fez parte durante o meu progresso acadêmico.

SUMÁRIO

1.	RESUMO	3
2.	ABSTRACT.....	4
3.	INTRODUÇÃO.....	5
4.	OBJETIVO E METAS.....	5
5.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
5.1	Geologia Regional	6
5.1.1	Bacia do Paraná.....	6
5.1.2	Supersequência Gondwana III.....	8
5.1.3	Formação Serra Geral	10
5.2	Geologia Local	10
5.3	Hidrografia Local.....	10
5.4	Trabalhos Prévios	11
6.	MATERIAIS E MÉTODO	12
6.1	Materiais.....	12
6.2	Método - Eletrorresistividade	12
6.3	Técnica - Caminhamento Elétrico	14
6.4	Disposição dos arranjos em campo	15
7.	RESULTADOS OBTIDOS.....	15
7.1	Área dos trabalhos.....	15
7.2	Pseudo-seções de resistividade aparente e seções de resistividade modelada....	17
7.3	Mapas de resistividade	21
7.4	Blocos-diagrama das resistividades modeladas	24
8.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	26
9.	CONCLUSÃO	27
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

1. RESUMO

O Trabalho de Formatura consiste no processamento e interpretação de dados de levantamento geofísico de eletrorresistividade visando a indicação de locais mais favoráveis para perfuração de poços tubulares profundos. O método geofísico empregado foi o de eletrorresistividade, com arranjo dipolo-dipolo e foi aplicado para indicar os locais com anomalias de baixa resistividade, em que são locais potenciais para captação de água subterrânea. Como a área é de ocorrência de rochas cristalinas (Formação Serra Geral), os aquíferos só podem ocorrer em fraturas, em que possuem baixa resistividade devido à alta concentração de íons dissolvidos. O uso do método indireto, juntamente com a análise e correlação com as estruturas regionais/lokais, tem mostrado boa eficácia na otimização das escolhas de locais para perfuração de poços. Neste trabalho são apresentadas as pseudo-seções de resistividade aparente, seções modeladas de resistividade e mapas de resistividade de diferentes níveis, obtidas através de processamento dos dados pelos softwares RES2DINV e Surfer 8. Nas foram projetadas as áreas de baixa resistividade e a interligação das mesmas resultou na interpretação de duas estruturas de zonas fraturadas. Por fim foram indicadas cinco locais mais favoráveis para a perfuração do poço tubular, e o poço perfurado foi locado na estaca em que foi considerado como prioridade 3 neste trabalho. A vazão registrada foi de 72,5 m³/h, o que corrobora a eficácia da locação de poços tubulares profundos por meio de eletrorresistividade.

2. ABSTRACT

The graduation work consists of processing and interpreting data from an electroresistivity geophysical survey to indicate the most favorable locations for drilling deep tube wells. The geophysical method used was electroresistivity, with dipole-dipole arrangement and was applied to indicate the sites with low resistivity anomalies, which are potential sites for groundwater extraction. As the area is of crystalline rock occurrence (Serra Geral Formation), aquifers can only occur in fractures, in which they have low resistivity due to the high concentration of dissolved ions. The use of the indirect method, together with the analysis and correlation with regional/local structures, has shown good effectiveness in optimizing the choices of sites for well drilling. In this graduation work are presented the apparent resistivity pseudo sections, modeled resistivity sections and resistivity maps of different levels, obtained through data processing by RES2DINV and Surfer 8 software. In these the areas of low resistivity were projected and their interconnection resulted in the interpretation of two fracture zone structures. Finally, five most favorable locations were indicated for the drilling of the tube well, and the drilled well was located in the stake that was considered as priority 3 in this work. The recorded flow rate was 72.5 m³/h, which corroborates the effectiveness of locating deep tube wells by means of electrorresistivity.

3. INTRODUÇÃO

Os aquíferos possuem importante papel no abastecimento de água no Brasil. Segundo as estatísticas (ANA, 2010), dentre a totalidade dos municípios brasileiros, 52% destes são abastecidos por águas subterrâneas, sendo que 36% fazem uso somente desta origem. Vale citar que a construção de poços para a captação do recurso são obras na maioria das vezes simples e rápidas. No caso de poços em rochas cristalinas – caso deste trabalho – pode ser finalizado em apenas uma semana, e a sua operação e manutenção possui custo baixo (Hirata *et al.*, 2019).

Por esta razão, o uso de poços para o abastecimento de água é uma opção com vantagens significativas, como proximidade do poço da área de consumo. Além disso, em boa parte dos casos, as águas subterrâneas (áquiferos confinados) dispensam tratamento.

No entanto, para a perfuração e construção de um poço, é necessária a realização de análise de viabilidade adequada. Caso contrário, há a chance da sua instalação resultar em obtenção de vazões mais baixas (ou até nulas) que as esperadas. Para diminuir este tipo de risco, existem métodos geofísicos – e.g. sísmica, eletrorresistividade, eletromagnético etc. – que são eficientes na avaliação de favorabilidade.

Este trabalho consiste no estudo de uma área em que foi aplicado o método geoelétrico da eletrorresistividade para detecção de locais favoráveis à instalação de poços tubulares profundos para exploração de água subterrânea. A perfuração já foi realizada e obteve-se excelentes resultados, e os seus dados serão mostrados no trabalho.

4. OBJETIVO E METAS

Este Trabalho de Formatura visa familiarizar o aluno com a geofísica aplicada e seus aspectos práticos no âmbito profissional em um caso real de aplicação dos métodos e técnicas geofísicas. De modo mais concreto, o principal objetivo do trabalho é a otimização da escolha de local favorável para a perfuração do poço tubular em aquíferos fraturados, através do método geofísico de eletrorresistividade.

Para este fim foram enumeradas as principais metas/etapas:

- 1- Análise da imagem de satélite e inferência dos principais lineamentos.
- 2- Processamento dos dados do levantamento geofísico para obtenção das pseudo-seções de resistividade aparente e seções modeladas de resistividade.
- 3- Elaboração do mapa de resistividade.
- 4- Análise dos resultados de processamento, indicando os locais com a resistividade mais baixa (áreas fraturadas) em cada seção e no mapa.

- 5- Correlação de cada linha com o mapa de resistividade para inferir as principais estruturas de fraturas na região, verificando se coincidem com as direções dos lineamentos inferidos através da imagem de satélite.
- 6- Indicação do(s) local(is) mais propício(s) para a perfuração do poço tubular.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 Geologia Regional

5.1.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná constitui uma enorme região sedimentar da América do Sul, possuindo uma sucessão sedimentar-magmática com idades desde o Neo-Ordoviciano até Neo-Cretáceo (Milani, 2004), atingindo até 7.000 m. de espessura no seu depocentro (Zalán *et al.*, 1988). Geograficamente, possui área total que excede 1.500.000 km², estando distribuídos entre o Brasil meridional, nordeste da Argentina, Paraguai oriental e norte do Uruguai. Considerada como uma bacia do tipo intracratônica (Milani, 2004), com formato levemente oval e o seu eixo principal aproximadamente na direção N-S (Figura 1).

A evolução da bacia se iniciou no Paleozoico, com os primeiros depósitos datados no Neo-Ordoviciano, terminando com a extrusão de um espesso pacote de lavas basálticas durante o Cretáceo. No território brasileiro, dois terços estão cobertos pelos derrames de basalto, que atingem aproximadamente 1.300 m. de espessura, e quando somados às rochas intrusivas chegam a 2.000 m. (Zalán *et al.*, 1987).

De acordo com Milani (1997), o preenchimento sedimentar e a evolução da bacia estão relacionados às orogenias que atuaram na borda oeste da Plataforma Sul-Americana, sendo dividido por seis supersequências: Rio Ivaí (Neo-Ordoviciano – Eo-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Neo-Carbonífero – Eo-Triássico), Gondwana II (Meso-Triássico – Neo-Triássico), Gondwana III (Neo-Jurássico – Eo-Cretáceo) e Bauru (Eo-Cretáceo – Neo-Cretáceo).

O magmatismo Serra Geral, alvo deste trabalho, está incluído na Supersequência Gondwana III.

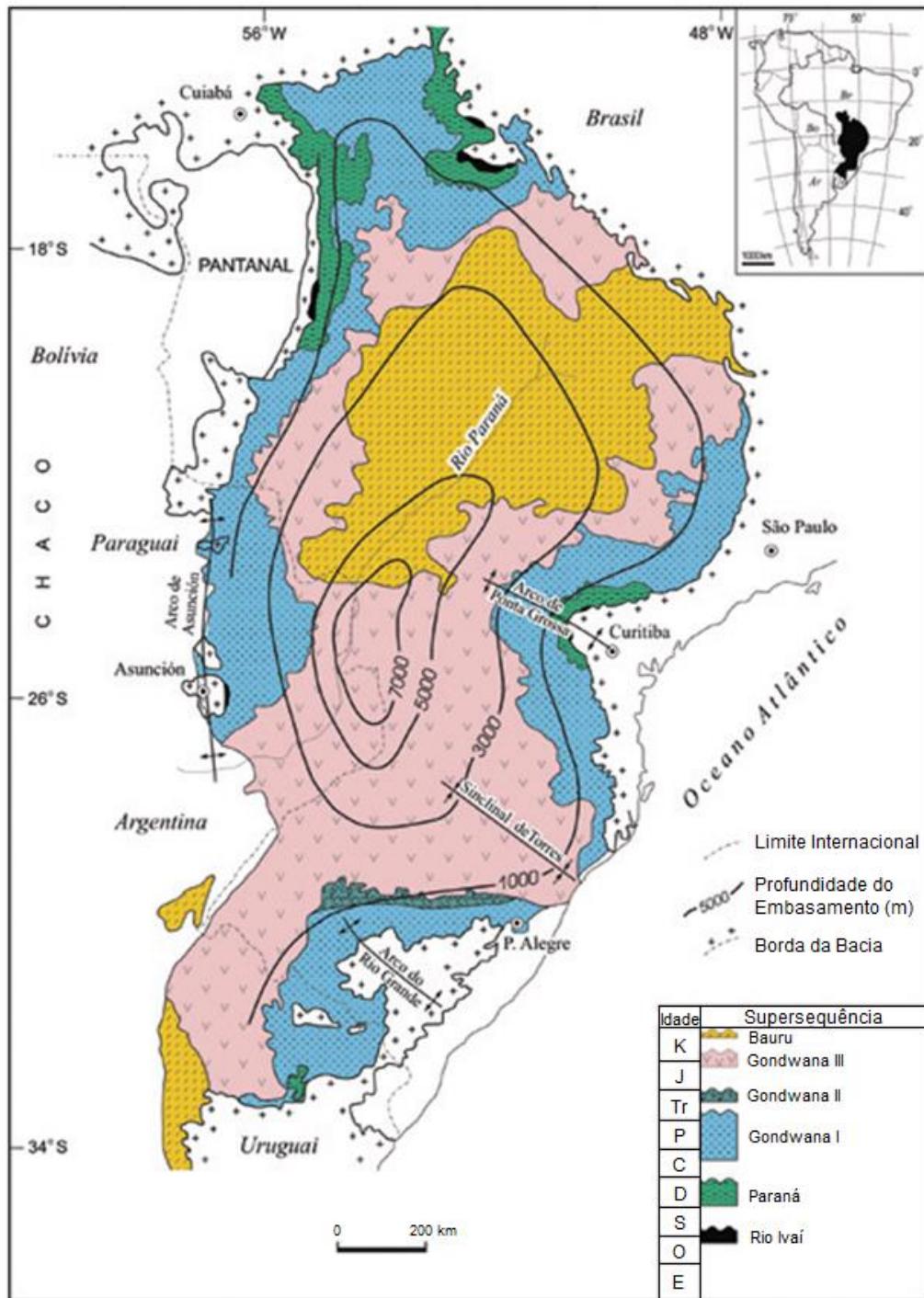


Figura 1 – Mapa simplificado da Bacia do Paraná e a distribuição no tempo das diversas unidades do seu registro estratigráfico (Milani, 2004).

