



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**EDUARDO NUNES CAPELO ALVITE**

**INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS ELÉTRICOS, ELETROMAGNÉTICOS E  
AEROFOTOGRAMETRIA PARA PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM  
AMBIENTE FISSURAL NO MUNICÍPIO DE CEDRO-CE, BRASIL**

**FORTALEZA**

**2022**

EDUARDO NUNES CAPELO ALVITE

INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS ELÉTRICOS, ELETROMAGNÉTICOS E  
AEROFOTOGRAMETRIA PARA PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM AMBIENTE  
FISSURAL NO MUNICÍPIO DE CEDRO-CE, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

Coorientador: Dr. Jackson Alves Martins.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

Al i Alvite, Eduardo Nunes Capelo.

Integração de métodos elétricos, eletromagnéticos e aerofotogrametria para prospecção hidrogeológica em ambiente fissural no município de Cedro- CE, Brasil / Eduardo Nunes Capelo Alvite. – 2023.  
87 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

Coorientação: Prof. Dr. Jackson Alves Martins.

1. Geofísica aplicada. 2. Métodos elétrico e eletromagnético. 3. Hidrogeologia. 4. Poços tubulares. I.  
Título.

CDD 551

---

EDUARDO NUNES CAPELO ALVITE

INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS ELÉTRICOS, ELETROMAGNÉTICOS E  
AEROFOTOGRAMETRIA PARA PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM AMBIENTE  
FISSURAL NO MUNICÍPIO DE CEDRO-CE, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 28 / 10 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cícero Roberto Teixeira Regis  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

---

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

---

Profa. Dra. Karen Maria Leopoldino Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)  
(Suplente)

A Deus.

Aos meus pais, por toda a criação e ensinamentos que me deram coragem e determinação para encarar os desafios da vida.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Pesquisa - FUNCAP, pelo apoio financeiro para execução dos trabalhos de pesquisa, via edital INOVAFIT Fase 1 08/2018.

Ao Prof. Dr. Raimundo Mariano Castelo Branco, pela parceria, apoio e cumplicidade, muito mais valiosos que qualquer simples orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Cícero Roberto Teixeira Regis e Dr. Francisco José Fonseca Ferreira pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao meu primeiro sócio e irmão, Caio César Alves Jucá, por ser sempre um exemplo de determinação e trabalho a ser seguido.

Aos meus demais sócios, Cristian Dikson Araújo da Silva e Jonathan Lima Castelo Branco, pelo companheirismo e apoio.

À minha amiga, colega de turma e professora da Universidade Federal do Ceará, Dra. Karen Maria Leopoldino Oliveira, que me enche de orgulho pela competência e sabedoria, por aceitar e por conduzir com toda a paciência, o árduo desafio de ajudar na minha orientação.

“Não existem métodos fáceis para resolver problemas difíceis.” (René Descartes).

## RESUMO

No semiárido do Nordeste do Brasil, onde ocorre o fenômeno natural da seca, predomina o sistema fissural, que é reconhecido por baixo custo/benefício em relação à construção de poços tubulares e aproveitamento de águas subterrâneas. Diante disso, esta pesquisa buscou o aprimoramento e uma prospecção mais eficaz na exploração desses recursos. Para isso, foram utilizados dados de histórico de poços, dados geológicos e estruturais, métodos geofísicos integrados (eletrorresistividade e eletromagnético) e sensoriamento remoto com drone, com o objetivo de melhorar esse índice de aproveitamento. Com esse enfoque, a metodologia proposta foi aplicada em um ambiente controlado em Cedro-Ceará, tornando possível a escolha da ordem de aplicação dos métodos, sendo o eletromagnético um método preliminar e a eletrorresistividade um método para detalhamento. Foram estabelecidos quantitativos mínimos recomendados em relação à área de investigação. Os arranjos dipolo-dipolo e o Wenner-Schlumberger foram melhor adequados, com espaçamento entre eletrodos máximo de 10 metros. Todos esses dados, integrados com a geologia estrutural, foram suficientes para explicar os resultados negativos dos poços existentes, bem como os melhores resultados, associados a estruturas rúpteis encontradas na área. Essa metodologia possibilitou analisar diferentes respostas e, assim, definir um conjunto de procedimentos básicos para melhorar a assertividade desses procedimentos.

**Palavras-Chave:** poços tubulares; métodos elétrico e eletromagnético; sistema fissural.

## ABSTRACT

The semi-arid Domain of the Northeast of Brazil, where the natural and periodic phenomenon of drought occurs, the fissural system predominates and is recognized for its low cost/benefit ratio related to the construction of tubular wells and the use of groundwater. Therefore, this research aimed to improve prospecting more effectively in the exploitation of these resources. To achieve this, wells historical data, geological and structural data, integrated geophysical methods (resistivity and electromagnetic) and remote sensing with drone were used. The analysis allowed to establish minimum recommended quantities in relation to the research area. The dipole-dipole and Wenner-Schlumberger arrays were better suited, with a maximum electrode spacing of 10 meters. These results integrated with the structural geology showed the features related to the exploration failures of the existing wells, as well as the successful wells, associated with brittle structures found in the area. This methodology made it possible to analyze different responses and, thus, define a set of basic procedures necessary for the location of tubular wells in these regions with greater accuracy.

