

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Geociências

Monografia

**Prospecção de água subterrânea em aquíferos fraturados (cristalinos) com
eletrorresistividade – apresentação de caso**

TF Nº: 21/36

29/11/2021

Pedro Baldez Lagoeiro Barroso

Orientador: José Domingos Faraco Gallas

São Paulo
2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao professor e orientador Gallas, que neste ano atípico, não mediu esforços para me auxiliar neste trabalho. Com paciência e clareza, ajudou-me a despertar o interesse pela geofísica.

Agradeço aos meus avôs e avós, que foram os principais responsáveis pelo meu entusiasmo pela ciência, e consequentemente pela geologia.

Aos meus pais e irmão, por tudo.

E finalmente, à Turma 59, em especial aos meninos do Castelo. De todos os benefícios que a geologia me proporcionou, o mais importante foram as amizades que levarei para vida.

Sumário

1. RESUMO DO PROJETO	4
2. ABSTRACT	5
3. INTRODUÇÃO.....	6
3.1 Localização	6
3.2 Geologia Regional	7
3.3 Geologia local/Poços perfurados	10
3.4 Hidrografia Local	12
4. METAS E OBJETIVOS.....	14
5. TRABALHOS PRÉVIOS.....	15
6.MATERIAIS E MÉTODOS	16
6.1 Métodos.....	16
6.2 Materiais.....	19
6.3 Trabalho Prévio e Obtenção de Dados	20
7. RESULTADOS OBTIDOS	21
8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	28
9. CONCLUSÕES.....	30
10.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. RESUMO DO PROJETO

O Projeto aborda o uso da geofísica (ferramenta indireta) para detecção de locais favoráveis à instalação de poços tubulares profundos em terrenos cristalinos.

Inicialmente foi feita uma avaliação das direções estruturais por meio de imagens Google Earth onde foram identificadas algumas estruturas. Também foi realizada uma avaliação prévia da geologia local para quantificar a técnica de resistividade a ser empregada (caminhamento elétrico e dimensionamento da abertura entre eletrodos, no caso). Após a quantificação da abertura (definida como $AB=MN=50m$ e seis níveis de investigação) optou-se por uma malha quadrangular (4 linhas) para o levantamento geofísico. A escolha deste tipo de malha, com duas linhas aproximadamente NS e interceptadas por outras 2 de direção aproximadamente EW, permite que sejam detectadas estruturas em quaisquer direções. As linhas de caminhamento elétrico foram processadas pelos programas Surfer 8 e RES2DINV. Foram detectadas as áreas de baixa resistividade indicativas de locais favoráveis à locação de poços tubulares. Os mapas elaborados com os resultados das 4 linhas de levantamento mostram estruturas identificadas pelos alinhamentos das anomalias de resistividade detectadas.

Finalmente, os resultados do levantamento geofísico permitiram uma locação segura para a perfuração do poço, que obteve uma vazão de $43,156\text{ m}^3/\text{h}$, muito superior a outros poços na região pesquisados no SIAGAS/CPRM (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas/Serviço Geológico do Brasil).

2. ABSTRACT

The Project addresses the use of geophysics (indirect tool) for the location of favorable areas for the installation of deep tubular wells in crystalline aquifer.

Initially, an evaluation of the structural directions was made using Google Earth images where some structures were identified. A previous assessment of the local geology was also carried out to quantify the resistivity technique to be used (electrical routing and sizing the gap between electrodes, in this case). After quantifying the opening (defined as $AB=MN=50\text{m}$ and six levels of investigation) a quadrangular mesh (4 lines) was chosen for the geophysical survey. The choice of this type of mesh, with two lines approximately NS and intercepted by another 2 lines approximately EW, allows structures to be detected in any direction. The electric walking lines were processed by Surfer 8 and RES2WIN programs. Areas of low resistivity indicative of favorable locations for the location of tubular wells were detected. The maps elaborated with the results of the 4 survey lines show structures identified by the alignments of the detected resistivity anomalies.

Finally, the results of the geophysical survey allowed a safe location for the drilling of the well, which had a flow rate of $43.156\text{ m}^3/\text{h}$, much higher than other wells in the region surveyed in the SIAGAS/CPRM (Groundwater Information System/Geological Survey of the Brazil).

3. INTRODUÇÃO

Os aquíferos cristalinos, como fontes de água, têm um grande potencial de exploração, pois muitas vezes estes aquíferos oferecem água de boa qualidade e, em diversos casos, com boa produtividade.

Como exemplo, no interior nordestino a seca é quase sempre uma constante há décadas, a geologia local é constituída em grande parte por rochas cristalinas e, quase sempre de menor capacidade de armazenamento de água que as rochas sedimentares. O Estado do Ceará, p. ex., é constituído por 80% de terrenos cristalinos da Província Borborema, e os aquíferos são pouco explorados pela dificuldade de identificação de zonas fraturadas para a locação de poços produtivos (Garces, 2019).

Além disso, em grande parte do Brasil são comuns as áreas cristalinas e sempre existe a necessidade de abastecimento hídrico.

Deste modo, entende-se a importância da busca por ferramentas eficazes e econômicas para locação otimizada de poços em terrenos cristalinos. O método da eletrorresistividade tem sido usado e já é consagrado como uma ferramenta de prospecção de aquíferos fraturados. No presente projeto, este método foi empregado com sucesso e são apresentados locais/mapas de anomalias de resistividades baixas que indicam pontos de locação favorável. Também é apresentado um poço já perfurado/locado com os resultados deste trabalho e com excelente produtividade.

Os dados empregados neste Trabalho de Formatura são resultado de levantamento executado para uma empresa da iniciativa privada e a mesma, infelizmente, não autorizou que fosse apresentada a localização da área trabalhada nem para quem foi efetuado o levantamento. Porém, pode-se dizer que a área de estudo se situa no estado de Goiás.

Os dados deste trabalho foram obtidos pelo reprocessamento e reinterpretação de deste levantamento de resistividade pré-existente, e são apresentados neste Trabalho de Formatura juntamente com os resultados do teste de bombeamento, perfil litológico e perfilagem gama e HRAT (High Resolution AcousticTeleviewer) – do poço perfurado que foi perfurado com base neste levantamento geofísico.

3.1 Localização

Na imagem satélite (Figura 1) é possível visualizar a área de interesse com a localização das linhas do levantamento, e dentro dos limites da mesma.

Identificou-se que as direções preferenciais das estruturas (falhas/fraturas) é NW e NE, em diferentes ângulos. Desta forma, a melhor estratégia para a detecção destas estruturas é a proposta por Gallas (2003) na qual estabelece-se uma malha quadrangular de forma a interceptar as possíveis estruturas quaisquer que sejam suas direções. A malha de levantamento realizada é a vista na Figura 1. Esta metodologia é eficaz mesmo que não se tenha conhecimento das direções preferenciais das estruturas.

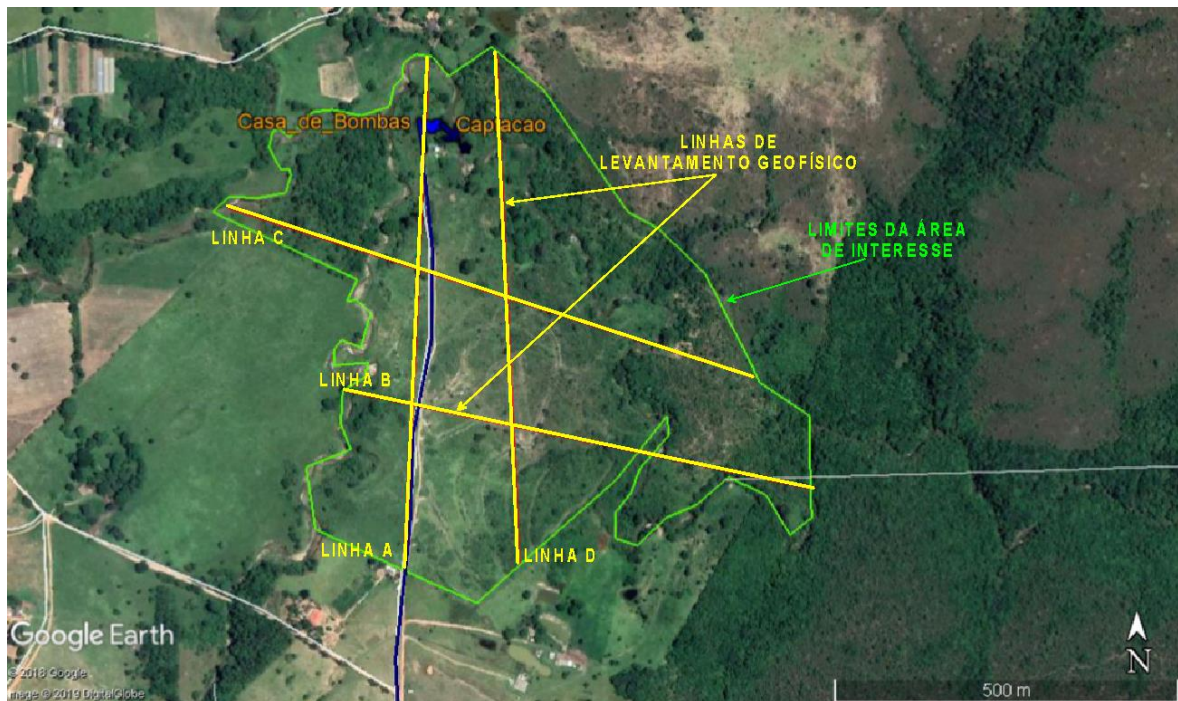


Figura 1: Malha de levantamento dos caminhamentos elétricos

3.2 Geologia Regional

A área de estudo está inserida no contexto da região do Brasil Central, na Faixa Brasília. Trata-se de uma unidade de dobramentos e empurrões gerados na orogênese brasileira de idade Neoproterozóica (~600Ma), localizada na borda oeste do Cráton São Francisco.

A Faixa Brasília compreende um cinturão de dobramentos com dois domínios principais: Domínio Interno, com unidades alóctones e alto grau de metamorfismo; e Domínio Externo, com estruturas de dobras e empurrões e médio a baixo metamorfismo (Uhlein *et al.*, 2012). Esta estrutura cobre os estados de Tocantins, Goiás e Minas Gerais; possui uma extensão de aproximadamente 1200 km e 300 km de largura (Figura 2).

Conforme Fuck *et al* (1994) pode-se distinguir as seguintes unidades estruturais: cratônica, externa e interna:

Unidade Estrutural do Cráton São Francisco

Constitui-se em algumas exposições do embasamento e coberturas fanerozóicas e pré-cambrianas (Fonseca *et al*, 1995). Domínio autóctone com embasamento sem deformação; os sedimentos carbonáticos são suavemente dobrados. Grupo Bambuí e Grupo Vazante fazem parte desta unidade (Uhlein *et al.*,2012).

Unidade Externa da Faixa Brasília

Compreende as unidades metassedimentares Mesoproterozóicas representadas pelos Grupos: Araí, Bambuí, Paranoá, Ibiaí, Canastra, além da Formação Vazante, sendo estruturadas em um cinturão de falhas e dobramentos com vergência para o Cráton São Francisco a leste do cinturão (Fonseca *et al*, 1995). Além destas unidades é possível observar porções do embasamento (Silva, 2012). Destacam-se os seguintes grupos desta unidade:

Grupo Araí: topo formado por uma sequência pelito-carbonática e base formada por quartzitos e rochas metavulcânicas (Uhlein *et al.*,2012).