Em relação às estruturas regionais da bacia, são encontrados dois estilos principais: deformações associadas a intrusões ígneas e deformações associadas às reativações de elementos tectônicos lineares dispostos na direção NE e NW. O embasamento cratônico da bacia tem estruturação NE, possuindo os seus blocos limitados por falhas. A orientação NW dos diques de diabásio está relacionada à ruptura continental (Zalán *et al.*, 1991; Artur & Soares, 2002).

Na área em que foi realizado o estudo, foi realizada uma interpretação prévia dos lineamentos estruturais através das imagens de satélite (Figura 2). Nela é possível verificar a conformidade das direções delas com as estruturas regionais da bacia.



Figura 2 – Localização da área em que foram feitos os levantamentos de eletrorresistividade (elipse amarela), com as interpretações dos lineamentos marcadas (retas brancas). Nota-se que as principais estruturas estão aproximadamente em direção NE e NW (Google Earth).

5.1.2 Supersequência Gondwana III

Também denominada como “Sequência Jurássica Eo-Cretácea” (Milani *et al.*, 1994), compreende o intervalo da coluna estratigráfica da Bacia do Paraná onde estão dispostas as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Figura 3) e os sedimentos eólicos da Formação Botucatu. A Formação Botucatu é constituída de arenitos finos a médios, quartzosos de coloração vermelha, rósea ou amarela-clara, geralmente bem selecionados. São resultantes de formação eólica, com ocorrência de estratificação cruzada de grande porte. Sotoposta aos arenitos da Formação Botucatu está a Formação Serra Geral, a maior ocorrência de vulcanismo fissural ocorrida em região continental (Guimarães & Motta, 2016). Essa manifestação é a resposta magmática dos estágios precoces da ruptura do Gondwana e da abertura do Atlântico Sul (Milani & Ramos, 1998).

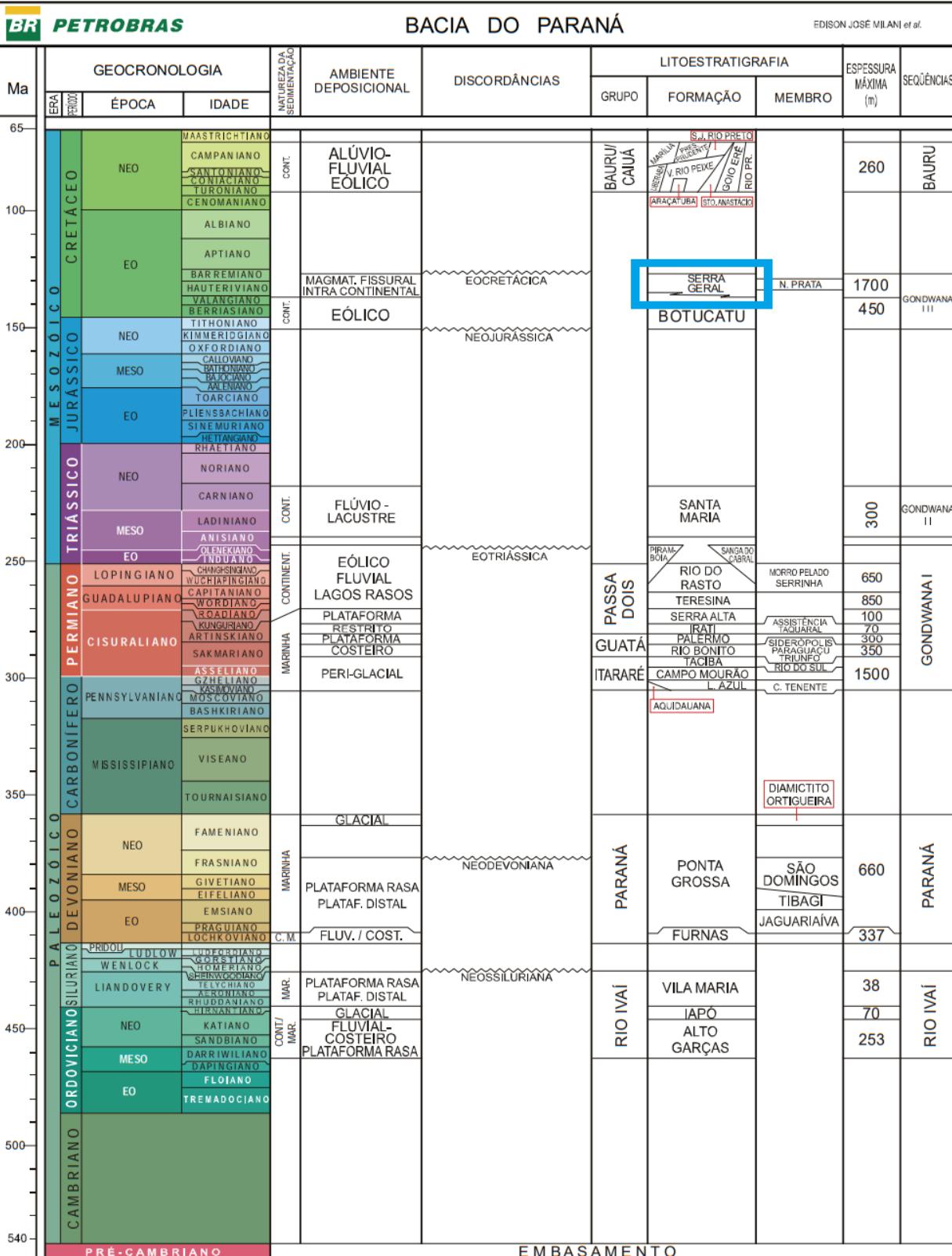


Figura 3 – Carta estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque no retângulo azul para o intervalo estudado (Milani et al., 2007).

5.1.3 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é formada, majoritariamente, pela sequência vulcânica de basaltos toleíticos (90% do volume total), com presença de diques de diabásio de 133 Ma. Em menor proporção, há a presença de andesitos – toleíticos (7% do volume total) e também apresenta rochas como riódacitos-riolitos (3% do volume total), sendo fácil a distinção devido à sua coloração mais clara em relação aos basaltos (Piccirillo & Melfi, 1988).

A principal forma de ocorrência das rochas magmáticas da Formação Serra Geral é através de derrames basálticos, sendo definidos como corpos tabulares com grande continuidade horizontal e cada derrame podendo ter até várias dezenas de metros de espessura (Nardy *et al.*, 2002).

5.2 Geologia Local

Devido ao fato de a empresa não ter autorizado a divulgação da localização da área, as coordenadas e a localização mais precisas não serão apresentadas. O que se pode dizer é que o local de trabalho está situado ao Norte do Rio Grande do Sul, no contexto da Formação Serra Geral, no chamado Planalto Meridional Brasileiro (Roisenberg, 1989).

De acordo com as perfurações realizadas no local, a região possui solo vermelho argiloso e solo residual vermelho argiloso até uma profundidade entre 10 – 15 m. Abaixo dessa camada, seguem os basaltos da Formação Serra Geral, que variam entre derrames com espessura de dezena de metros até várias dezenas de metros. A litologia varia entre basalto cinza claro, avermelhado ou cinza escuro, com fragmentos finos até grossos, com presença de outros minerais acessórios como magnetita e calcita. As perfurações mais profundas realizadas na região chegaram a profundidades próximas a 300 m, e claramente a litologia presente nas partes mais profundas das sondagens continua sendo de basaltos, conforme citado no item 5.1.1.

5.3 Hidrografia Local

A área de estudo está situada dentro da chamada Bacia Hidrográfica do Rio Passo Fundo. Possui uma área de drenagem de 4.785,7 km², abrangendo 30 municípios, e os seus principais afluentes são os rios Passo Fundo e Erechim (FEPAM, 2003). As drenagens da bacia possuem um padrão sub-dendrítico, apresentando um certo paralelismo em relação aos principais afluentes.



Figura 4 –Representação da Bacia Hidrográfica do Rio Passo Fundo (direita) e a localização da mesma no estado de Rio Grande do Sul (esquerda) (Modificado de FEPAM, 2003; e de SEMA, 2020).

5.4 Trabalhos Prévios

Gallas (2003) é um trabalho que trata de prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos, na cidade de São José do Rio Pardo – SP. O método empregado foi o de eletrorresistividade. Através do resultado dos processamentos dos dados de levantamento geofísico, foi realizada a correlação entre as zonas de baixa resistividade com as de fraturamentos, sendo estas interpretadas como potenciais aquíferos fraturados. Desta forma, os locais para perfuração dos poços tubulares foram otimizados, e resultaram em vazões suficientes para a exploração do recurso.

Souza Filho *et al* (2006) é um artigo que trata de interpretação e modelagem dos dados de eletrorresistividade para instalação de poços tubulares em aquífero cristalino, realizado na cidade de Juá, Irauçuba – CE. Para a obtenção dos dados, foi utilizado levantamento aerogeofísico eletromagnético e a técnica de caminhamento elétrico. Através da interpretação dos resultados foram indicados 2 locais para a perfuração, sendo que um deles teve as vazões necessárias para exploração. Desta forma, foi mostrada a eficácia do método.

Xavier & Xavier (2011) também abordam o tema referente à aplicação do método de eletrorresistividade para locação de poços tubulares em rochas cristalinas. Devido ao contexto geológico, o interesse também foi em relação às zonas de fraturas (baixa resistividade) e que possuam certa continuidade em profundidade. As técnicas utilizadas foram a de sondagem elétrica vertical (SEV) e de caminhamento elétrico.

Gallas & Giardin (2016) empregaram o método de eletrorresistividade com arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=30m$, 6 níveis de investigação) em uma área de contexto de rochas

cristalinas, no município de Duque de Caxias, RJ. Seu principal objetivo foi localizar prováveis estruturas de armazenamento de água neste tipo de rocha (fraturas/falhas) correlacionando esta feição geológica com a eletrorresistividade. As locações indicadas pela geofísica resultaram em 2 poços com elevada produtividade ($75\text{ m}^3/\text{h}$ e $130\text{ m}^3/\text{h}$)

Santos (2014) realizou levantamentos de eletrorresistividade em Goiás, município de Luziânia. Os trabalhos consistiram de levantamentos com dipolo-dipolo ($\text{AB}=\text{MN}=30\text{m}$ e 6 níveis de investigação) visando a detecção de zonas fraturadas em área de rochas cristalinas. Os resultados mostraram anomalias de baixas resistividades que constituem lineamentos correlacionáveis a zonas fraturadas.

Barroso (2021) usou a eletrorresistividade para a detecção de zonas fraturadas em ambiente de rochas cristalinas no estado do Goiás. A locação do poço indicada pelos resultados deste levantamento resultou em um poço com uma produtividade de $43\text{ m}^3/\text{h}$ em uma região em que os melhores poços tinham vazões inferiores a $10\text{ m}^3/\text{h}$ (somente um poço com $15\text{ m}^3/\text{h}$ e outro com $10\text{ m}^3/\text{h}$ (CPRM, 2022)).

6. MATERIAIS E MÉTODO

6.1 Materiais

O equipamento utilizado foi um resistivímetro Tectrol (potência de 500W), fabricado pela Tectrol Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Ltda.

Além do resistivímetro, foram usados fios, eletrodos de aço inoxidável, trenas, GPS de mão, marretas para cravação dos eletrodos, alicates, fita isolante etc.