**Key words:** tubular wells; resistivity and electromagnetic methods; fissural system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Localização da região de estudo englobando as 2 (duas) áreas alvo situadas no município do Cedro-CE.....	20
Figura 2	– As províncias estruturais do Brasil.....	21
Figura 3	– Contexto geológico-estrutural regional destacando as principais unidades litoestratigráficas no entorno da área de pesquisa.....	24
Figura 4	– Detalhes do Drone <i>DJI Phantom 4 Advanced</i> utilizado no levantamento (A) e do Anemômetro (B) usado para medir a velocidade do vento antes da decolagem.....	26
Figura 5	– Detalhes da estratégia de aquisição utilizada (planejamento de voo) para o levantamento dos dados aerofotogramétricos na área de pesquisa. Notar a indicação do ponto de partida (circulo lilás) e a distinção entre os 2 (dois) voos realizados (retângulo laranja e porção superior dos perfis).....	26
Figura 6	– Detalhes do controle de precisão no levantamento através de pontos de controle. Ao lado o alvo artificial observado pelo equipamento (Drone) a 250 metros de altura.....	27
Figura 7	– Representação simplificada das técnicas referentes ao método da eletrorresistividade.....	29
Figura 8	– Ilustração esquemática de uma aquisição utilizando a técnica da tomografia elétrica, neste caso para o arranjo dipolo-dipolo.....	30
Figura 9	– Detalhes da aquisição dos dados geofísicos (ERT) em campo.....	32
Figura 10	– Representação da propagação de uma onda eletromagnética. (H) campo magnético, (E) campo elétrico.....	33
Figura 11	– Ilustração do equipamento EM34-3XL em modo dipolo horizontal (DH). ..	34
Figura 12	– Esquema simplificado da aquisição de dados com o EM34.....	34
Figura 13	– Detalhes da aquisição dos dados geofísicos (EM-34) em campo.....	37
Figura 14	– Gnaisse paraderivado com fratura preenchida por veio de quartzo com direção 340 Az (A); Rocha migmatítica encontrada no local, com pequenos dobramentos truncados por fratura de direção 340 Az (B).....	40

Figura 15 – Detalhes dos poços catalogados durante a etapa de campo.....	42
Figura 16 – Posições dos poços catalogados em campo nas áreas alvo I (Angico/Lagedo) e II (São Miguel) e suas respectivas nomenclaturas. Imagem: Ortomosaico adquirido com drone.....	43
Figura 17 – Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado para a área de pesquisa e entorno.....	44
Figura 18 – Ortomosaico elaborado para a área de pesquisa e entorno.....	45
Figura 19 – Realce do Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado para a área de pesquisa e entorno.....	46
Figura 20 – Estruturas riacho/fenda identificados nos cursos de drenagem da área alvo I e II.....	47
Figura 21 – Posições dos perfis ERT e EM-34 na ÁREA ALVO I (localidade de Angico/Lagedo) .....	49
Figura 22 – Visualização da correlação lateral entre os perfis 1, 2 e 5, com a locação dos poços existentes nos perfis.....	51
Figura 23 – Visualização do perfil EM34-01.....	52
Figura 24 – Perfis ERT e EM34 realizados na área alvo II, no caso do PER11 também foram levantados dados de polarização induzida.....	52
Figura 25 – Visualização do perfil EM34-05 e sua correlação com perfis de resistividade e presença de água salinizada.....	54
Figura 26 – Mapa com as posições dos perfis ERT e EM-34 na Área Alvo I (localidade de Angico/Lagedo). Notar a localização dos poços e o sentido dos perfis indicado pela seta no final dos mesmos.....	56
Figura 27 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 01 realizados na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P07 na seção final invertida.....	58

Figura 28 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 02 realizados na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação dos poços P06 e P04 na seção final invertida.....	59
Figura 29 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 03 realizados na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P04 na seção final invertida.....	60
Figura 30 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 01 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P07 na seção final invertida.....	63
Figura 31 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 02 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P06 e P05 na seção final invertida.....	64
Figura 32 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 03 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P03, P06 e P07 na seção final invertida.....	65
Figura 33 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 04 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P04 e P05 na seção final invertida.....	66
Figura 34 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 05 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P03 e P04 na seção final invertida.....	68
Figura 35 – Mapa com as posições dos perfis ERT e EM-34 na Área Alvo II (localidade São Miguel). Notar a localização do poço e o sentido dos perfis indicado pela seta no final dos mesmos.....	70