Grupo Paranoá: a leste da faixa Brasília, é formada por uma sequência psamítica-pelítica que transita para oeste numa sequência pelítica-carbonática mais espessa (Uhlein *et al.*,2012).

Grupo Canastra: de ocorrência centro-sul da faixa, é o equivalente lateral do grupo acima, com metamorfismo mais intenso às vezes de fácies xisto-verde e deformação também mais intensa (Uhlein *et al.*,2012).

Grupo Ibiaí: metadiamictitos e xistos (Uhlein *et al.*,2012).

Unidade Interna da Faixa Brasília

É formada por unidades alóctones do Grupos Araxá e Serra da Mesa. O Grupo Araxá é formado por quartzitos, gnaisses, micaxistos e xistos verdes; ocupa uma extensão do oeste de Minas Gerais ao Centro-Sul de Goiás. O Grupo Serra da Mesa localiza-se ao norte da Faixa Brasília, e é constituído por xistos com granada, cianita e estaurolita intercalados com mármores e quartzitos (Uhlein *et al.*,2012).

O Maciço de Goiás se caracteriza por ser uma porção do embasamento que sofreu intensa influência tectônica. É formado por greenstonebelts e TTGs. Estes terrenos Arqueanos estão localizados na porção superior e meridional da Faixa Brasília.

Ocorrem, ainda, complexos máficos-ultramáficos localizados e sequências vulcano sedimentares proterozóicas (Pimentel *et al.* 2000).

A área de estudo encontra-se em específico no Grupo Canastra e próximo ao limite com o Grupo Paranoá, dentro da Faixa de Dobramentos Brasília.

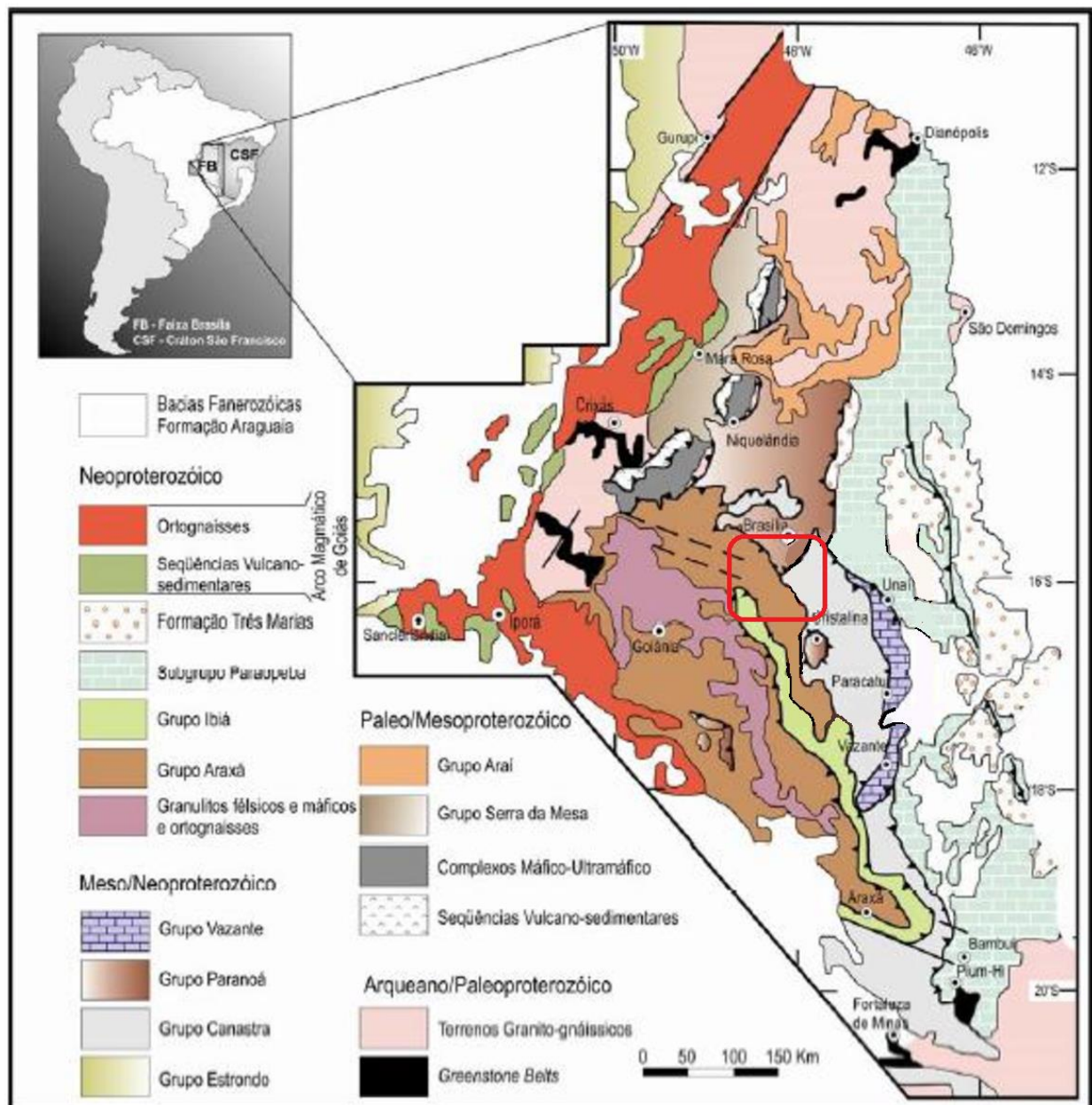


Figura 2: Mapa Geológico da Faixa de Dobramentos Brasília com área de estudo destacada em vermelho.
Modificado de Dardenne et al., 2000.

3.3 Geologia local/Poços perfurados

As rochas que compõem o aquífero cristalino do projeto são uma sequência de xistos de médio grau de metamorfismo, muitas vezes quartzosos, de coloração acinzentada e esverdeada desde a superfície até 300 metros (exceto a parte de solo com cerca de 15m) conforme perfil litológico do poço. Esta descrição é a que consta no perfil litológico do poço perfurado (Figura 18).

Alguns poços pesquisados no SIAGAS/CPRM descrevem a litologia composta por xistos, basicamente. No portal consultado, nem todos os poços próximos da locação/perfuração disponibilizaram dados litológicos. Assim, foram selecionados apenas aqueles com informações litológicas e/ou de vazão. Na figura 3 a seguir, esses poços são identificados com uma marcação em vermelho os poços com descrição litológica e vazão (poços 7, 8 e 9) e em azul os poços que trazem somente a vazão.

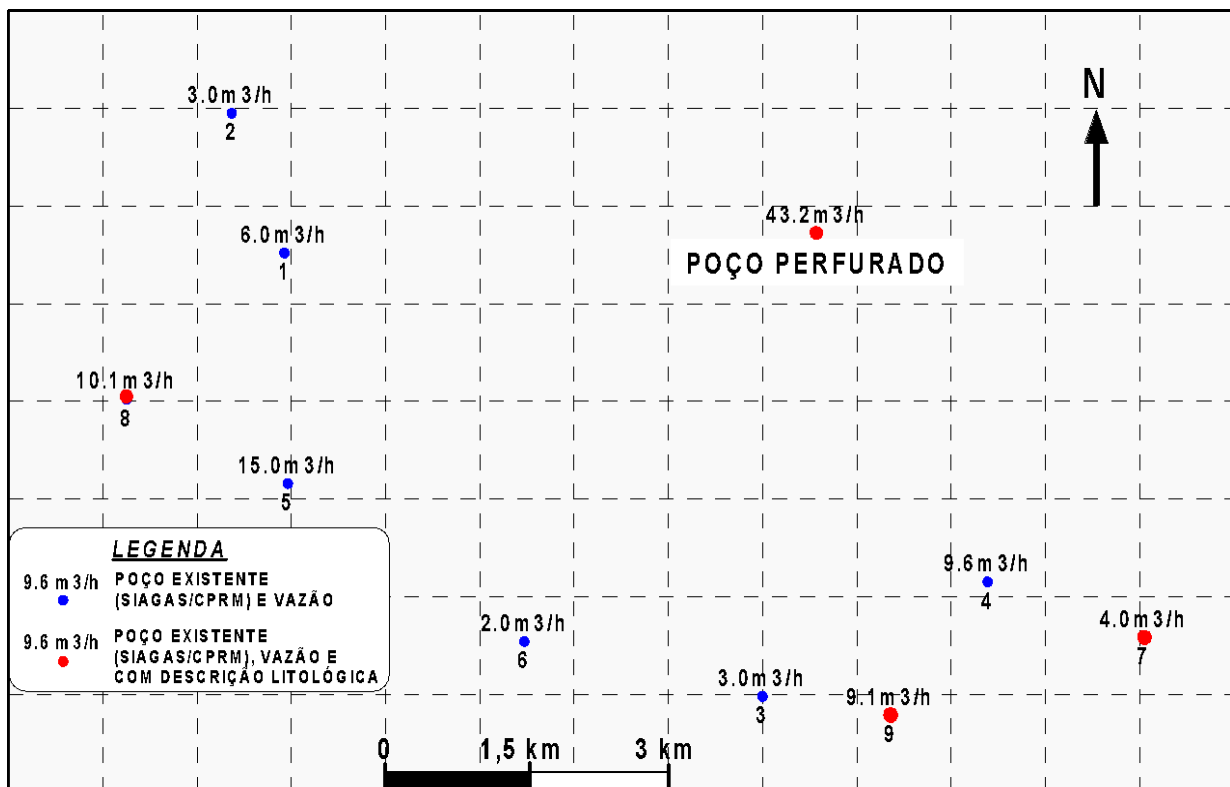


Figura 3: Mapa dos poços com vazão estabilizada próximos ao poço perfurado (Coordenadas ocultas).

As descrições litológicas são as seguintes (Fonte: SIAGAS/CPRM):

POÇO 7 (0-6m) - Topo composto por solo alterado vermelho amarelado, intercalado com fragmentos lateríticos.

(6-25m)- Filito alterado de cor amarela.

(25-140m)- Filito de cor cinza escuro, compacto. Apresenta xistosidade .

POÇO 8 (0-30m) - Latossolo de textura média com presença de fragmentos de rocha e argila.

(30-80m) - Rocha maciça xistosa, com fragmentos quartzosos.

POÇO 9 (0-2m) - Solo avermelhado areno-argiloso.

(2-84m) - Cobertura detríticalaterítica com intercalações ferruginosas. Rocha com intemperismo intenso.

(84-200m) - Micaxisto / filito.

Para ter-se uma visualização preliminar das estruturas da região avaliou-se uma imagem satélite que permitiu uma interpretação prévia de possíveis estruturas de falhas/fraturas que estão indicadas na Figura 4. O levantamento geofísico detectou estruturas que têm direção NW/SE e têm orientação semelhante às estruturas da interpretação prévia de mesma direção. A decisão para a indicação final da perfuração foi tomada com base nos lineamentos detectados pelas anomalias de resistividade. A Figura 4 identifica os perfis geofísicos (linhas A, B, C e D), estruturas interpretadas pela geofísica e as estruturas identificadas pela imagem de satélite.