Para o processamento dos dados, confecção dos mapas de resistividade, seções modeladas e pseudo-seções, foram utilizados os seguintes softwares: RES2DINV (2004), Surfer 8 e Google Earth.

6.2 Método - Eletrorresistividade

Para o levantamento geofísico deste projeto, foi empregado o método indireto de eletrorresistividade, através da técnica do caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo para a aquisição das informações.

Neste método a propriedade física a ser quantificada é a resistividade do subsolo. A resistividade varia em função da umidade, saturação em sais, conteúdo de outras litologias – e.g. argilas –, porosidade etc. (Keller & Frischknecht, 1966). Uma rocha sã tem uma resistividade maior do que uma fraturada e/ou alterada.

Para a medição da resistividade de um substrato, são utilizados dois pares de eletrodos. Um par (A e B) em contato galvânico com o solo serve como uma fonte artificial que introduz uma corrente elétrica no subsolo. O outro par de eletrodos (M e N) serve para

medir a diferença de potencial gerada pela corrente (Gallas, 2000). Através destes dois parâmetros físicos, é possível medir a resistividade aparente (Equação 1) ou efetiva do subsolo (Gallas, 2003). Quanto maior o valor da resistividade do material indica que há maior dificuldade em propagar a corrente através dele (Borges, 2004).

No caso de rochas cristalinas, nos locais onde as rochas apresentam zonas de fraturas, estas estarão relacionadas com baixas resistividades, devido ao fato de que a presença de fraturas, usualmente preenchidas com material de alteração da rocha e água, enriquece o meio em íons, e a condução da corrente elétrica, em condições como as existentes na natureza, dá-se principalmente pela presença de íons (Gallas & Giardin, 2016).

Em um meio homogêneo, a resistividade ρ_a (em ohm x metro) pode ser expressa pela Equação 1, sendo I a corrente elétrica, U a diferença de potencial e K um fator geométrico (Gallas, 2000).

$$\rho_a = K \frac{U}{I} \quad (\text{Equação 1})$$

Na prática, como os substratos sempre são anisotrópicos e heterogêneos (Figura 5), os dados refletem uma resistividade aparente ρ_a . K é o fator geométrico que tem a finalidade de compensar a queda (exponencial) do campo elétrico, que ocorre ao aumentar a distância entre os eletrodos de corrente e de potencial, conforme mostra a Equação 2 (Telford *et al*, 1990).

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde ρ é a resistividade, e r é a distância entre os eletrodos de corrente e os de potencial.

O fator geométrico K é obtido pela Equação 3, sendo AM , BM , AN , BN as distâncias entre os eletrodos envolvidos nas medidas.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (\text{Equação 3})$$

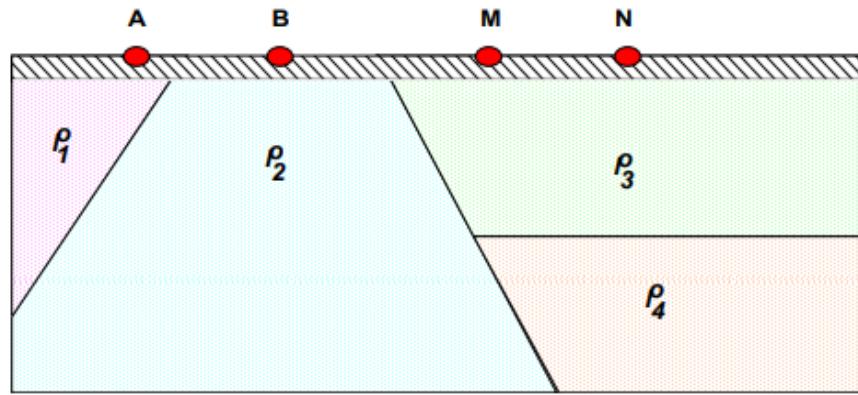


Figura 5 – Representação de um substrato heterogêneo com as suas respectivas resistividades (Gallas, 2000).

6.3 Técnica - Caminhamento Elétrico

As zonas de fraturas propícias para perfuração de poços em rochas cristalinas geralmente são estruturas verticais a subverticais. A técnica do caminhamento elétrico é a mais adequada por ser possível diferenciar as heterogeneidades horizontais do substrato (Kirsch, 2009) (Figura 6).

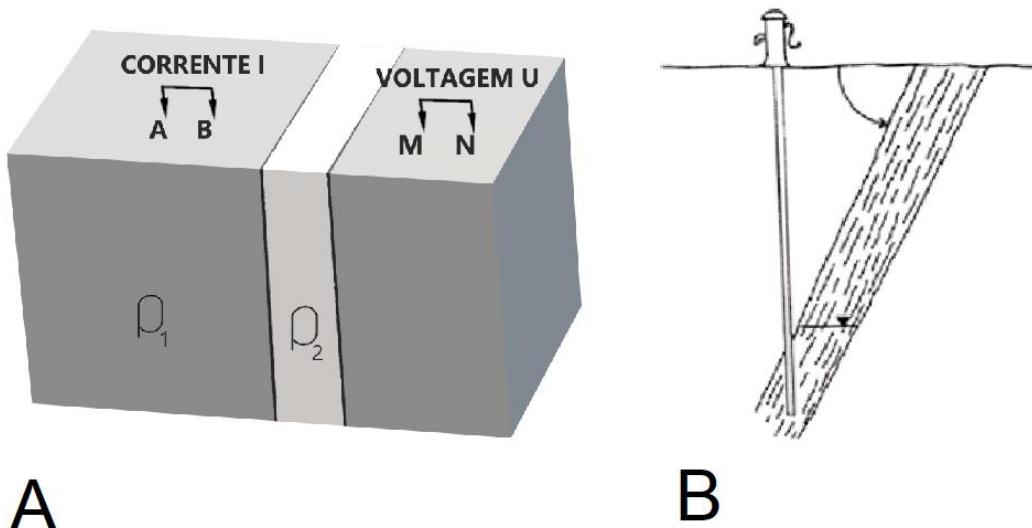


Figura 6 – A: Representação de um meio com heterogeneidade horizontal. A zona não fraturada tem uma resistividade ρ_1 e a fraturada é representada como tendo ρ_2 . B: Exemplo de uma boa perfuração de poço considerando o mergulho da zona de fratura (Modificado de Kirsch, 2009).

O arranjo mais utilizado é o dipolo-dipolo e foi empregado na aquisição dos dados deste trabalho. Como explicado em Gallas (2003), a configuração dos eletrodos é simétrica, sendo dispostos em linha reta, com a abertura dos pares de eletrodos sendo $AB = MN = X$.

Primeiramente, os eletrodos A e B de injeção de corrente são fixos e conforme os eletrodos M e N de diferença de potencial são movidos com deslocamento igual a X, as medidas são efetuadas. Desta forma, são tomadas as medidas de diferentes profundidades

numa reta com ângulo de 45° em relação ao plano da superfície e com origem nos centros de AB e MN. Após o par MN chegar ao final das medidas no ponto, move-se o par AB a uma distância X em relação à sua posição inicial, e move-se novamente o par MN a cada distância X, e assim sucessivamente, conforme visto na Figura 7.

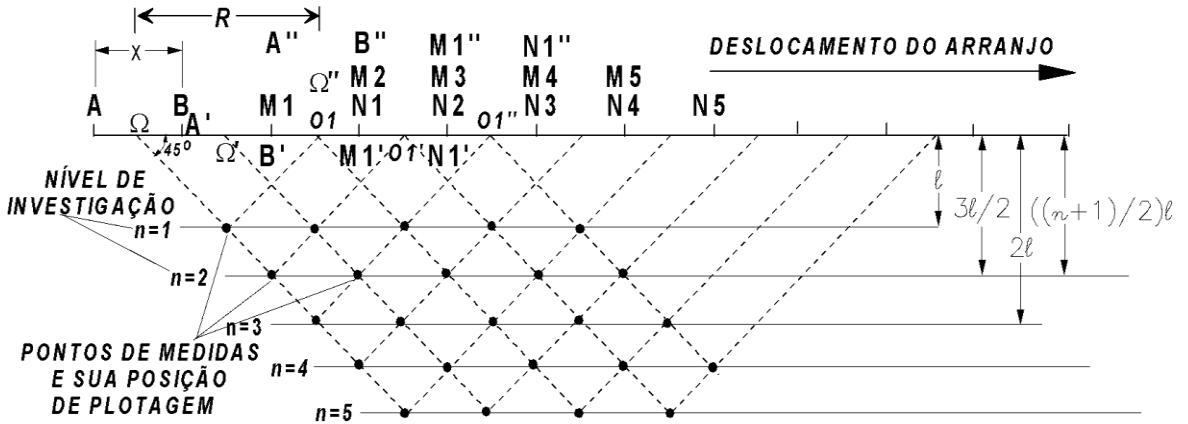


Figura 7 – Pseudo-seção do arranjo dipolo-dipolo com vários níveis de investigação (Gallas, 2000).

Como representado na Figura 7, nota-se que quanto maior a distância entre os pares de eletrodos AB e MN, maior será a profundidade investigada. Teoricamente, a profundidade é dada por $(n+1) \ell / 2$ (Gallas, 2003).

6.4 Disposição dos arranjos em campo

Como mostrado na Figura 8, foram feitas seis linhas de caminhamento, sendo aproximadamente paralelas e de direção N-S. Através dessa disposição das linhas é possível interceptar quase que perpendicularmente as direções das fraturas/lineamentos em que foram observados através da imagem de satélite (Figura 2). Assim foi possível verificar a continuidade das fraturas interceptadas pelas linhas, permitindo uma correta localização dessas estruturas.

Em relação à técnica empregada nas linhas de caminhamento, o arranjo utilizado foi de dipolo-dipolo, como já dito no item anterior, com o espaçamento entre os eletrodos de 30 metros, com 5 níveis de investigação para o processamento de dados. Teoricamente, o primeiro nível vai de 0 a 30 metros de profundidade, aumentando em 15 metros para cada nível mais abaixo. Portanto, a investigação foi realizada no intervalo de profundidade em torno de 0 a 90 metros da subsuperfície.

7. RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Área dos trabalhos

Na Figura 8, as linhas do levantamento geofísico estão sobrepostas a uma imagem Google Earth. Esta figura sintetiza os trabalhos e a interpretação geofísica. Mostra as anomalias detectadas e que constituem dois alinhamentos estruturais (fraturamentos). Estes

dois lineamentos foram interpretados interligando as regiões mais favoráveis em cada uma das linhas de caminhamento. Também é indicada nela a localização do poço perfurado, que fornece 72,5 m³/h.