Figura 36 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 04 realizado na área alvo II (localidade São Miguel), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P11 na seção final invertida.....	71
Figura 37 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 06 realizado na área alvo II (localidade São Miguel), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P11 na seção final invertida.....	72
Figura 38 – Seção referente ao perfil 01 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de nordeste para sudoeste.....	73
Figura 39 – Seção referente ao perfil 02 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de sudoeste para nordeste.....	74
Figura 40 – Seção referente ao perfil 03 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de sul-sudoeste para norte-nordeste.....	75
Figura 41 – Seção referente ao perfil 04 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de noroeste para sudeste.....	76
Figura 42 – Seção referente ao perfil 05 de EM-34 realizado na área alvo II (localidade São Miguel), sentido de leste para oeste.....	77
Figura 43 – Mapa de localização dos perfis ERT PER05 EM-34 -02 cruzando os poços P03 e P04 (vazões 1.8 m <sup>3</sup> /h e 3 m <sup>3</sup> /h respectivamente) na área de estudo....	78
Figura 44 – Integração entre os perfis de ERT e EM-34 (em mesma escala horizontal) demonstrando a similaridade de resultados entre os dois métodos geofísicos.....	79

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Situação geral das vazões de poços no sertão cearense.....	19
Gráfico 2 – Demonstrativo da situação geral dos poços tubulares existentes no município de Cedro, Ceará.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Profundidade teórica de investigação do EM34-3XL em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo/frequências aplicadas pelo equipamento.....	35
Tabela 2 – Situação geral dos poços cadastrados nas áreas alvo I e II em Cedro/CE.....	41
Tabela 3 – Sugestão de quantitativos mínimos para campanha de investigação geofísica utilizando métodos elétricos e eletromagnéticos em conjunto em relação à área de trabalho.....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	Caminhamento elétrico
CPRM	Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
FUNCAP	Fundação Cearense de Pesquisa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NE	Nordeste
NW	Noroeste
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
SIAGAS	Sistema de Águas Subterrâneas
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	16
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Contexto Geológico</b> .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
<b>3.1</b>	<b>Fundamentação teórica dos métodos geofísicos</b> .....	28
<b>3.1.1</b>	<i>Eletrorresistividade</i> .....	28
<b>3.1.2</b>	<i>Arranjo Dipolo-Dipolo</i> .....	30
<b>3.1.3</b>	<i>Arranjo Wenner-Schlumberger</i> .....	31
<b>3.1.4</b>	<i>Aquisição dos dados ERT</i> .....	31
<b>3.2</b>	<b>Eletrorresistividade indutiva (EM-34)</b> .....	32
<b>3.2.1</b>	<i>Aquisição dos dados EM-34</i> .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	36
<b>4.1</b>	<b>Análise Hidrogeológica</b> .....	36
<b>4.2</b>	<b>Levantamentos de Campo</b> .....	40
<b>4.2.1</b>	<i>Aerofotogrametria</i> .....	43
<b>4.2.2</b>	<i>Geofísica aplicada e principais resultados</i> .....	47
<b>4.2.3</b>	<i>Demais dados e resultados geofísicos</i> .....	55
<b>4.2.3.1</b>	<i>Eletrorresistividade</i> .....	55
<b>4.2.3.1.2</b>	<i>Área Alvo II</i> .....	69
<b>4.2.3.2</b>	<i>Eletrorresistividade indutiva – EM34</i> .....	73
<b>4.2.3.2.1</b>	<i>Área Alvo I</i> .....	73
<b>4.2.3.2.2</b>	<i>Área Alvo II</i> .....	76
<b>4.3</b>	<b>Comentários acerca da integração e aplicabilidade dos métodos geofísicos</b> ...	77
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	79
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	82
	<b>APÊNDICE A – ROTEIRO SIMPLIFICADO DOS PROCEDIMENTOS</b>	
	<b>ADOTADOS</b> .....	86

## 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este volume de dissertação de mestrado foi elaborado a partir a unificação entre o artigo científico, produzido como critério necessário para obtenção do título de mestre em geologia, que foi traduzido e submetido para publicação em periódico científico de circulação internacional, e o relatório técnico entregue à Fundação Cearense de Pesquisa, produzido como critério para encerramento do contrato de pesquisa e inovação científica do edital INOVAFIT Fase 1 018/2018.

Por isso, o capítulo de resultados e discussões foi dividido entre os principais resultados alcançados no trabalho, ou pelo menos aqueles mais vinculados ao objetivo proposto inicialmente, e os demais resultados encontrados ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Além disso, há diferença entre as figuras apresentadas na primeira parte dos resultados e discussões (aquelas relacionadas ao artigo) e as figuras apresentadas na segunda parte, onde foram apresentadas cada seção ou perfil geofísico isoladamente, com os seus detalhes e descrição individualizados.

Essa divisão não faz com que os demais resultados e dados gerados sejam menos importantes do que aqueles priorizados, até porque, pelo volume de dados coletados, apenas parte dos dados levantados poderiam ser submetidos. Para o leitor que deseja aprofundar na análise em relação a interação entre os métodos elétricos e eletromagnéticos, ou mesmo comparar o resultado geofísico com o resultado dos poços tubulares construídos na área, olhar cada uma das linhas geofísicas individualmente pode ser indispensável.