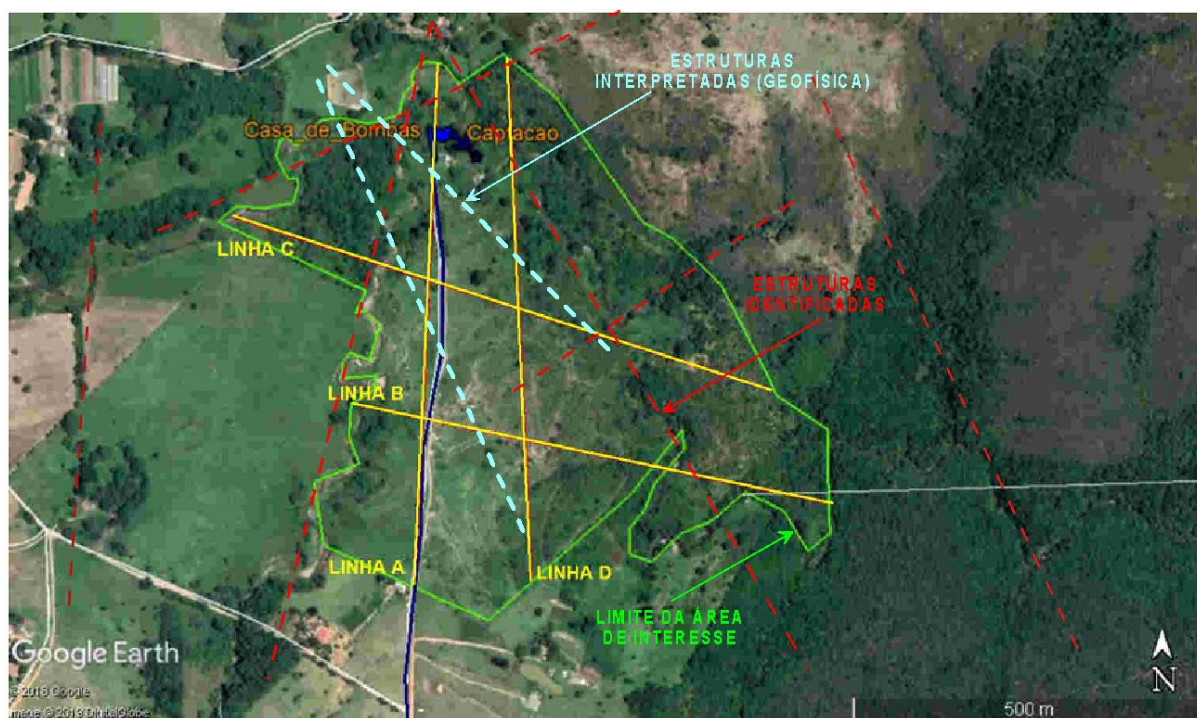


Figura 4: Imagem satélite com arranjo quadrangular das linhas de caminhamento, estruturas identificadas pela geofísica e as estruturas identificadas pela imagem de satélite.

Os dados da interpretação preliminar estrutural podem ser comparados com os resultados da interpretação geofísica das linhas de levantamento A, B, C e D na figura 4. Como já mencionado, a escolha de uma malha quadrangular (linhas aprox. NS e EW) intercepta estruturas independentemente da direção das mesmas. Vale destacar que o poço foi locado próximo da intersecção de estruturas definidas pela geofísica e interpretação prévia da imagem satélite. Ressalte-se que esta locação foi escolhida porque interpretou-se que a melhor anomalia de resistividade foi a detectada no ponto 650 da linha A.

3.4 Hidrografia Local

O rio mais próximo da área de estudo é o Rio Areias, que fica localizado dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (CBH Paranaíba), essa bacia drena uma área de mais de 220.000 km², e ocupa 63,3% da região do Estado de Goiás.

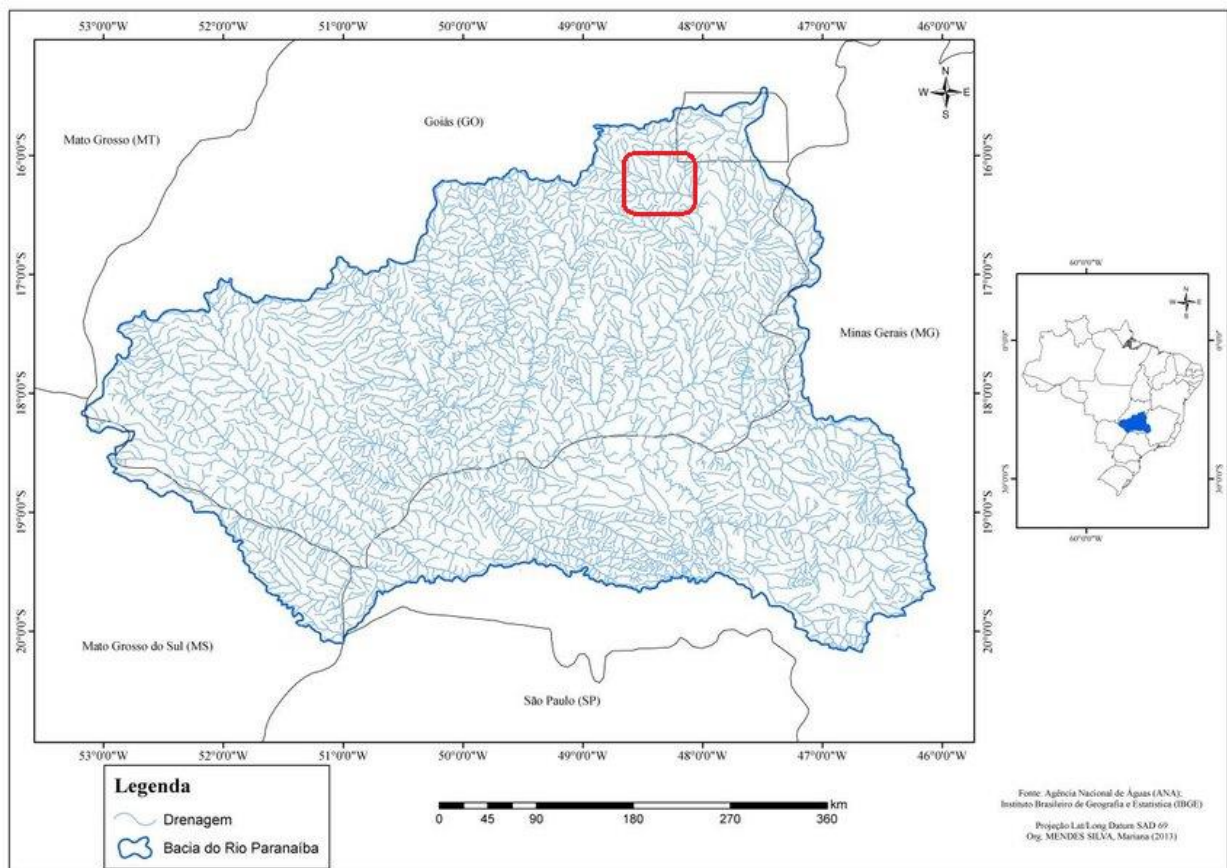


Figura 5: Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, com área de estudo destaca em vermelho. (Modificado de Silva and Ferreira, 2015).

Devido às variações altimétricas e posição geográfica, a bacia do Rio Paranaíba apresenta características climáticas diversificadas. Além disso, a atuação dos sistemas atmosféricos dinâmicos condiciona direta ou indiretamente o regime pluvial. De um modo geral, a bacia apresenta um regime tropical com duas estações (chuvosa e seca), bem definidas (Silva e Ferreira, 2015).

Entre os meses de outubro e março, ocorre o período de maior precipitação. O ápice do período chuvoso ocorre de dezembro a janeiro (ver figura 6 abaixo). A estação seca se inicia a partir de fevereiro.

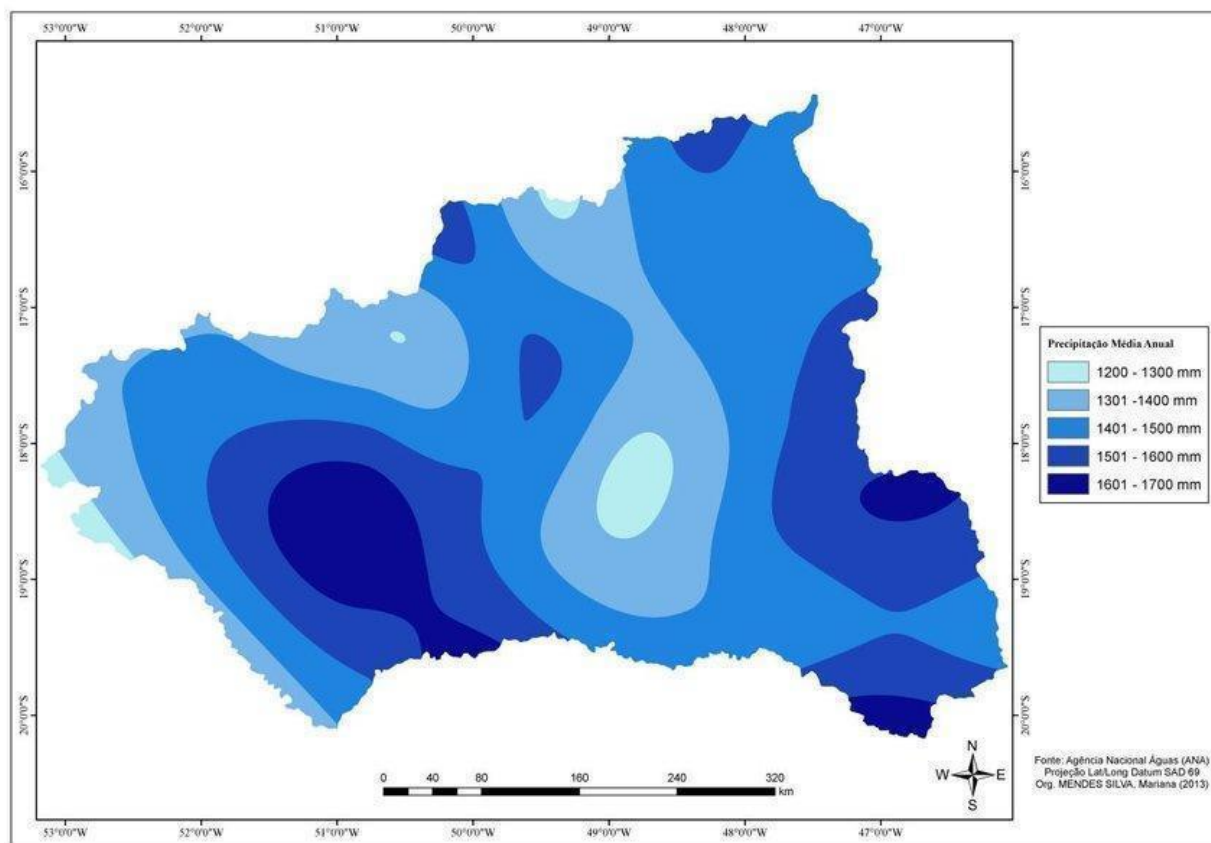


Figura 6: Mapa de precipitação média anual da bacia do Rio Paranaíba (Silva and Ferreira, 2015).