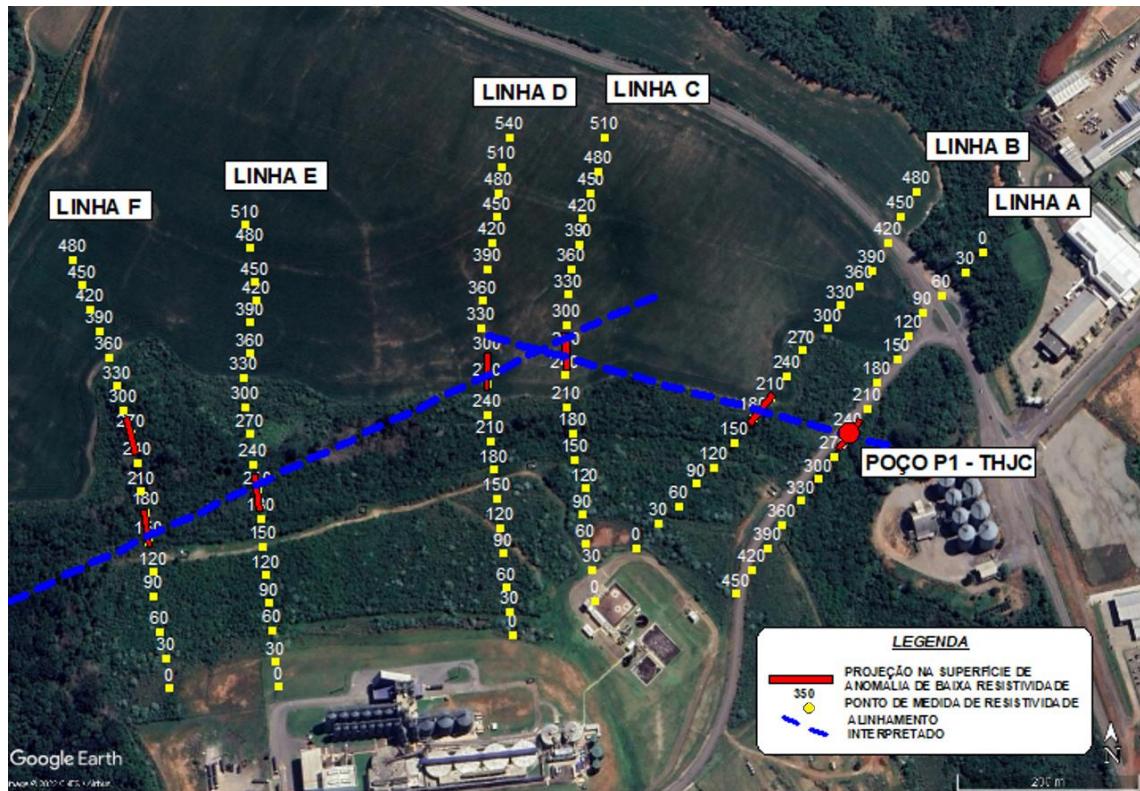


Figura 8 – Síntese do levantamento geofísico sobre a imagem de satélite. O ponto em vermelho indicando o local em que foi instalado o poço P1 – THJC (Google Earth, Surfer 8).

Conforme citado no Projeto Inicial, durante o período de processamento dos dados de campo foi familiarizado o uso dos programas Surfer e do RES2DINV. Através dos mesmos, foram produzidas as pseudo-seções de resistividade aparente e seções modeladas de resistividade para as Linhas A, B, C, D, E e F (Figuras 9, 10, 11, 12, 13 e 14). Para melhor visualização da distribuição das resistividades na área do trabalho, foram elaborados os mapas de resistividade modelada dos níveis 2, 3, 4 e 5 (Figuras 15, 16, 17 e 18) compostos pelos dados das Linhas A – F, e os blocos-diagrama das resistividades modeladas dos níveis 2, 3, 4 e 5 (Figuras 19, 20, 21 e 22).

As pseudo-seções de resistividade aparente apresentam os dados originais de campo e interpolados pelo Surfer 8.

As seções modeladas de resistividade mostram os dados submetidos aos processos de inversão (modelagem) dos dados de campo pelo RES2DINV. Após a inversão os dados foram exportados na forma de arquivos XYZ, onde X é a coordenada de distância, Y é a profundidade e Z o valor modelado de resistividade. As seções modeladas também foram interpoladas pelo Surfer 8, sendo a krigagem o método de interpolação adotado.

7.2 Pseudo-seções de resistividade aparente e seções de resistividade modelada

As projeções das anomalias de baixa resistividade na superfície do terreno para cada linha de caminhamento estão indicadas nas Figuras 9 a 14 (Linhas A – F) na forma de barras hachuradas em vermelho. Estas posições também estão sendo assinaladas nos mapas de resistividade modelada dos níveis 2 ao 5 (Figuras 15 – 18).

As pseudo-seções de resistividade aparente representam a distribuição dos dados brutos obtidos em campo e não representam a disposição real da resistividade no substrato. Já a seção modelada de resistividade é a distribuição mais próxima à realidade da resistividade na subsuperfície, gerada de acordo com os cálculos matemáticos pelo Surfer 8.

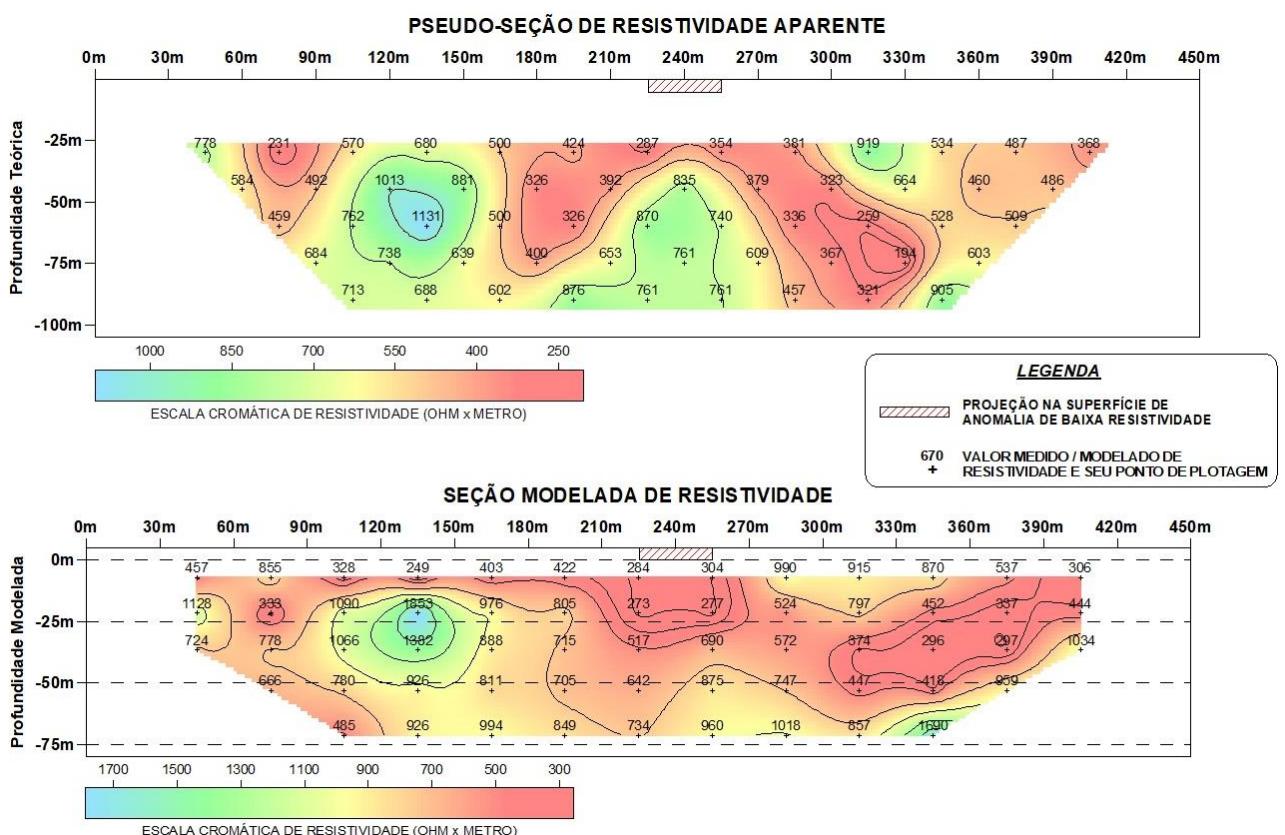


FIGURA 9 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA A.

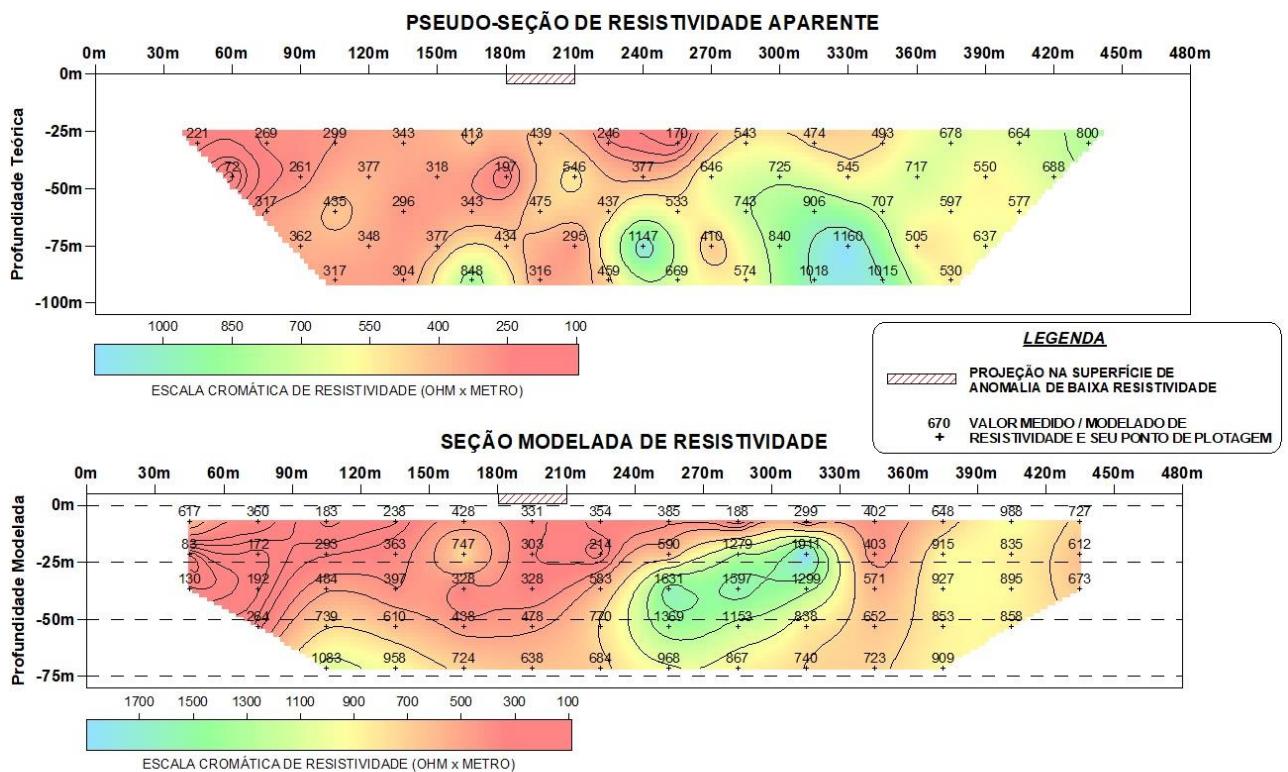


FIGURA 10 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA B.