## 2 INTRODUÇÃO

Essa pesquisa fez parte do escopo submetido e aprovado no programa de inovação INOVAFIT Fase 1, da Fundação Cearense de Pesquisa (FUNCAP), e teve como objetivo fomentar a inovação e melhorias no processo de escolha dos locais para construção de poços tubulares em sistemas aquíferos fissurais.

A região de interesse desse estudo foi prioritariamente a região semiárida do Sertão Nordeste, majoritariamente inserida no contexto estrutural e geológico da Província Borborema, segundo compartimentação estrutural de Almeida *et al* (1977, 1981) (Figura 1).

Essa região, onde ocorre o fenômeno natural e periódico da estiagem, é compreendida por aproximadamente 55% de rochas cristalinas localizadas principalmente na sua porção semiárida. Deste total, 75% ocorrem no Estado do Ceará. O aquífero de rochas fraturadas tem

um comportamento hidrogeológico bastante complexo e os poços perfurados apresentam os mais variados resultados.

De modo geral, este contexto hídrico fissural apresenta índice de acerto e custo/benefício da perfuração de poços reconhecidamente baixo. As baixas vazões em conjunto com as elevadas taxas de salinização além do crescente número de poços secos têm contribuído de forma negativa para o aproveitamento deste aquífero fissural.

Diante da situação atual, esta pesquisa contemplou uma abordagem inovadora (técnica e gerencial) através do desenvolvimento dos métodos de trabalho, buscando sempre uma pesquisa mais eficaz na exploração do recurso subterrâneo. Aqui serão apresentados resultados oriundos da aplicação de tecnologias geofísicas e de sensoriamento remoto, ambos de alta resolução. E será discutida a importância da integração entre métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos aplicados em uma área piloto definida e localizada no município do Cedro, Estado do Ceará.

Com essa integração entre métodos e conceitos foi possível aprofundar uma série de discussões relevantes a este tema, que contribuirão para um maior entendimento de um conjunto de procedimentos necessários para a definição do local para a construção de um poço tubular em ambiente fissural com sucesso.

A água encontra-se distribuída geograficamente no planeta de forma não uniforme (TUNDISI, 2003), sendo que apenas 3% das reservas existentes são constituídas de água doce, onde somente 0,3 % pode ser utilizada para consumo humano (COSTA *et al.*, 2012). No entanto, desse total, apenas 0,01 % são superficiais (distribuídas ao longo de rios e lagos), e o restante é subterrânea (COSTA *et al.*, 2012).

Os recursos subterrâneos representam a maior parte da reserva de água potável do planeta. Esses geralmente são utilizados através de poços, os quais, na maioria das vezes, encontram-se mais protegidos de contaminações por fatores biológicos e químicos, diferentemente das águas superficiais (ECKHARDT *et al.*, 2008). Além de não estarem tão sujeitos a ações naturais, como a elevada taxa de evaporação em relação à precipitação que ocorre em algumas regiões (PINÉO, 2005).

Nas regiões do semiárido nordestino as precipitações médias apresentam constante variação, ocorrendo acima da média em alguns anos e abaixo em outros (GARCES, 2019). Dessa forma, as mudanças climáticas afetam muitas regiões, ocasionando grandes estiagens que estão ligadas diretamente ao aporte de água dos mananciais superficiais, que por vezes não conseguem atingir seu nível máximo, não retraindo água durante longos períodos, ou chegando ao esgotamento, sendo incapazes de suprir as necessidades básicas de algumas

comunidades ao longo do ano.

Devido ao estado do Ceará possuir um contexto geológico predominantemente de rochas cristalinas (mais de 70%) (SILVEIRA *et al.*, 2016), caracterizado por um baixo potencial hidrogeológico, onde a água é armazenada ao longo de fendas e fraturas (SILVA, *et al.*, 2007), por muito tempo se investiu na construção de fontes superficiais (por exemplo, o Açude Público Padre Cícero - Açude Castanhão -, com obra realizada entre os anos de 1995 e 2002). No entanto, as grandes estiagens que vem ocorrendo no estado desde 2012, aliada ao crescimento demográfico e desenvolvimento econômico, tem tornado a exploração e exploração de água subterrânea uma alternativa eficaz para o combate à seca.

Dos 184 municípios que compõem o estado do Ceará, em 120 predominam o contexto fissural. Para estes, a partir de uma análise de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), de responsabilidade da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, é possível observar que apenas 48% dos poços possuem vazão satisfatória para uso, acima de 1,5m<sup>3</sup>/h (Gráfico 1).