Nas porções leste, nordeste e sudeste; a precipitação média anual é maior. Isso ocorre devido ao fato dessa região ter uma altitude mais elevada e topografia aplainada. A porção oeste no baixo curso do rio Paranaíba também apresenta pluviosidade relativamente alta, pela influência dos sistemas atmosféricos do Sul, como as frentes polares (Silva e Ferreira 2015).

4. METAS E OBJETIVOS

O objetivo de um trabalho desta natureza é a a locação de poços para captação de água subterrânea, minimizando os riscos e evitando-se gastos desnecessários com poços improdutivos ou de baixa produtividade.

Empregando o método da eletrorresistividade é possível indicar locais que apresentam resistividades mais baixas (zonas fraturadas) que suas vizinhanças. Após a devida interpretação e correlação geológica, pode-se associar os alinhamentos das anomalias de baixa resistividade a estas estruturas. Estas estruturas podem ser correlacionadas a potenciais aquíferos em subsuperfície, uma vez que a existência de água subterrânea em áreas cristalinas só é possível em zonas fraturadas.

Esse projeto processou e reinterpreto dados pré-existentes obtidos em uma área onde visava-se a perfuração de um poço tubular profundo para exploração de água.

5. TRABALHOS PRÉVIOS

Gallas (2003) apresentou outro trabalho correlacionando o método de eletrorresistividade com investigação de estruturas em rochas cristalinas a fim de obter a localização destas feições favoráveis à existência de aquíferos, e assim possibilitar perfuração de poços com locações otimizadas. Como não havia informações a respeito das direções preferenciais das estruturas geológicas favoráveis (falhas/fraturas) na região (São José do Rio Pardo), as linhas de levantamento foram dispostas em malha quadrangular de caminamento elétrico, de forma a garantir interceptação das linhas com as falhas/fraturas quaisquer que fossem suas direções.

Foram levantadas 4 linhas de caminamento elétrico com a abertura de 40 metros entre os eletrodos ($AB=MN=40m$) e 5 níveis de profundidades. O resultado foi interpolado em pseudo-seções e posteriormente foi feita a inversão pelo software Res2dinv dos dados de modo a modelar a distribuição das resistividades no subsolo. Em conclusão, foi possível identificar na malha lineamentos de baixas resistividades, podendo ser interpretadas como zonas de falhas/fraturas e aumentando significativamente a chance de sucesso nas locações de poços tubulares nestes locais.

Pereira (2009) em sua dissertação de mestrado emprega a eletrorresistividade e emissão natural de radônio, com a finalidade de identificar zonas fraturadas em rochas cristalinas para a instalação de poços tubulares. Porém, devido às interferências e limitações físicas que a aplicação da eletrorresistividade pode enfrentar em áreas urbanas, o autor estabeleceu uma correlação entre eletrorresistividade devida a zonas de fraturas e emissão natural de radônio. A emissão natural de Rn como é um método alternativo à prospecção por métodos geoeletricos tradicionais, principalmente em áreas sujeitas a ruídos antrópicos. Os locais anômalos de emissão de Rn mostraram excelente correlação entre poços produtivos existentes localizados nestas anomalias.

Gallas&Giardin (2016) publicaram os resultados de um levantamento geofísico utilizando o método de eletrorresistividade com arranjo dipolo-dipolo em uma área de contexto de rochas cristalinas. Seu principal objetivo foi localizar prováveis estruturas de armazenamento de água neste tipo de rocha (fraturas/falhas) correlacionando esta feição geológica com a eletrorresistividade.

Foram ensaiadas 3 seções (denominadas A, B e C) de caminamento elétrico com espaçamento entre os eletrodos de 30 metros ($AB=MN=30m$) e 6 profundidades teóricas de investigação. As linhas A e B foram as de maior extensão e relevância, por isso a

apresentação dos perfis vista na publicação foi subdividida em duas para cada uma das seções. Os resultados obtidos foram pseudo-seções de resistividade para cada linha na forma de contorno de isovalores. A seguir foi efetuada a inversão (modelagem) de dados que buscam, teoricamente, uma aproximação da realidade da distribuição da resistividade pelo solo. O programa utilizado para inversão de dados foi o Res2dinv (2004).

O objetivo foi atingido com sucesso, tendo sido perfurados 2 poços tubulares nas zonas anômalas de baixa resistividade que mostraram excelente produtividade (75m³/h e 130m³/h) demonstrando a eficácia do método.

6.MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Métodos

No presente trabalho foram realizadas apenas atividades de escritório. Os programas Res2dinv e Surfer 8, foram empregados na elaboração dos mapas, pseudo-seções e seções modeladas de resistividade.

6.1.1 Teoria do Método da Resistividade

A resistividade de uma rocha decresce com sua porosidade e com o conteúdo de íons dissolvidos em seus poros (ou fraturas). Portanto, é comum que rochas cristalinas apresentem resistividades altas, se comparadas às rochas porosas (Keller & Frischknecht 1966, Telford et al, 1990).

A porosidade de rochas cristalinas (juntas/fraturas) é menor que em uma rocha sedimentar. E a condução elétrica que ocorre na natureza dá-se por condução iônica. A resistividade decresce com o aumento de íons dissolvidos.

Conforme a Lei de Archie (Gallas, 2000; apud Archie, 1942):

$$\rho = a\rho_w\phi^{-m}$$

onde

ρ = resistividade “bulk” (volumétrica ou total).

ρ_w = resistividade da água dos poros.

ϕ = porosidade expressa como uma fração por unidade de volume.

a → relativo à porosidade da rocha, sendo ligeiramente menor que 1 para rochas com porosidade intergranular e ligeiramente maior que 1 para rochas com “porosidade” devida a fraturamentos.

m → é o parâmetro de cimentação, sendo um pouco maior que 2 para rochas cimentadas e bem classificadas e um pouco menor que 2 para rochas mal

classificadas e mal cimentadas. Pela segunda Lei de Ohm, em um meio homogêneo, a resistência elétrica pode ser expressa pela seguinte equação:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

A resistência R é proporcional a L comprimento do condutor e inversamente proporcional à área de sua seção transversal. ρ é a resistividade elétrica. Porém, vale lembrar que em condições reais, o substrato não é homogêneo e, portanto, não representa somente uma resistividade. Para um levantamento geofísico usando o método de eletrorresistividade são usados dois pares de eletrodos AB e MN, sendo o primeiro para injeção de corrente e o último para medição de potencial (ΔV). Tais eletrodos são dispostos na superfície de um substrato composto de diferentes resistividades $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ (Figura 7) e medirão uma resistividade final ρ_a , dita resistividade aparente.

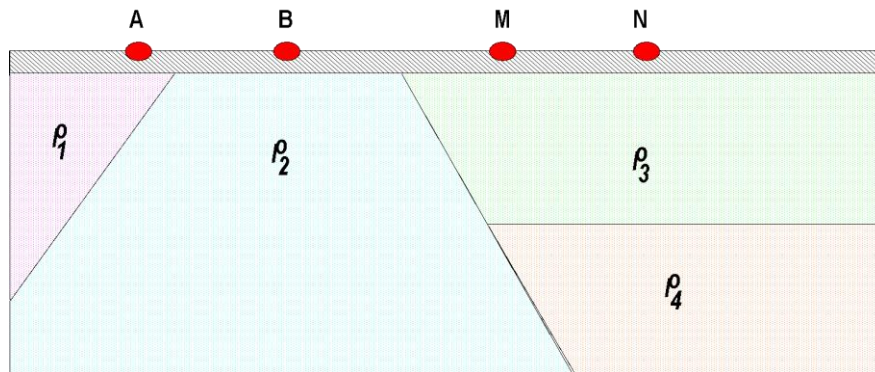


Figura 7 – Substrato heterogêneo. Adaptado de Gallas (2000).

A resistividade aparente não é a resistividade real, não se iguala a nenhuma das outras medidas e não é a média. Trata-se de uma contribuição de todas as outras e suas geometrias distribuídas. O cálculo da resistividade aparente é obtido a partir da relação usada para meios homogêneos, empregando os dois pares de eletrodos AB e MN (Orellana, 1972, Gallas, 2000).

O cálculo é feito por meio da seguinte equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Onde K é um coeficiente geométrico que depende da disposição e dimensão dos 4 eletrodos envolvidos nas medidas, sendo:

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

O arranjo dos dois pares de eletrodos vai depender do objetivo do trabalho. Para investigações de heterogeneidades verticais, deve ser usada a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) ideal para meios planoestratificados (ambientes sedimentares, p. ex.). Para heterogeneidades laterais, como falhas e diques, é usada a perfilagem horizontal ou caminhamento elétrico (CE). Este último é o caso deste trabalho. A figura 8 ilustra o sentido da investigação para estas duas técnicas.

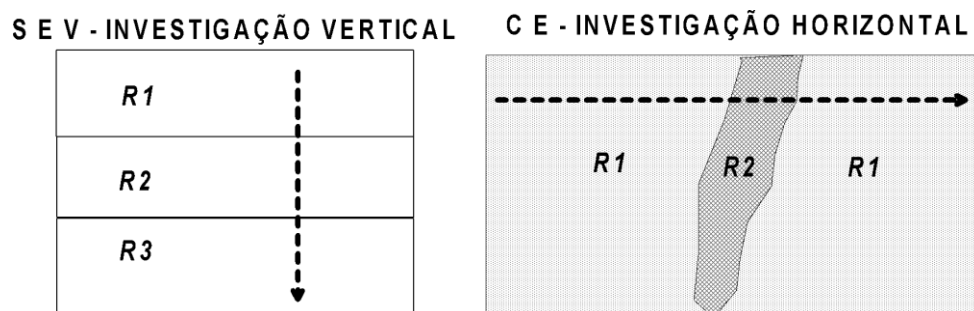
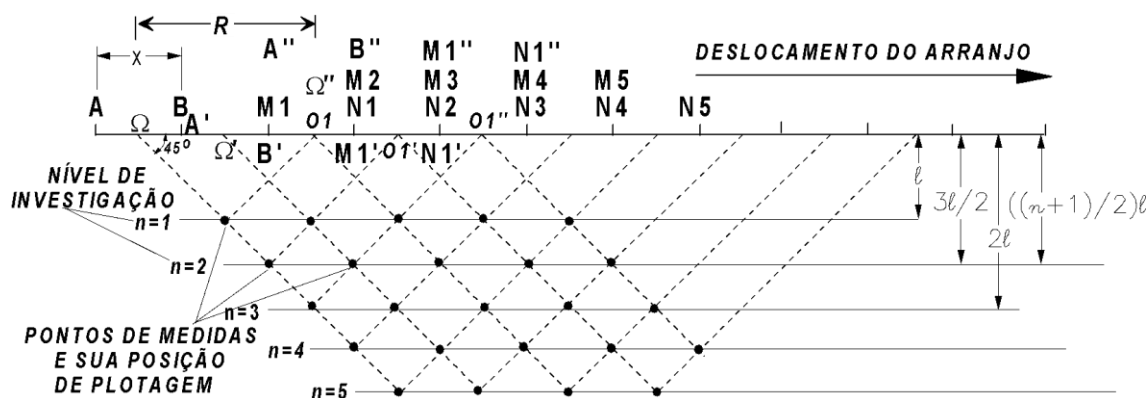


Figura 8 – Sentido da investigação da resistividade para SEV e CE (adaptado de Gallas, 2019).