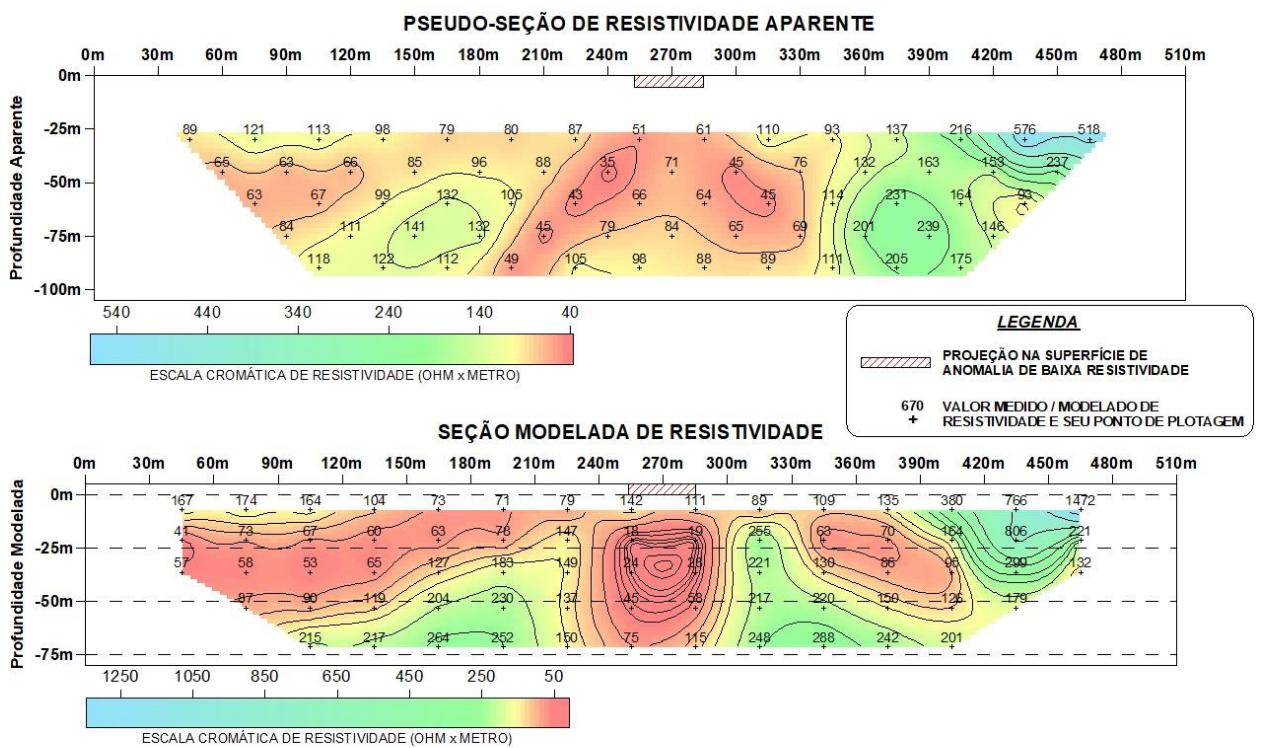


FIGURA 11 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA C.

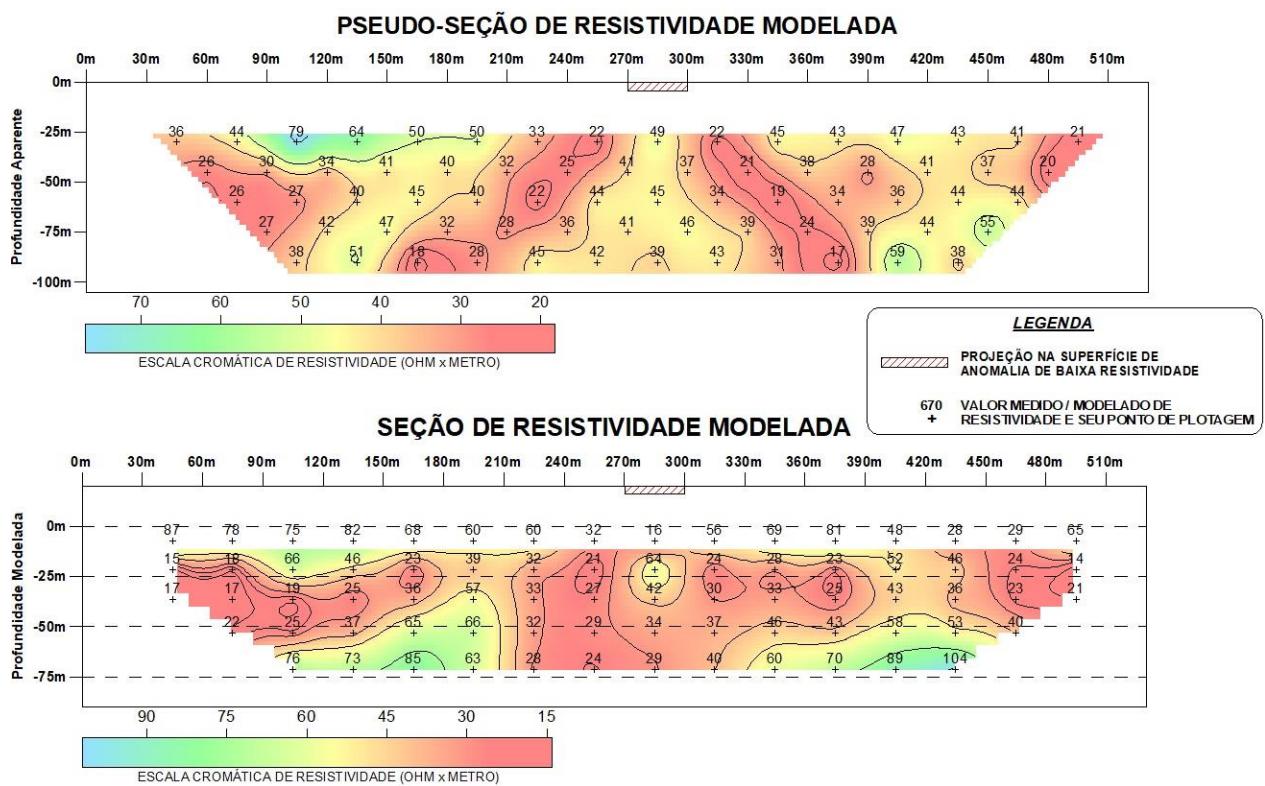


FIGURA 12 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA D.

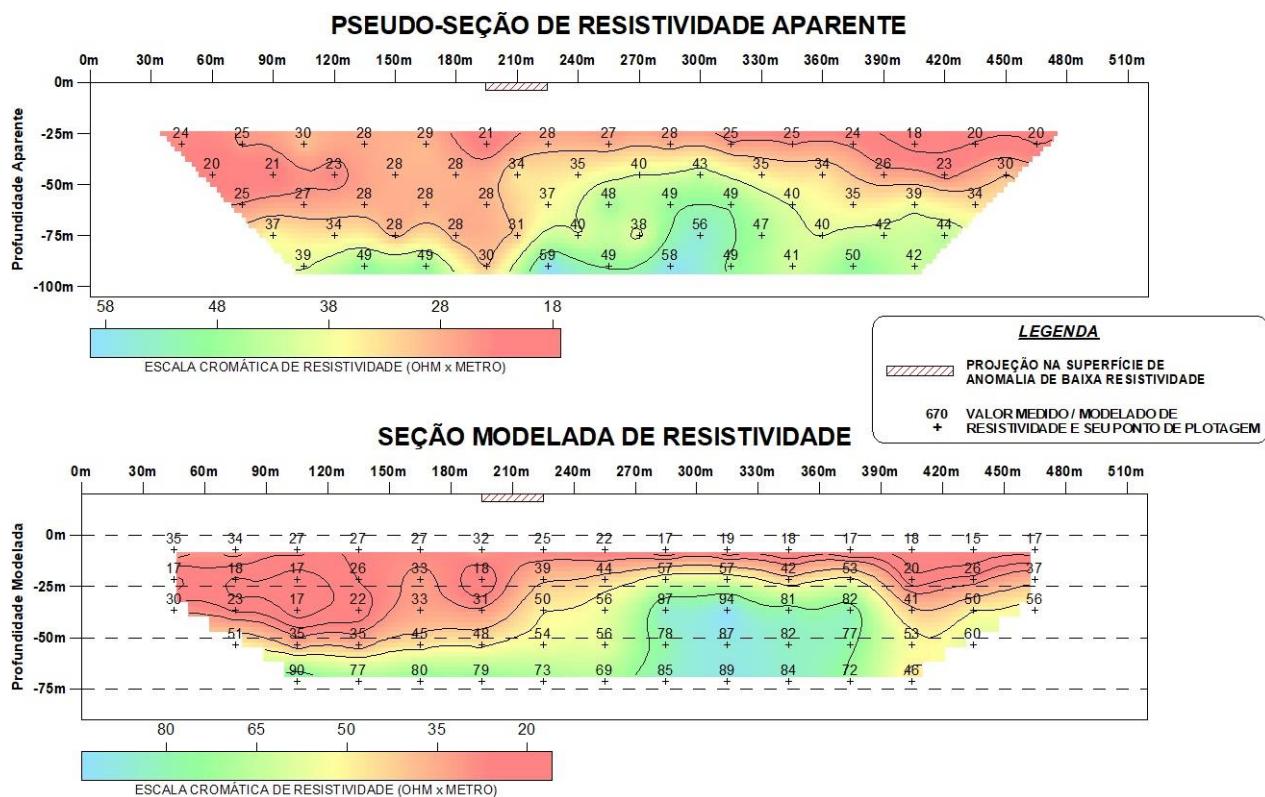


FIGURA 13 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA E.

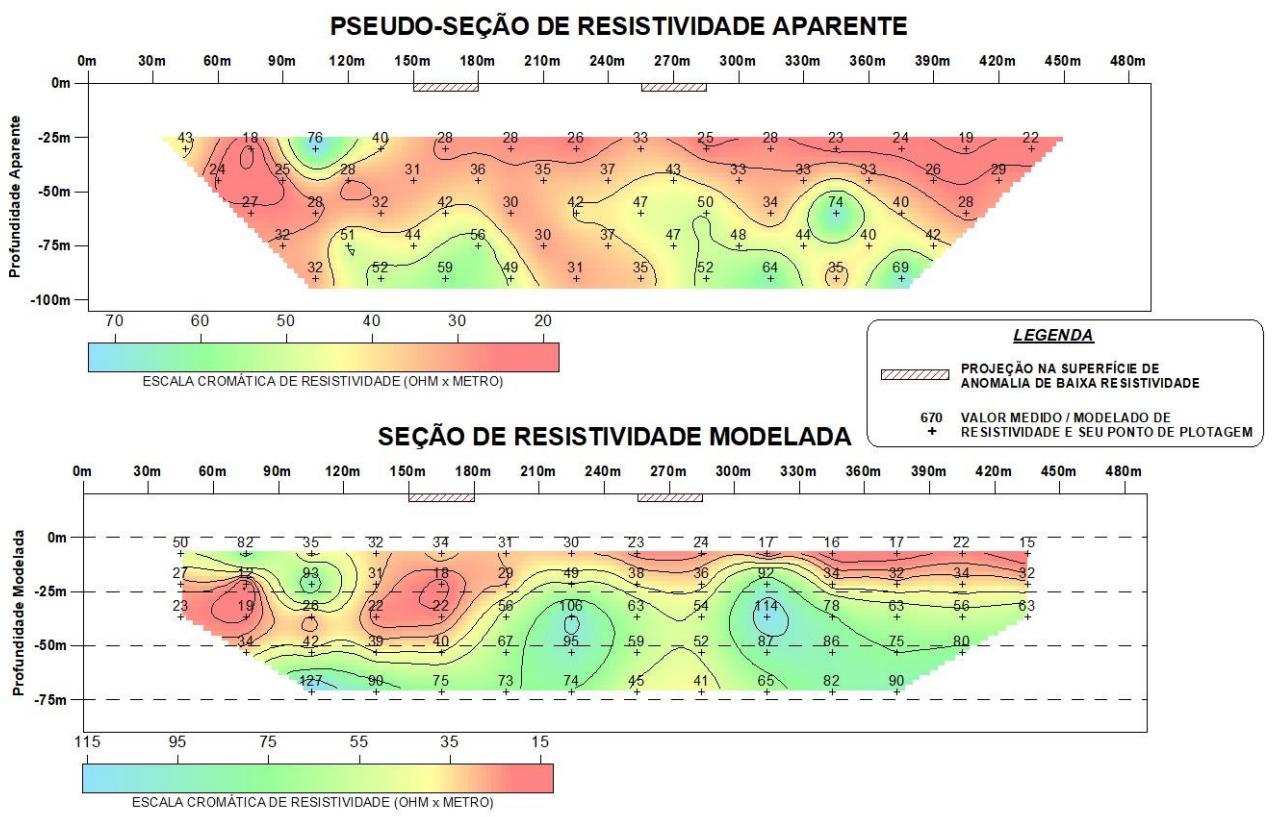


FIGURA 14 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA F.