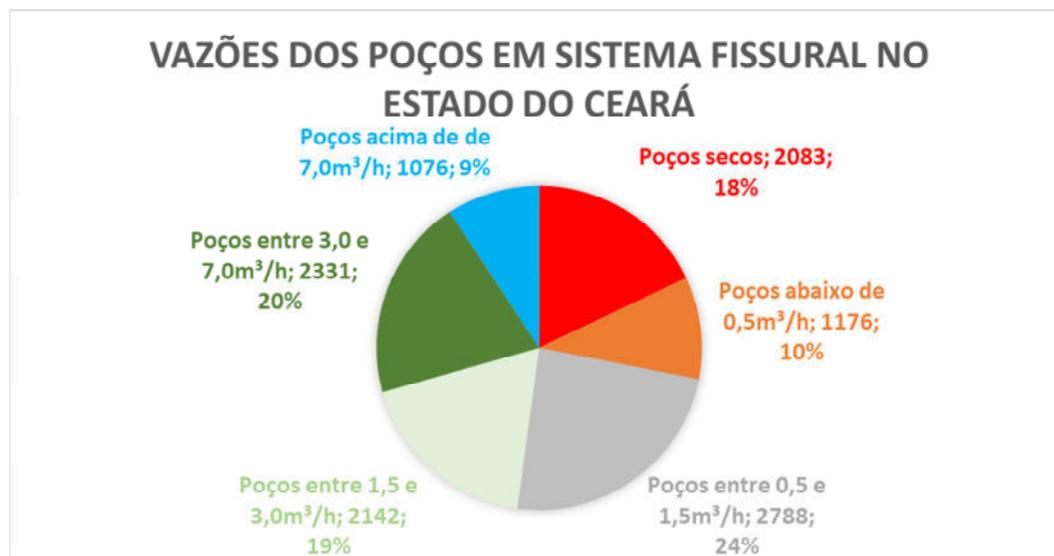
Dessa forma, o principal objetivo desse trabalho consistiu em realizar uma análise dos métodos atualmente aplicados para a definição de zonas potenciais para a construção de poços tubulares em regiões do semiárido e discutir alternativas e melhorias nesse cenário. Esse estudo fez parte do escopo submetido e aprovado no programa de Inovação Inovafit Fase 1 (Edital nº 08/2018), da Fundação Cearense de Pesquisa (FUNCAP), e teve como premissa básica fomentar a inovação e melhorias no processo de escolha dos locais para construção de poços tubulares em regiões semiáridas.

## **2.1 Caracterização da área de estudo**

A escolha da área de estudo ou *área piloto* localizada nos distritos de Angico/Lagedo (área de captação da Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE) e São Miguel, Município do Cedro, Estado do Ceará (Figura 1), levou em consideração os seguintes parâmetros técnicos e de exequibilidade:

**I** - O município de Cedro se enquadra no contexto semiárido e de baixo potencial hidrogeológico, apresentado no Gráfico 1;

Gráfico 1 – Situação geral das vazões de poços no sertão cearense, total de poços considerados = 11.596



Fonte: SIAGAS (2021).

**II** - A existência na localidade de Angico/Lagedo (área de captação da CAGECE - área alvo I – Figura 1) de uma bateria de poços tubulares construídos nos últimos anos, apresentando resultados diversos em uma área relativamente restrita, com poços com boas vazões a improdutivos, assim como poços com água de baixa qualidade (salinizada) e qualidade razoável. Este fato garantiu uma boa parametrização para a aplicação dos métodos geofísicos e suas avaliações e interpretações;

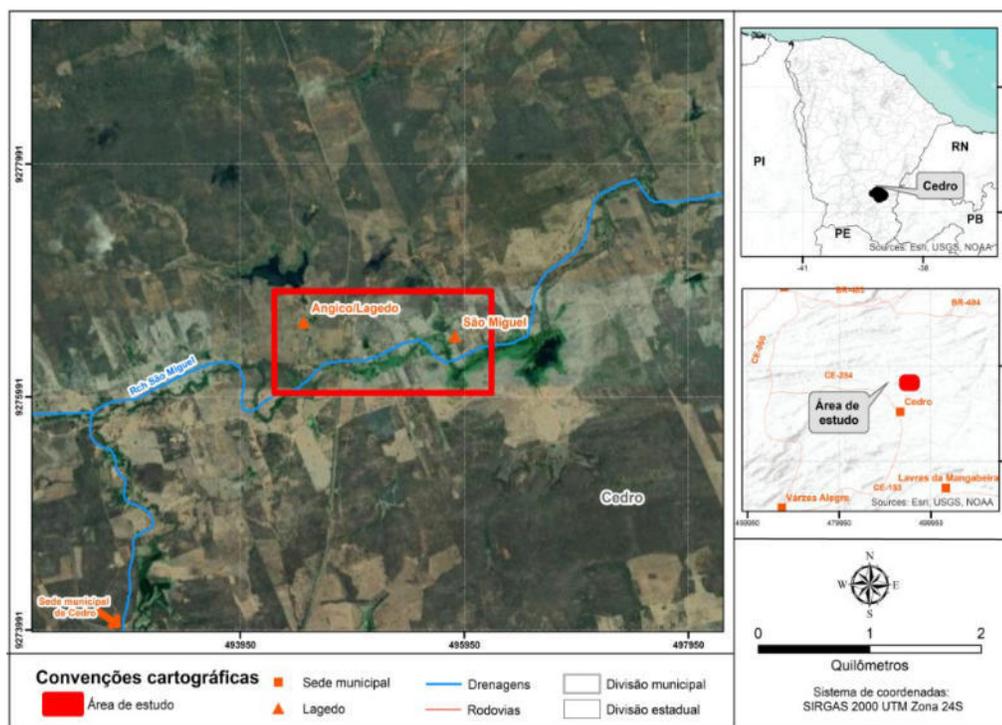
**III** - A área alvo II (Figura 1), situada na localidade de São Miguel, onde se localiza um poço com boa vazão, mas que apresentou altíssimo teor de sais na água, comprometendo seu uso. Além disso, a comunidade local vem sofrendo com a escassez de água e necessitando de ações que visam o abastecimento local de recursos hídricos;