Caminhamento Elétrico

Como mencionado, para a investigação de heterogeneidades horizontais, é usado o estudo do caminhamento elétrico. Podem ser usadas diversas configurações dos eletrodos. A mais usada é o arranjo dipolo-dipolo (figura 9).



O espaçamento entre os 2 pares de eletrodos é o mesmo, $AB=MN=\ell$. Primeiramente são fixados os eletrodos de injeção de corrente AB, realizam-se as medidas conforme movem-se os eletrodos MN com deslocamentos iguais ao longo do perfil ($\ell = M_1N_1=M_2N_2,...M_nN_n$).

Em seguida, os eletrodos AB são movidos e efetuam-se as medidas entre os eletrodos M1'N1', M2'N2',... e assim sucessivamente.

Os pontos de plotagem são atribuídos na intersecção de 45° entre as origens Ω e $O1$, como visto na Figura 9 e indica a profundidade teórica naquele ponto. A profundidade é dada por $(n+1)l/2$, sendo n o nível investigação.

6.2 Materials

O resistivímetro usado para o trabalho de campo foi o Syscal Jr (fabricação francesa Iris Instruments), 100W de potência e dois canais (figura 10), além de eletrodos, fios, materiais diversos e um GPS de mão Garmin.

O Microsoft Excel foi usado na estruturação dos arquivos de dados de campo. As informações obtidas foram planilhadas de forma específica para cada software usado.

O Res2dinv foi utilizado para inversão (modelagem) dos dados a fim de se obter um resultado de distribuição de resistividade mais próximo da realidade. O formato de arquivo para este programa é do tipo .dat ou .txt. Nos processos de inversão também foram consideradas as cotas topográficas de cada estação medida.

Os levantamentos de caminhamento elétrico inicialmente são apresentados como pseudo-seções que dão uma apresentação prévia das resistividades no subsolo.

Para a obtenção uma seção de resistividade mais precisa, torna-se necessária a aplicação de processos de inversão nos dados que, teoricamente, levam a uma aproximação razoável de modelos para diversas estruturas geológicas. Estes processos de inversão foram empregados no tratamento dos dados deste levantamento usando-se o software Res2dinv que faz uma modelagem bi-dimensional.

Após o processamento são obtidas as seções modeladas de resistividade que resultam deste processo de inversão 2-D que visam estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície. As eventuais distorções nas pseudo-seções do arranjo de eletrodos (dipolo-dipolo, no caso) são, teoricamente, eliminadas pelos processos de inversão.

O Surfer 8 foi empregado para a apresentação das pseudo-seções e seções modeladas. Os resultados da inversão/modelagem pelo Res2dinv foram exportados como arquivos XYZ e interpolados pelo Surfer 8 de forma a obter-se uma melhor apresentação dos dados. Com este mesmo software também foram gerados mapas da malha (por nível de investigação) de resistividade.

Utilizou-se o Google Earth para apresentar os lineamentos de baixa resistividade, posições das anomalias individualmente e estruturas observadas nestas imagens de satélite.



Figura 10 – Syscal Júnior.

6.3 Trabalho Prévio e Obtenção de Dados

Este Trabalho de Formatura é um reprocessamento e reinterpretação dos dados de um levantamento geofísico existente.

Neste trabalho foram levantadas quatro linhas de caminhamento elétrico. Adotou-se uma abertura do dipolo $AB=MN=50m$ e seis níveis teóricos de investigação (figura 9). O número de níveis e a abertura de eletrodos adotados são suficientes e com bom detalhe para atingir a rocha sã no primeiro ou segundo nível (Gallas, 2003) e assegurar que se atinja a rocha após o pacote solo+rocha alterada e detectar as possíveis fraturas.

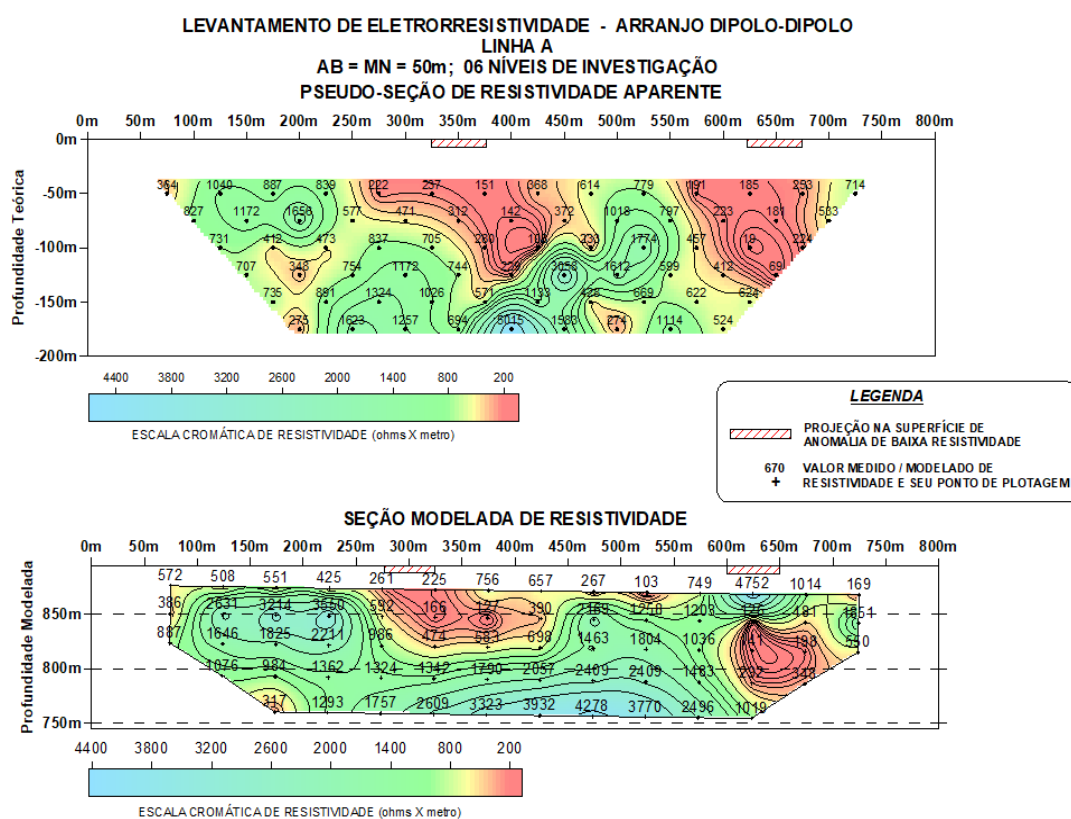
O equipamento empregado foi o Syscal Júnior já descrito no item 6.2 (Figura 10).

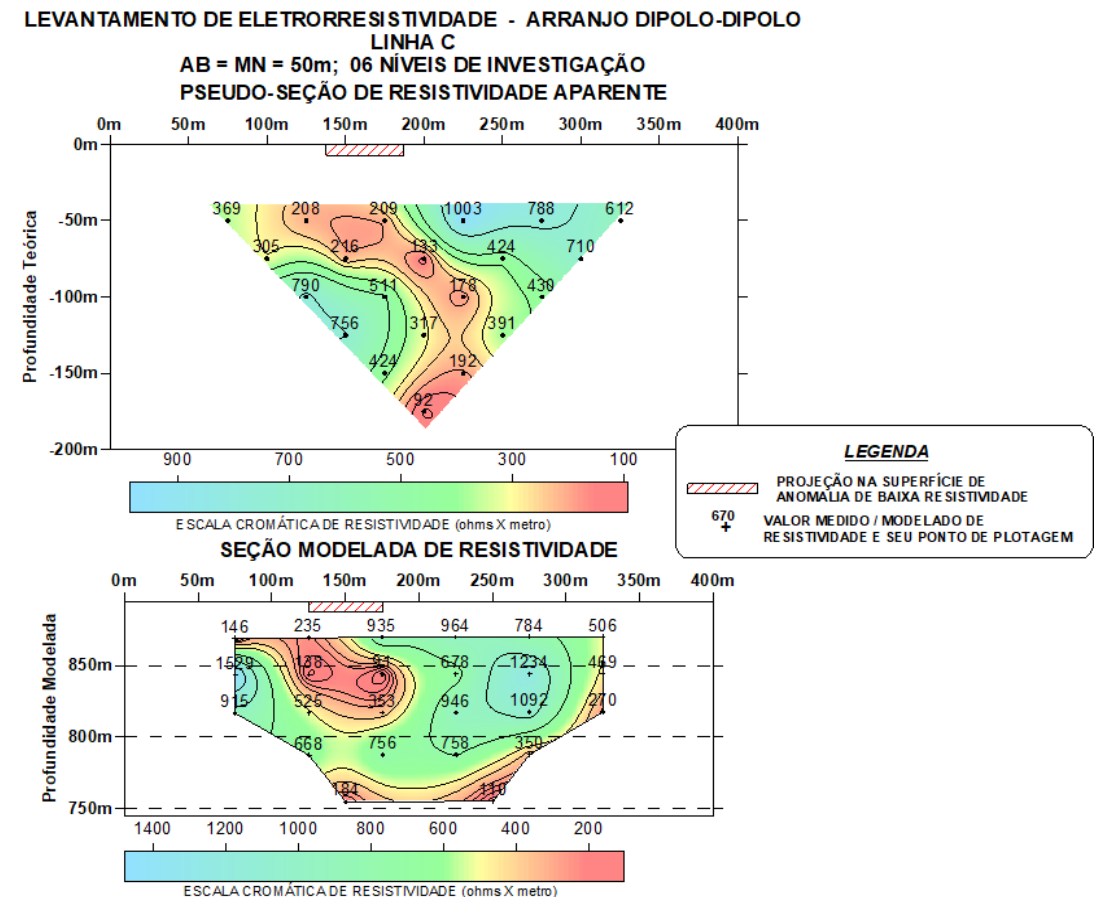
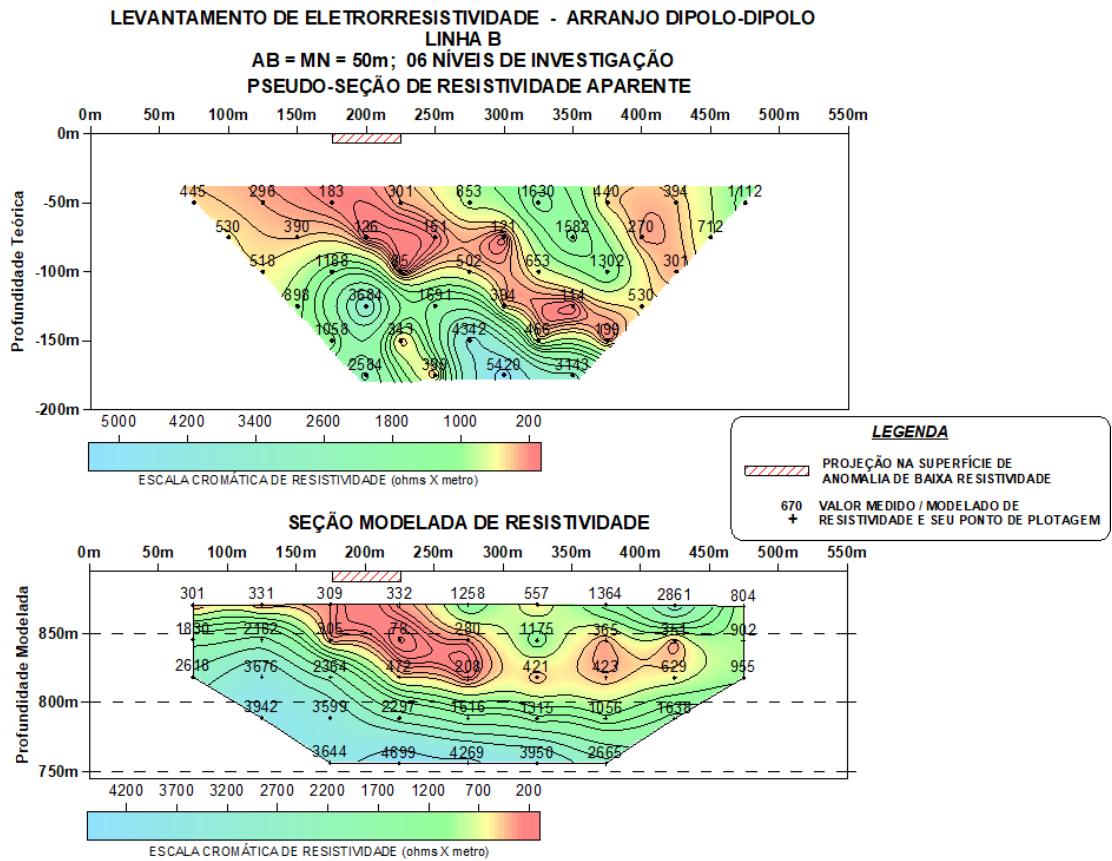
7. RESULTADOS OBTIDOS