7.3 Mapas de resistividade

Seguem os mapas de resistividade modelada dos níveis 2, 3, 4 e 5. Julgou-se desnecessária a apresentação do nível 1 por este alcançar somente a parte mais superficial (manto de alteração) sem praticamente alcançar a rocha.

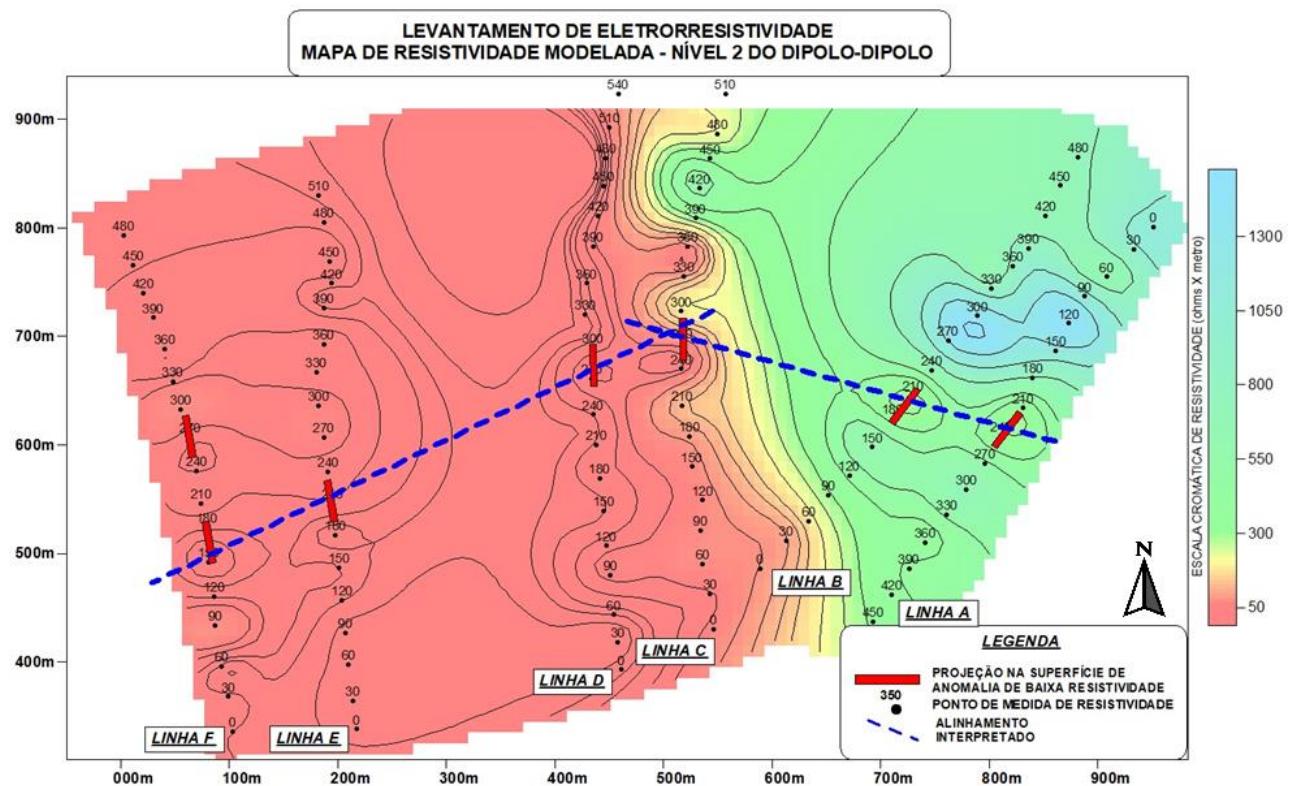


FIGURA 15 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 2 DO DIPOLO-DIPOLO.

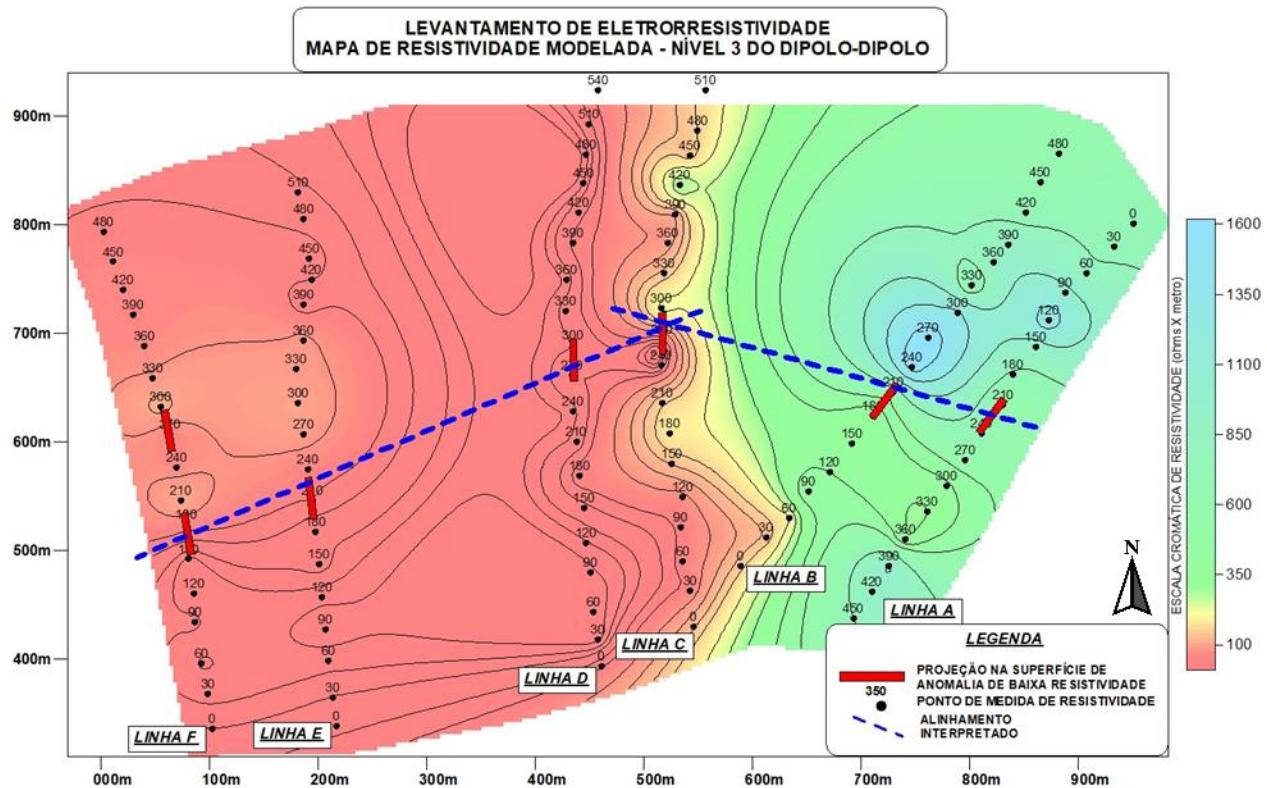


FIGURA 16 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 3 DO DIPOLO-DIPOLO.

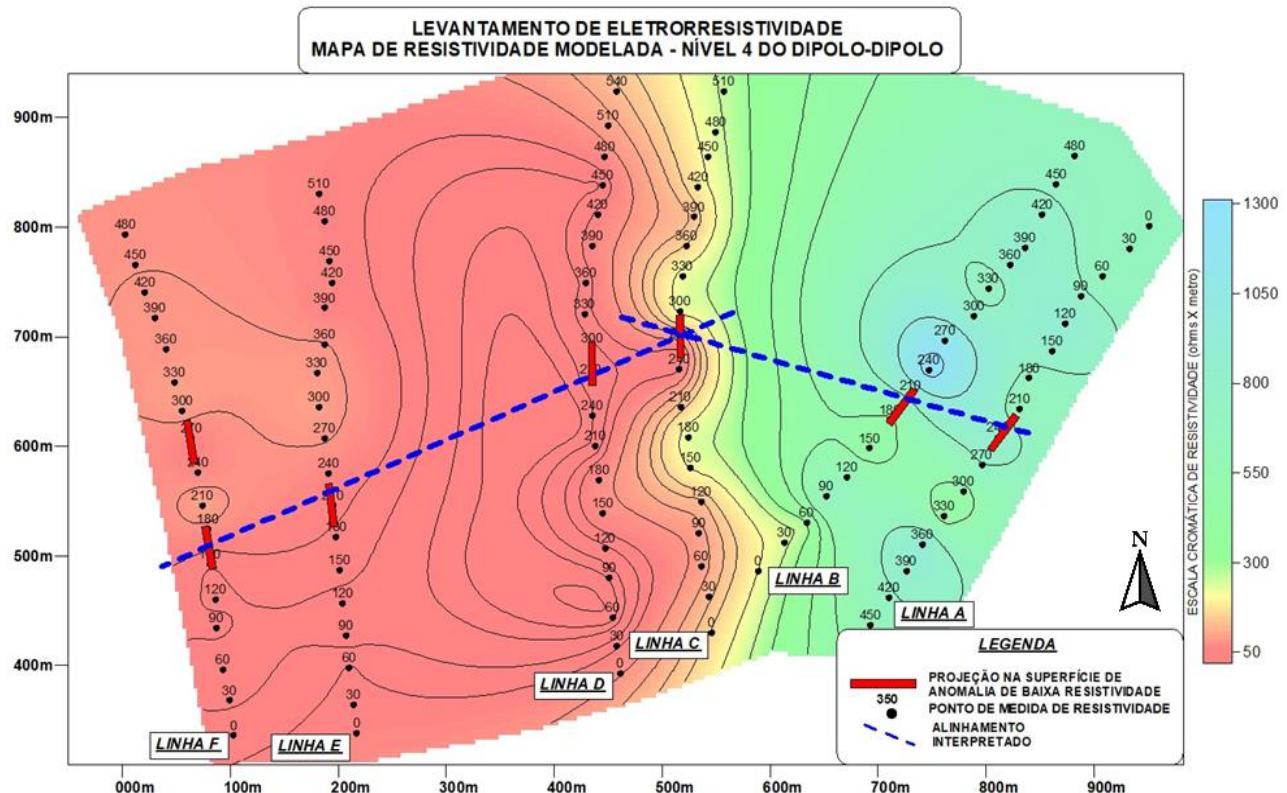


FIGURA 17 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 4 DO DIPOLO-DIPOLO.