**IV** - Os locais apresentam boa estrutura de exequibilidade, acesso e espaço para instalação dos cabos e bobinas utilizados na aquisição dos dados geofísicos em campo. Existem também residências que serviram de apoio logístico nas proximidades, com disponibilidade de fonte de energia e abrigo, por exemplo;

**V** - Do ponto de vista geológico/estrutural a área em questão compreende um sítio hidrogeológico fissural muito interessante. Os litotipos que ocorrem na região estão condicionados ou orientados conforme as feições estruturais com predomínio de direção Leste-Oeste, além de unidades metamórficas da faixa Orós e presença de zonas de

cisalhamento. Estes aspectos estruturais conferem as rochas da área um baixo potencial de fraturas abertas, que possam se comportar como zonas armazenadoras de água.

Figura 1 – Localização da região de estudo englobando as 2 (duas) áreas alvo situadas no município do Cedro-CE.



Fonte: Autor.

## 2.2 Contexto Geológico

Almeida *et al* (1977, 1981), dividiu o Brasil em dez províncias estruturais com base na natureza das rochas do embasamento cristalino e das coberturas sedimentares. A Província Borborema (Bb), como é destacada na figura 02, ocupa a porção nordeste do Brasil e é limitada a sul pelo Cráton São Francisco (Sf), a oeste pela Província Parnaíba, e ao longo do litoral é recoberta pela Província Costeira. Osako *et al.* (2011), afirmou que a Província Borborema tem uma área com mais de 450.000 km<sup>2</sup>.

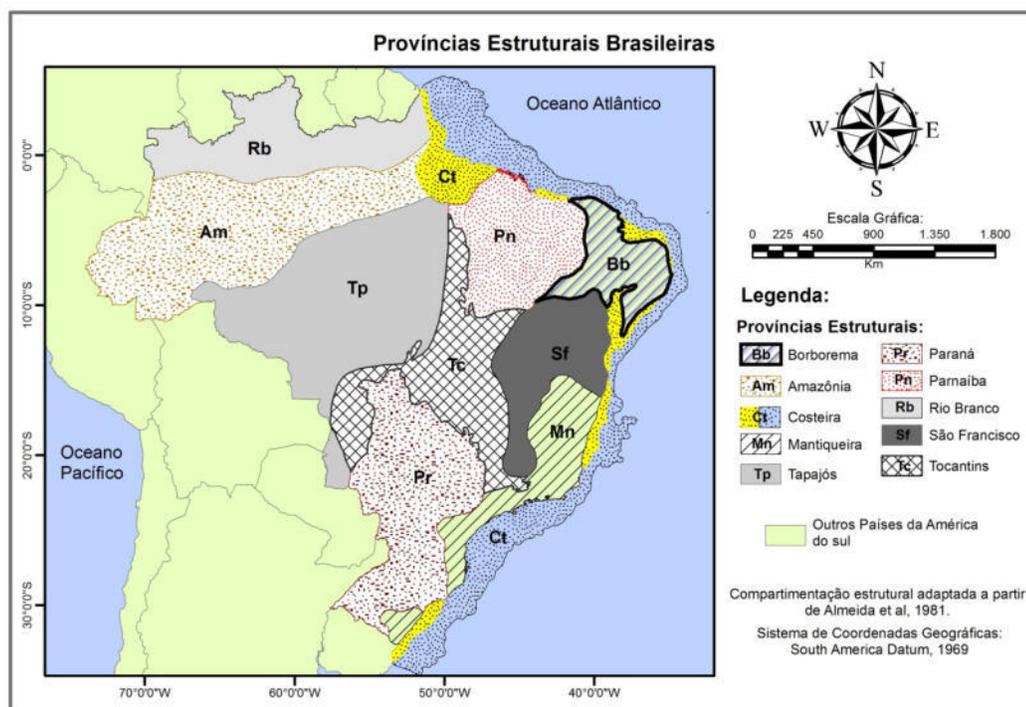
A área de pesquisa está inserida na Província Borborema, Subprovíncia Setentrional, Domínio Jaguaribeano (Faixa Orós-Jaguaribe). Esta se situa no sul cearense e abrange parte do município de Cedro. Nessa área ocorrem rochas metamórficas e intrusões plutônicas arqueo-proterozoicas, além de cobertura sedimentar quaternária.