Foram geradas as pseudo-seções e seções modeladas resistividade para cada linha levantada, além da elaboração dos mapas de resistividade da área estudada. Estes mapas mostram a distribuição das resistividades e são fundamentais para que se identifiquem os alinhamentos estruturais.

As figuras 11 a 14 trazem as pseudo-seções e seções modeladas de resistividade das linhas A, B, C e D.

A profundidade efetivamente investigada corresponde a todo o estrato geoeletrico compreendido entre a superfície (0m) e até 47m para o segundo nível, da superfície (0m) até 74m para o terceiro nível e da superfície (0m) até 103m para o quarto nível. Ou seja: à medida que aumenta a profundidade, diminui a precisão das medidas, pois as medidas corresponderão a todo intervalo abrangido pela penetração da corrente elétrica (e do campo elétrico). Vale observar o item 6.1.1 Teoria do Método da Resistividade, notadamente a figura 7, bem como a figura 9 do subitem Caminhamento Elétrico.





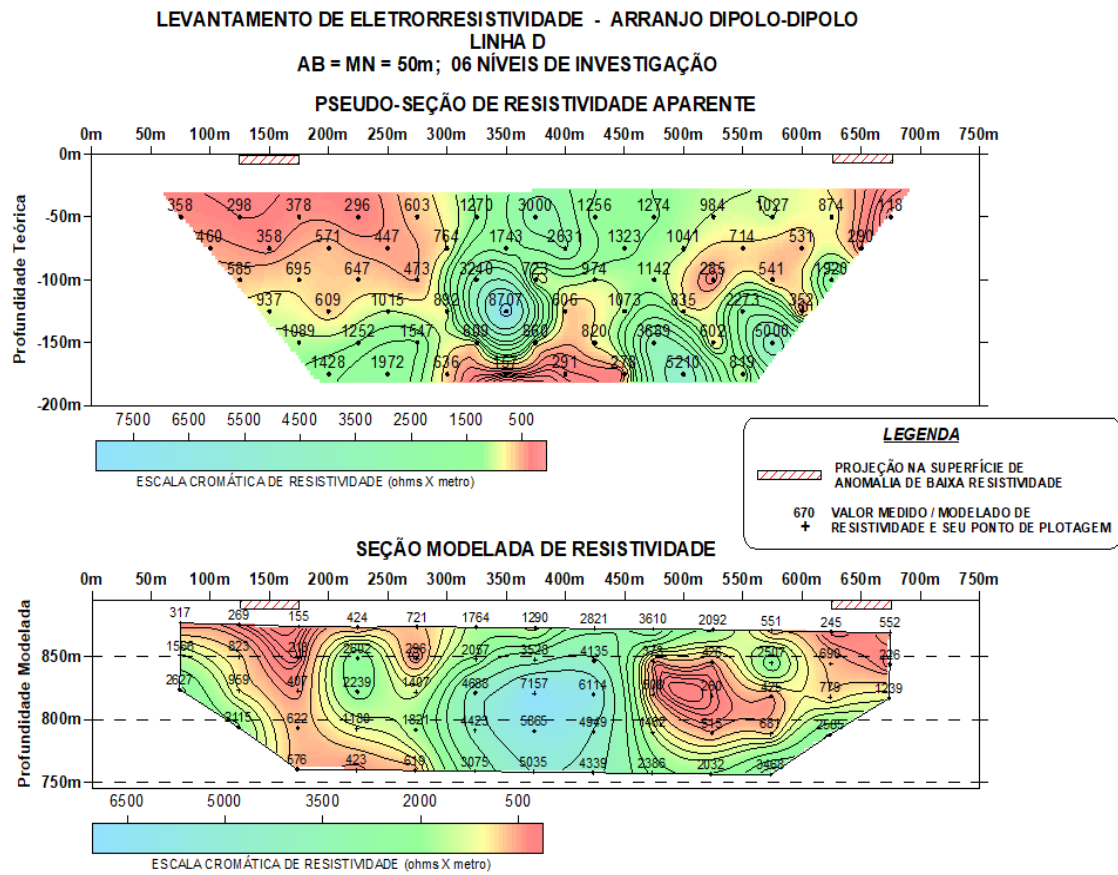


FIGURA 14 - PSEUDO-SEÇÃO E SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE DA LINHA D.

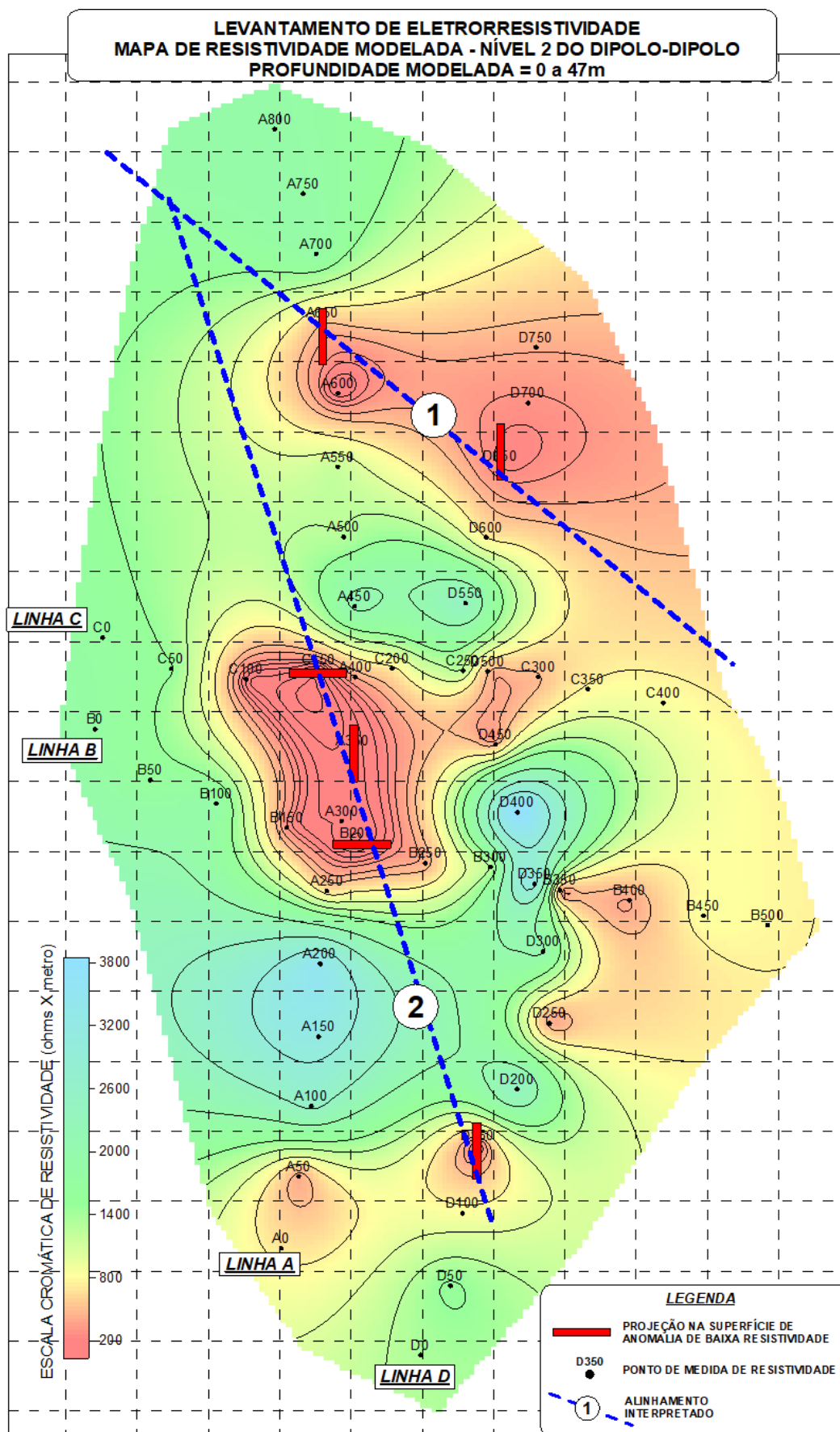


FIGURA 15 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 2 DO DIPOLO-DIPOLO.