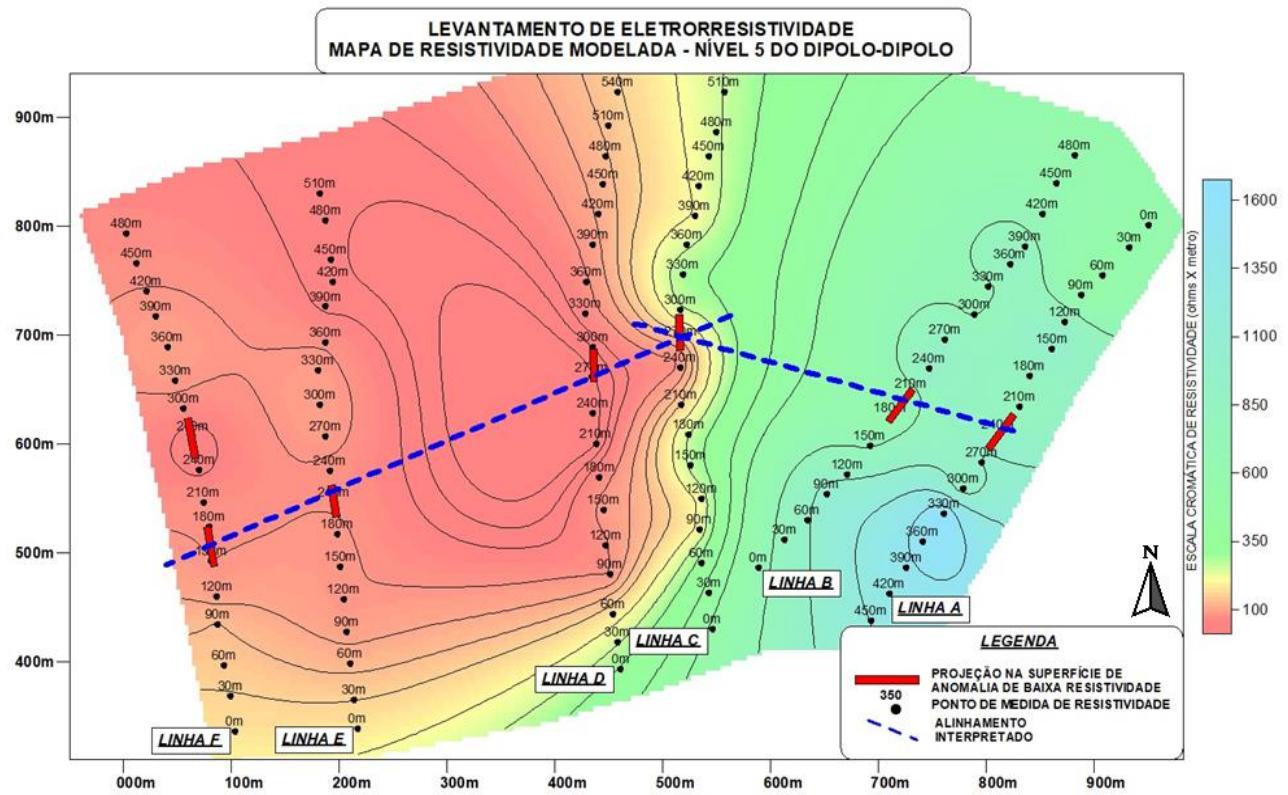


FIGURA 18 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 5 DO DIPOLO-DIPOLO.

7.4 Blocos-diagrama das resistividades modeladas

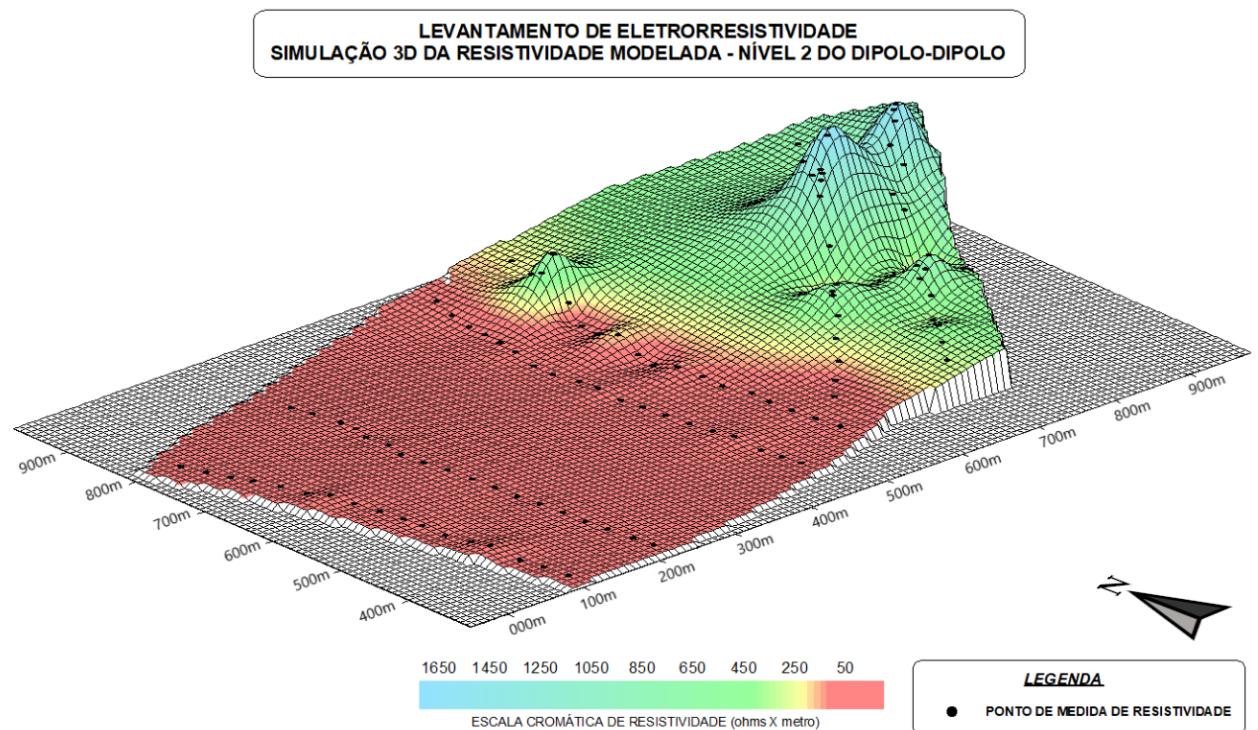


FIGURA 19 - SIMULAÇÃO 3D DA RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 2 DO DIPOLO-DIPOLO.

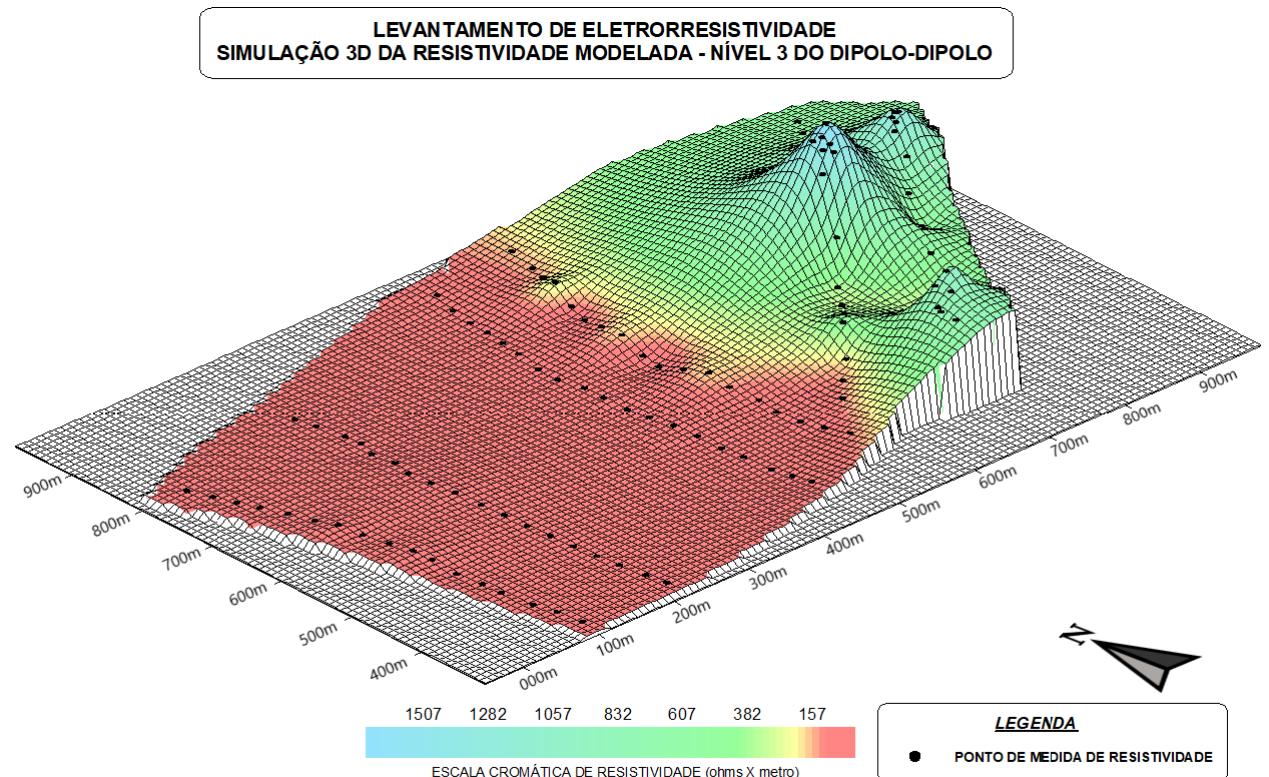


FIGURA 20 - SIMULAÇÃO 3D DA RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 3 DO DIPOLO-DIPOLO.

**LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE
SIMULAÇÃO 3D DA RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 4 DO DIPOLO-DIPOLO**

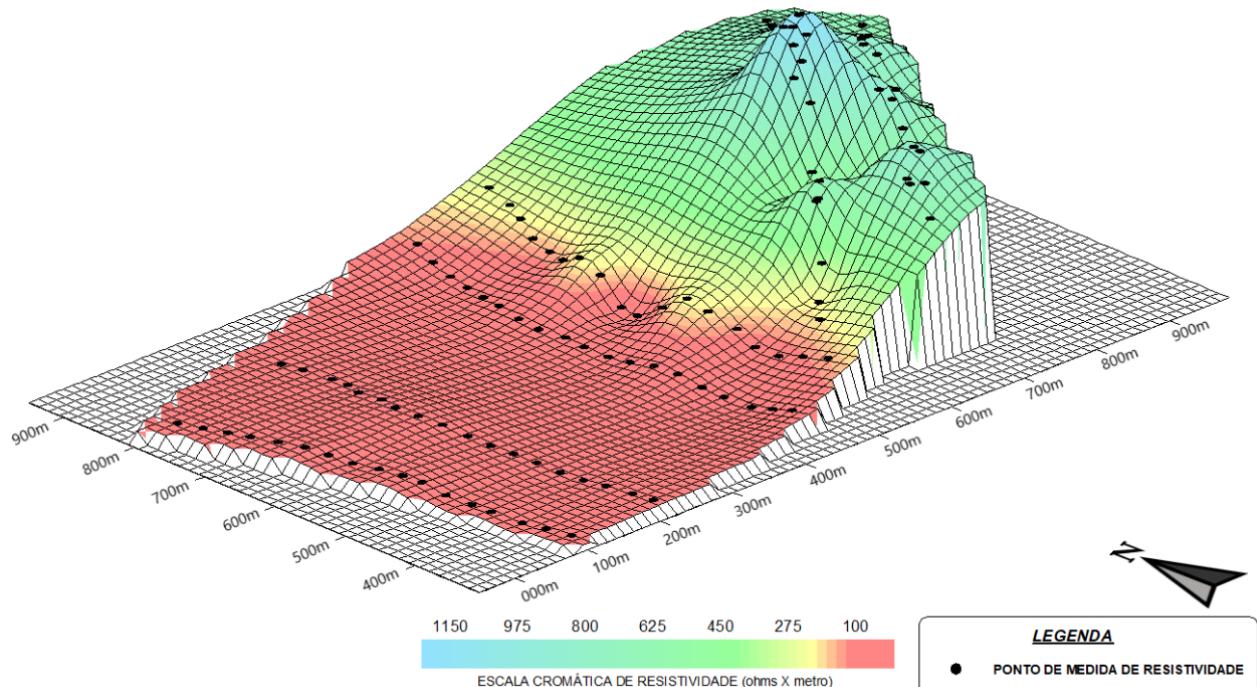


FIGURA 21 - SIMULAÇÃO 3D DA RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 4 DO DIPOLO-DIPOLO.

**LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE
SIMULAÇÃO 3D DA RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 5 DO DIPOLO-DIPOLO**

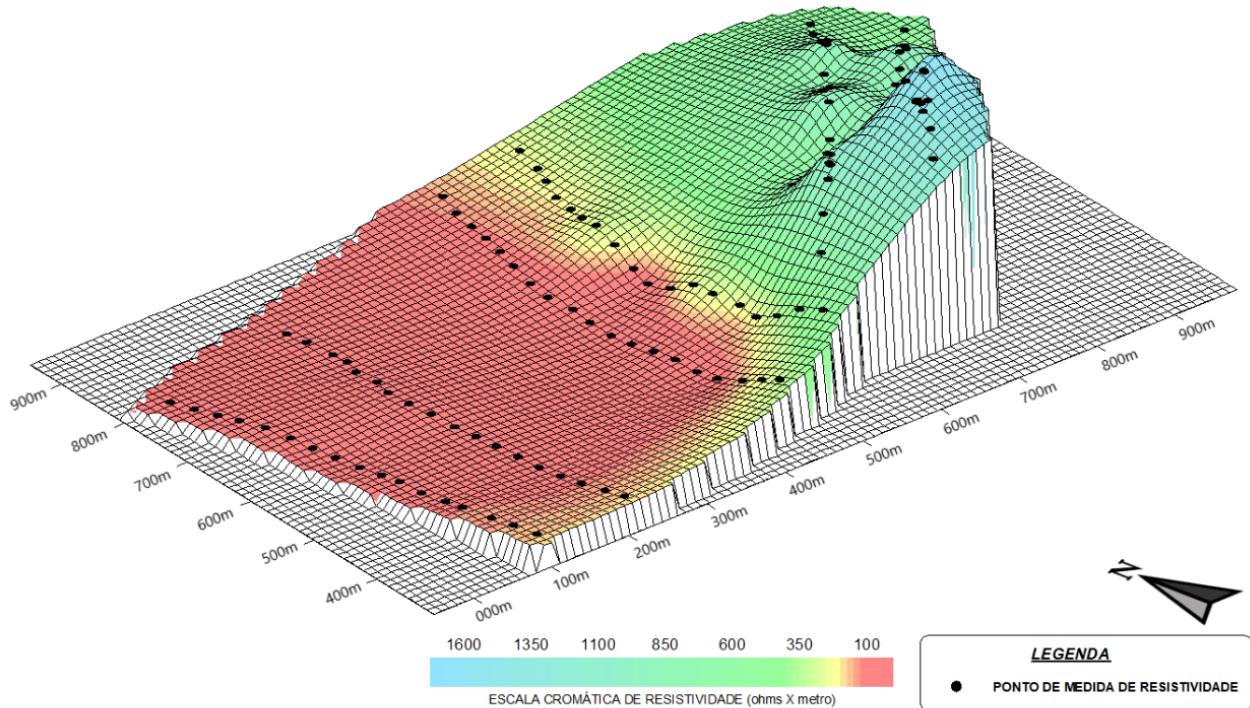


FIGURA 22 - SIMULAÇÃO 3D DA RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 5 DO DIPOLO-DIPOLO.

8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da análise das seções modeladas de resistividade é possível verificar a existência de anomalias de baixa resistividade com continuidade vertical na maioria das seções, sendo a mais pronunciada na Linha C, seguida pela Linha B, A e D.

Nos mapas apresentados foram interpretadas duas estruturas principais que são constituídas pelo conjunto de anomalias detectadas e são indicadas através de linhas tracejadas azuis. Conforme citado anteriormente, elas foram interpretadas através da interligação das projeções dos locais mais favoráveis para perfuração do poço tubular em cada uma das linhas de caminhamento. Vale salientar que as direções dessas duas fraturas estão concordando com as direções dos lineamentos regionais vistos na imagem de satélite (Figura 2), mostrando a importância de uma análise prévia do local de estudo.

Um fato interessante observado, mais evidentemente nos mapas, é que a resistividade muda bruscamente a partir da Linha C, assumindo valores mais baixos a partir daí até a Linha F. Supõe-se que isto se deve, provavelmente, a uma mudança litológica/composicional no tipo de basalto que ali ocorre.

Teoricamente, no ponto de encontro das duas zonas fraturadas é onde deveria ocorrer o local mais favorável para a perfuração de um poço tubular. Isso fica ainda mais evidente ao analisarmos a seção de resistividade modelada da Linha C (Figura 11), a qual mostra uma anomalia muito bem pronunciada em relação às outras seções. Por esta razão é que se conclui que o melhor ponto para locação do poço tubular é na intersecção das duas estruturas. No entanto, devido às dificuldades de acesso para os caminhões com o equipamento de sondagem da empresa de perfuração, a execução do poço foi realizada no ponto P1 – THJC, em que pertence à estrutura WNW – ESE detectada. Esta locação é o ponto 240 da Linha A (Figura 9), sendo que foi perfurada na prioridade 3.

Como já citado no item dos resultados, no poço P1 – THJC foi medida a vazão de 72,5 m³/h, o que corrobora a eficácia da locação de poços por meio de eletrorresistividade.

De todo modo, outras locações de poços foram indicadas e que poderão direcionar a posição de novos poços se houver a necessidade de maior consumo de água.

9. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e interpretações dos mesmos, estabelecem-se as seguintes indicações, em ordem de prioridade, para a perfuração de poços tubulares profundos para exploração de água subterrânea.

Anomalias geofísicas correlacionáveis a zonas fraturadas:

Prioridade 1) Linha C – estaca 270m;

Prioridade 2) Linha B – entre estacas 180 e 210m;

Prioridade 3) Linha A – estaca 240m (localização do poço perfurado);

Prioridade 4) Linha D – entre estacas 270m e 300m;

Prioridade 5) Linha E – estaca 210m.

No poço perfurado (P1 – THJC, visto na Figura 8), perfurado no ponto 240m da Linha A, foi medida a vazão de 72,5 m³/h, o que corrobora a eficácia da locação de poços tubulares profundos por meio de eletrorresistividade.

Conforme os objetivos propostos, considera-se que os resultados apresentados por este aluno em seu Trabalho de Formatura atingiram plenamente os mesmos, qual seja o de aprendizagem e familiarização do formando em um trabalho profissional de aplicação de um método geofísico na prospecção de água subterrânea.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, 2010, Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil INFORME 2010: Distrito Federal, Brasília, Agência Nacional de Águas.
- Artur, P. C. & Soares, O. C., 2002, Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná, Brasil, Revista Brasileira de Geociências, 32 (4): 433-448.
- Barroso, P. B. L., 2021, Prospecção de água subterrânea em aquíferos fraturados (cristalinos) com eletrorresistividade – apresentação de caso [Trabalho de Formatura N° 21/36]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Borges, W.R., 2004, Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade: Revista Brasileira de Geofísica, 22(1), 91 p.
- CPRM, 2022, Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS): <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/> (acessado Abril 2022).
- FEFAM, 2003, Plano de Uso e Ocupação das Águas e Entorno do Reservatório da UHE Passo Fundo – Volume 1, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler – RS: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia_urupassofundo.asp (acessado Novembro 2022).
- Gallas, J. D. F. 2000, Principais Métodos Geoelétricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental [Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 174p.
- Gallas, J. D. F. 2003, Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com emprego de métodos indiretos: Revista do Instituto Geológico, São Paulo., 24(1/2), 43-51 p.
- Gallas, J. D. F., & Giardin, A., 2016, Eletrorresistividade na prospecção de aquíferos fraturados: ABAS, Revista Águas Subterrâneas, 30 (1), 119-138. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28496/> (acessado Abril 2022).
- Guimarães, A. C. R. & Motta, L. M. G., 2016, Mechanical behavior of basaltic rocks from Serra Geral Formation used as road material in Santa Catarina State, Brazil: Soil and Rocks, v. 39, n. 2, 203-210 p.
- Hirata, R., Suhogusoff, A., Marcellini, S., Villar, P. C., Marcellini, L., 2019, As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. 1. Ed. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

- Keller, G. V. & Frischknecht, F. C. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford: Pergamon Press, 1977, 517 p.
- Kirsch, R., 2009, Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology. 2nd Ed. Springer Berlin Heidelberg, 86 p., 447-449 p.
- Milani, E. J., 1997, Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-occidental. 2 v. [Tese de doutorado]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Milani, E. J. 2004. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo. Beca. P. 265-279.
- Milani, E. J., França, A. B., Schneider, R. L., 1994, Bacia do Paraná. Boletim de Geociências Petrobras, 8 (1): 69-82.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, O. A., Fernandes, L. A., França, A. B., 2007, Bacia do Paraná: Boletim de Geociências, Petrobras, Rio de Janeiro, v.15, n. 2, p. 265-287.
- Milani, E.J.& Ramos, V.A. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-occidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, 28(4): 473-484.
- Nardy, A. J. R., Oliveira, M. A. F., Betancourt, R. H. S., Verdugo, D. R. H., Machado, F. B., 2002, Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral: Revista Geociências, 21 (2), 15-32 p.
- Piccirillo, E. M., & Melfi, A. J., 1988, The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin (Brazil): petrogenetic and geophysical aspects: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências, 600 p.
- RES2DINV ver. 3.54. 2004. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geoelectric Imaging 2-D and 3D. Geotomo Software, Malaysia.
- Roisenberg, A., 1989, Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da bacia do Paraná [Tese de doutorado em Geociências]: Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, 285 p.
- Santos, F. S., 2014, Prospecção geofísica de aquíferos fraturados pelo método de eletroresistividade [Trabalho de Formatura Nº 14/10]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 37 p.

SEMA, 2020, Inserção de municípios e bacias hidrográficas no Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, Rio Grande do Sul: <https://sema.rs.gov.br/u020-bh-passo-fundo> (acessado Novembro 2022).

Souza Filho, O. A., Oliveira, R. G., Ribeiro, J. A., Veríssimo L. S., Sá, J. U., 2006, Interpretações e modelagens de dados de eletrorresistividade para locações de poços tubulares no aquífero fissural da área-piloto Juá, Irauçuba – Ceará: Revista Geológica, vol. 19, n° 1, 7-21 p.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. 1990. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.

Xavier, F. F., & Xavier, D. S., 2011, Geofísica Elétrica aplicada a geotecnia para investigação de blocos de rochas e matações: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo.

Zalán, P. V. Wolff, S., Conceição, J. C. J., Vieira, I. S., Appi, V. T., Zanotto, O. A., 1987, Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, 3, Atas, Curitiba: SBF, 1987, p. 441-474.

Zalán, P. V., Wolff, S., Conceição, J. C. J., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., Zanotto, O. A., Marues, Q., 1988, Tectonicsandsedimentationofthe Paraná basin: Simpósio do Gondwana, Anais, São Paulo.

Zalán, P. V., Wolff, S., Conceição, J. C. J., Marques, A., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., Zanotto, O. A., 1991, Bacia do Paraná: Gabaglia, G. T. and Milani, E. J. (Ed.) Origem e evolução de bacias sedimentares. Petrobras. Rio de Janeiro, p. 135-168.