A Província em questão é considerada como o resultado de uma grande colagem durante o evento orogenético Brasileiro/Pan-Africano, gerada pela convergência dos crátons Amazônico, São Luiz-Oeste Africano e São Francisco-Congo durante o Neoproterozóico

(OSAKO *et al.*, 2011). Almeida, *op cit*, definiu a Província Borborema como uma entidade de mobilidade tectono-termal no Ciclo Brasileiro.

Mabessone (2002) afirmou que, a partir de eventos cíclicos, a Província Borborema pode ter começado a se formar ainda no Arqueano. Mabessone, *op cit*, enfatiza o início pelo menos no paleoproterozóico a partir de dados de Fetter *et al.*, (2000) e Santos (2001a). Durante o Sideriano, Riáciano e Orosiriano (entre 2,38 e 1,98 Ga) devido a um intenso crescimento crustal, vários domínios teriam começado a se juntar, entre eles, o Rio Grande do Norte, o Ceará Central e o NW do Ceará, ou Médio Coreau.

Figura 2 – As províncias estruturais do Brasil



Fonte: Adaptado de Almeida et al (1981).

Na Província Borborema, a região de dobramentos Brasileiros apresenta um complexo arranjo em mosaico, incluindo diferentes sistemas de dobramentos lineares mutuamente separados por partes elevadas do embasamento, podendo estar relacionadas às falhas ou não. Os sistemas de dobramentos, diferente dos crátons, são constituídos por metassedimentos pelítico-psamíticos com pelo menos dois ciclos deformacionais, sendo aqueles de um ciclo mais recente progredindo para os pertencentes a um mais antigo (Almeida *et al.*, 1977, 1981).

Em função disso, a complexidade estrutural dessa região torna desafiadora a prospecção de águas subterrâneas e difícil a escolha de locais para aproveitamento hídrico desse contexto fissural.

Entre as rochas de contexto hidrogeológico cristalino na região, algumas apresentam idade arqueana, podendo ser divididas em: Complexo Granjeiro e Suíte Granjeiro. O Complexo Granjeiro é constituído por xistos, quartzitos, metachert, formações ferríferas bandadas, mármore e algumas rochas metaultramáficas. Este se concentra na porção sudeste (figura 04). Enquanto a Suíte Granjeiro apresenta em sua composição rochas com maiores índices de minerais máficos, como anfíbolitos, metapiroxenito e metatrandjemitos. Estudos anteriores realizados na região demonstraram certo grau de incerteza quanto ao seu posicionamento estratigráfico. Assim, Campos *et al.* (1976) e Prado *et al.* (1980) o consideraram como parte integrante do embasamento arqueano, correlacionando-o a porções do Complexo Caicó. Santos *et al.* (1984) se reportaram a esses litotipos como constituintes da seção inferior do Complexo Lavras da Mangabeira. Outras litologias que afloram e predominam na área de estudo correspondem a rochas ígneas e metamórficas, com destaque ao Grupo Orós e Complexo Jaguaretama (Figura 3).

O Grupo Orós - O conjunto litológico constituinte dessa unidade foi considerado durante muito tempo, por diversos autores, como pertencente ao Grupo Ceará. Santos *et al.* (1984) denominaram de Complexo Orós, uma associação de xistos, filitos, quartzitos, metachertes e calcários com magnesita, exposta na faixa compreendida entre as cidades de Orós e José de Alencar. Devem-se a Braga e Mendonça (1984) os primeiros registros de rochas metavulcânicas a subvulcânicas associadas a metassedimentos na região de Orós, caracterizando, assim, uma sequência metavulcano-sedimentar intrudida por granitos sin a tarditectônicos. Para essa sequência, Cavalcante (1987) justifica o emprego da unidade litoestratigráfica “grupo”, reconhecendo-a como Grupo Orós, proposta adotada por Sá *et al.* (1988). O Grupo Orós, datado do Proterozoico, recobre maior extensão do local, onde rochas metamórficas como gnaisses, quartzitos e metacalcários são predominantes.