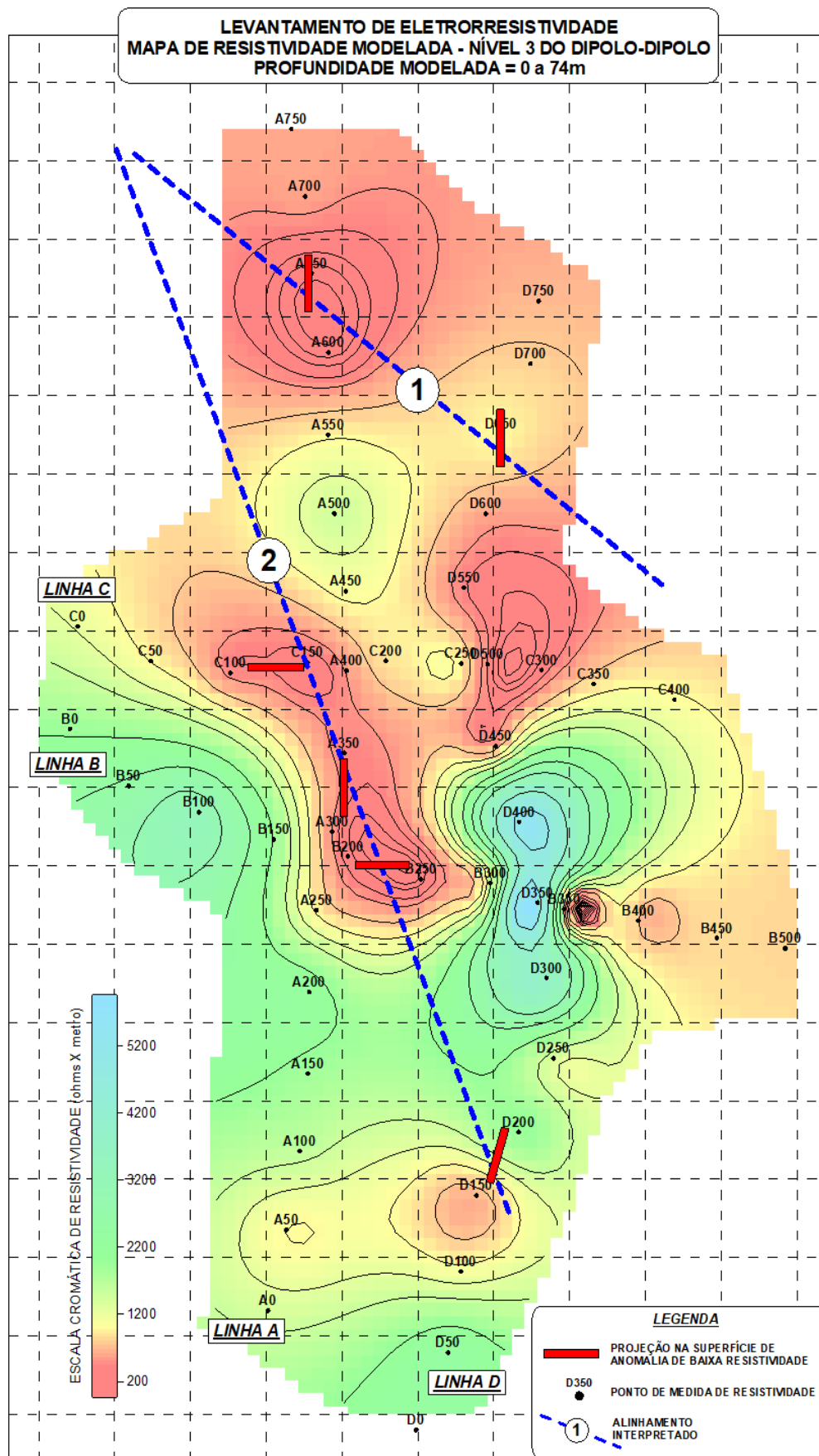


FIGURA 16 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 3 DO DIPOLO-DIPOLO.

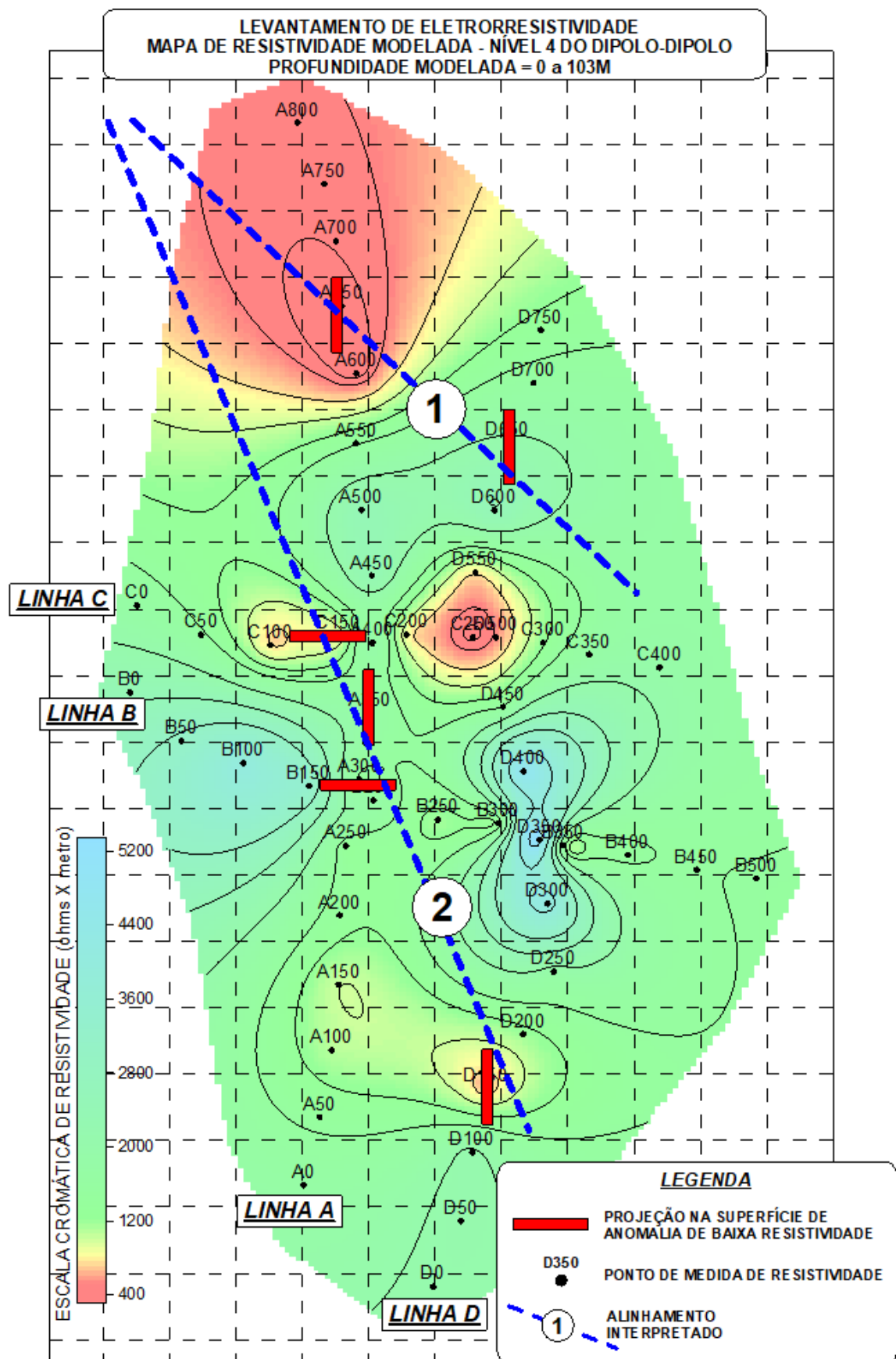


FIGURA 17 - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - NÍVEL 4 DO DIPOLO-DIPOLO.

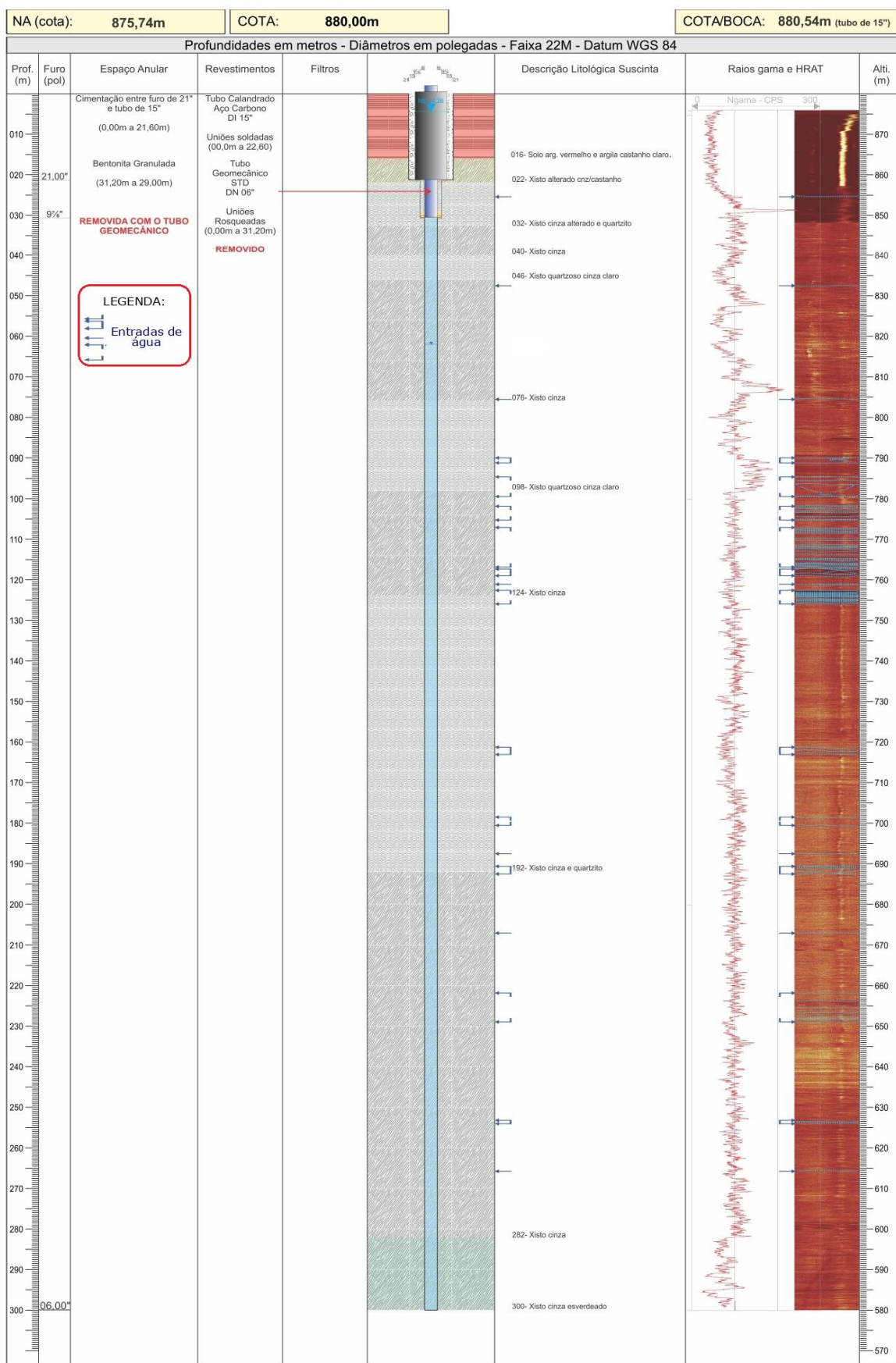


Figura 18: Perfil construtivo, litológico e perfilagem HRAT do poço locado na estrutura 1.

As pequenas setas em azul no lado direito do perfil litológico correspondem às entradas de água, que se relacionam com fraturas identificadas pela perfilagem e HRAT (High Resolution Acoustic Televiewer). O HRAT é um moderno equipamento de imagens acústicas, que permite a identificação de todas as fraturas e seus respectivos azimutes, mergulhos e aberturas. Foram identificados fraturamentos desde o início da rocha até 270m havendo uma maior concentração no intervalo entre 90 e 126 metros de profundidade no perfil.

O poço apresenta uma excelente produtividade para poços instalados em terrenos cristalinos, com uma vazão média diária de 43,156 m³/h. Se comparado aos outros poços nas proximidades (distantes poucos quilômetros) e que muito provavelmente foram localizados sem estudo geofísico e apresentam vazões muito inferiores, conforme visto na figura 3.

Com a consulta aos dados do SIAGAS/CPRM foi possível reunir vários poços tubulares do município onde foi feito o projeto e fazer uma comparação de produtividade com o poço instalado na área de estudo. Ao total foram vistos dados de 67 poços.

Destes poços, 54 apresentaram dados de vazão estabilizada, sendo a maior delas de 16,46 m³/h. A média foi de aproximadamente 5,5 m³/h, muito inferior à produtividade do poço apresentado neste projeto, que foi de 43,125 m³/h.

Considerando que a maioria destes 57 poços foram localizados sem a técnicas geofísicas, pode-se afirmar que as regiões anômalas de baixa resistividade são um ótimo critério para locação de um poço.

Para uma comparação em escala local, foi feito um mapa reunindo 9 poços próximos do poço do projeto em questão, com dados de vazão média disponibilizados pelo SIAGAS/CPRM (ver figura 3).

Na figura, é possível observar a diferença de vazão entre os poços. A média de vazão dos 9 poços próximos ao poço perfurado é de 10,5 m³/h, evidenciando novamente a superioridade de produtividade do poço localizado com a geofísica.

8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na área estudada foram interpretados 2 alinhamentos relacionados a estruturas subsuperficiais relacionados a zonas de fraturas que potencialmente podem se constituir em aquíferos.

Na figura 19 foram assinaladas estas estruturas e numeradas de 1 a 2.

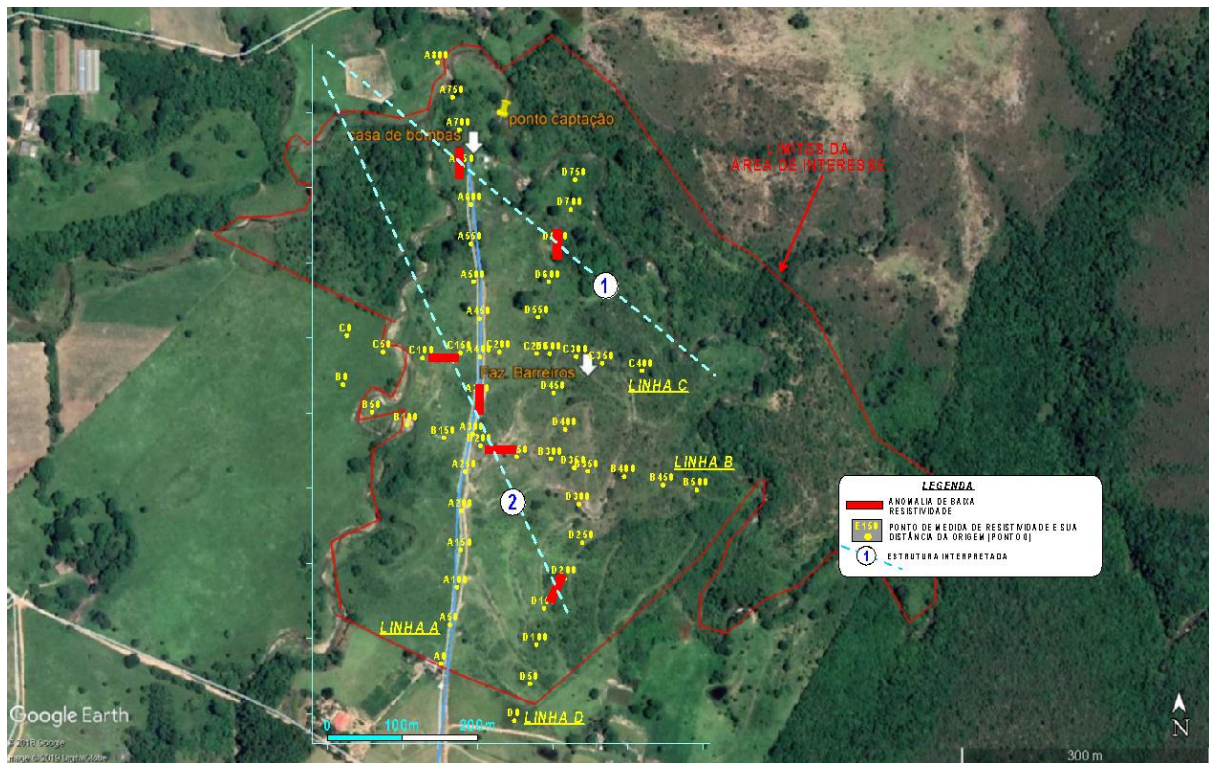


Figura 19: Mapa satélite das estruturas detectadas a partir do levantamento geofísico.

Considerou-se que a estrutura mais importante é a de número 1. Esta estrutura tem direção NW (aprox. N40W) e é constituída pelas anomalias das linhas A e D (estacas 650m em ambas). O poço perfurado neste projeto foi locado nela, no ponto A650.

A estrutura 2 mostrou-se também com potencial, dada a continuidade das anomalias detectadas.

A interpretação levou a concluir que as anomalias do alinhamento 1 têm melhor definição que as do alinhamento 2 porque as anomalias de resistividade que o constituem têm uma melhor definição, principalmente a do ponto A650.

As anomalias detectadas e suas posições são as seguintes:

Linha A:

Ponto 350m;

Ponto 650m.

Linha B:

Ponto 200m.

Linha C:

Ponto 150m.

Linha D:

Entre pontos 150-200m.

Ponto 650m.

Por fim, conclui-se que as principais locações, em ordem de prioridade, para futuros poços para exploração dos aquíferos são as seguintes:

Estrutura 1, linha A, ponto 650m.

Justificativa: trata-se de um alinhamento de direção NW, concordante com a maioria das estruturas esperadas para a região e próxima à intersecção da estrutura 2. Anomalia de baixa resistividade bem definida nas linhas de caminhamento, sendo a mais adequada para interpretação de uma possível estrutura. A estrutura é interceptada pelas linhas A e D.

Estrutura 2, linha D, ponto 650m.

Justificativa: trata-se do mesmo alinhamento de direção NW, concordante com a maioria das estruturas esperadas para a região. A estrutura é interceptada pelas linhas A, B, C e D do levantamento geofísico.

9. CONCLUSÕES

O aprendizado profissional que este Trabalho de Formatura proporcionou foi a importância da utilização de métodos indiretos (neste caso a geofísica empregando-se a resistividade) para a locação de poços em terrenos cristalinos.

O método da eletrorresistividade é uma técnica indireta de prospecção muito eficaz na detecção de estruturas (falhas ou fraturas) em rochas cristalinas. Essas estruturas muitas vezes correspondem a aquíferos e armazenam água.

Estas estruturas, quando saturadas em água e material de alteração, são enriquecidas em íons livres e partículas em suspensão, o que permite uma mais eficiente condução de corrente elétrica. Deste modo, essas regiões são caracterizadas por apresentarem baixa resistividade, pois um eletrólito rico em íons e material particulado permitirá que a corrente elétrica se propague com maior facilidade, resultando em anomalias de baixas resistividades.

Assim, pode-se estabelecer uma correlação entre zonas de baixa resistividade e falhas/fraturas. A diferença de resistividade entre rochas cristalinas não fraturadas e regiões fraturadas nas mesmas é grande, por isso são detectáveis pela resistividade. Esta diferença é observada nas pseudo-seções, seções modeladas e nos mapas apresentados.

Deste modo, para cada linha de caminhamento (figuras 11 a 14) foram indicadas as regiões de baixa resistividade. Estas indicações também foram feitas nos mapas dos diferentes níveis de profundidade (figuras 15 a 17), sendo possível interpretar as possíveis estruturas pelos alinhamentos das anomalias de resistividade.

Pode-se concluir que os objetivos – identificar os principais lineamentos relacionados às falhas/fraturas e suas interligações – estabelecidos neste trabalho foram alcançados, uma vez que o conhecimento da geologia juntamente com a utilização do método da eletrorresistividade permitiu a localização de locais ideais para locação de poços tubulares em terrenos cristalinos. A efetividade da utilização do método foi comprovada pela diferença de vazão entre o poço do projeto e os poços vizinhos.

10.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146(01), 54-62.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/> (08/2021)

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (CBH Paranaíba) - <https://cbhparanaiba.org.br/> (08/2021)

Dardenne M. A., 2000. The Brasília Fold Belt. In: U.G. Cordani, E. J. Milani, A. Thomaz Filho & D. A. Campos 2000. Tectonic evolution of South America. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, SBG. p. 231-263.

Fonseca, M. A., Dardenne, M. A., Uhlein, A. 1995. Faixa Brasília Setor Setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectônico. Revista Brasileira de Geociências, vol. 25(4), p.: 267-278.

Fuck, R.A. 1994. A faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica na Província Tocantins. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO - OESTE, 4. Brasília, 1994. Anais...Brasília, SBG, p.184-187.

Fuck, R.A. ; Pimentel, M.M. & Silva, L.J.H.D. 1994. Compartimentação Tectônica na porção oriental da Província Tocantins: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38. Carnabriu, 1994. Anais: Carnabriu, SBG .v.1, p 215-216.

Gallas J. D. F., 2019. Apostila da disciplina Geofísica Aplicada (GSA0308). "Alguns Métodos Geoeletricos Usados em Geologia Ambiental, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Prospeção Mineral".

Gallas, J. D. F., & Giardin, A. (2016). Eletroresistividade na prospecção de aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, 30(1), 119–138. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28496>

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.

Gallas, J. D. F. 2000 – Principais Métodos Geoeletricos e suas Aplicações em Prospeção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Rio Claro, 174p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Garces, A. D. S. (2019). Prospecção de água subterrânea por eletroresistividade em terrenos cristalinos.

Keller, G. V. & Frischknecht, F. C. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford: Pergamon Press, 1977, 517 p.

Pereira, Claudio Marcio Almeida. (2009). Mapeamento de aquíferos fraturados empregando métodos geoeletricos e emissão natural de radônio. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.44.2009.tde-08092009-162406. Acesso em: 2021-05-09.

Pimentel M.M., Fuck R.A., Yost H., Armstrong R.A., Ferreira Filho C.F., Araújo S.M. 2000. The basement of the Brasília Fold belt and the Goiás Magmatic Arc. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos. 2000. *Tectonic Evolution of South America*. 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro, p.195-229.

RES2DINV ver. 3.54. 2004. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2-D and 3D*. Geotomo Software, Malaysia.

Silva, M. M., & Ferreira, V. O. (2015). Duração da estação chuvosa e ocorrência de veranicos na Bacia do Rio Paranaíba. *Revista Do Departamento De Geografia*, 29, 100-115. <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102096>

Silva, C. H. da, Simões, L. S. A., Damázio, W. L., Ferreira, S. N., & Luvizotto, G. L. (2012). O Grupo Canastra em sua área-tipo, região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais . *Geologia USP. Série Científica*, 12(2), 83-98. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000200006>

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

Uhlein, A., Fonseca, M. A., Seer, H. J., Dardenne, M. A. 2012. Tectônica da Faixa de Dobramento Brasília – Setores Setentrional e Meridional. In: *Geonomos, Minas Gerais*, vol. 20(2), p.: 1-14.