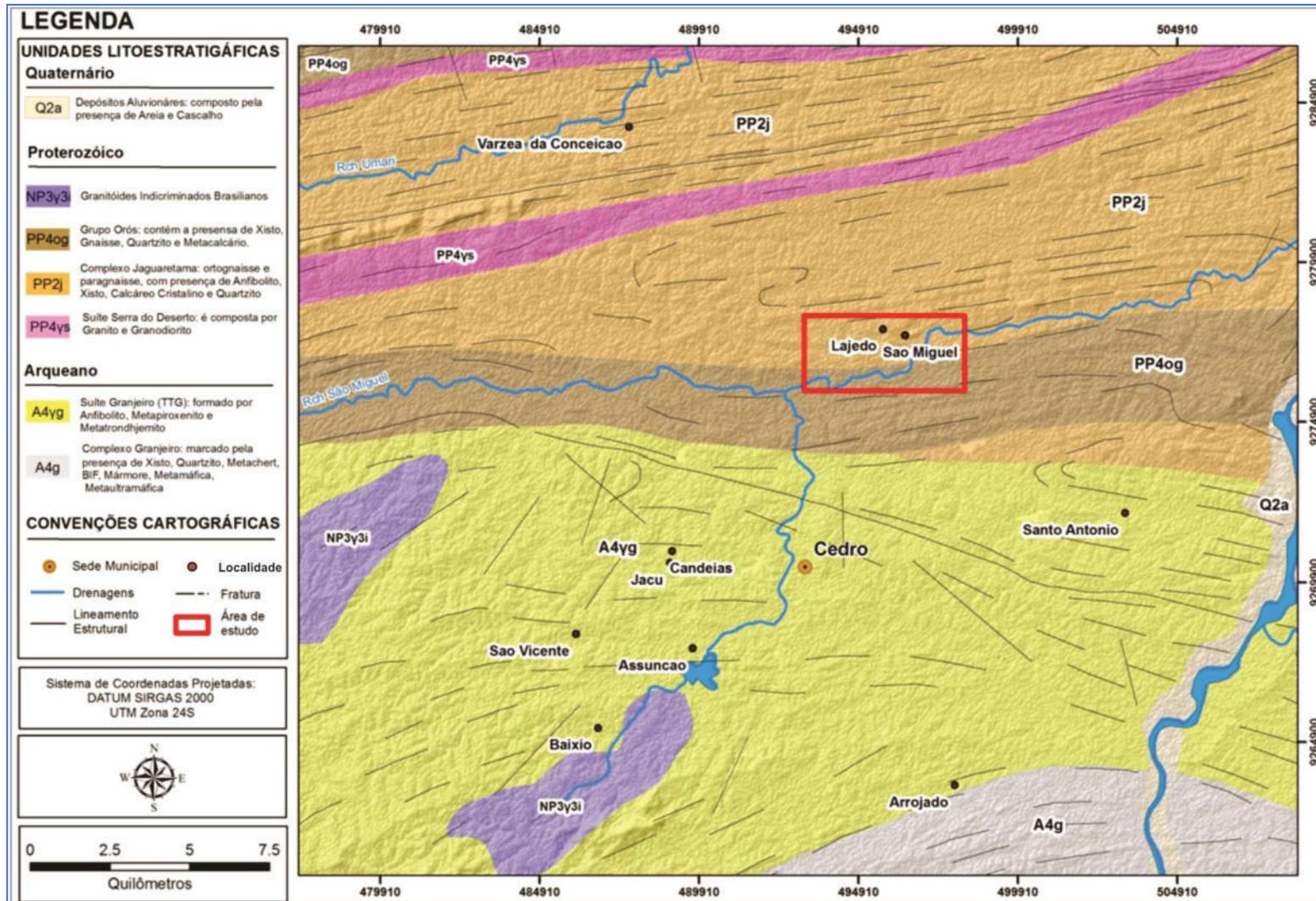
Já o Complexo Jaguaretama apresenta assembleia litológica bastante similar, contudo ainda há presença de anfíbolitos e xistos. Ambos os grupos são constituídos por rochas de mesmo comportamento hidrogeológico, sendo este o fissural, pois a maior parte das rochas metamórficas apresenta baixa porosidade. A denominação de Complexo Jaguaretama foi usada por Gomes e Vasconcelos (2000) e Ferreira e Santos (2000), para definir uma associação litológica metaplutônica com intercalações de rochas supracrustais que ocorre a leste da Faixa Orós. O complexo é constituído por ortognaisses bandados e migmatitos de composição tonalítica a granodiorítica e granítica, com intercalações de gnaisses anfíbolíticos, xistos, augen gnaisses e raras rochas calcissilicáticas (ANGELIM *et al.*, 2007; FERREIRA e SANTOS, 2000).

A Unidade Metaplutônica Granitoide Suíte Magmatica Serra do Deserto encontra-se representada predominantemente pelos augen gnaisses que constituem jazimentos sotopostos às unidades da sequência Orós. Em afloramentos, as rochas são de tonalidades cinzentas e rosadas de granulometria grossa, com facoides feldspatos de dimensões de milímetro a centímetros e geometria arredondadas.

A organização estrutural da área demonstra corpos geológicos orientados predominantemente NE-SW e subordinadamente E-W, nos quais estão impressas estruturas tectogênicas dúcteis e rúpteis, representadas por falhas normais e inversas, dobras sinformais, antiformais e recumbentes, além de zonas de cisalhamento transcorrente, que originam feições miloníticas em padrões geométricos e cinemáticos específicos. A análise integrada de todos os dados e informações catalogadas foi importante para compreender e organizar uma proposta de evolução geológica para essa área, em consonância aos eventos tectônicos maiores, assim como configurações tardias que estruturaram a Província Borborema. Analisando as feições estruturais do entorno, conclui-se que há uma tendência das fraturas e lineamentos ocorrerem na direção ENE-WSW, estes que são fatores controladores da disposição das águas em subsuperfície.

O armazenamento e a capacidade de transmissão de água subterrânea nestas rochas são determinados pela densidade de falhas e fraturas abertas e pela existência de conectividades entre elas, o que caracteriza os aquíferos fissurais. Os planos de foliação dessas rochas também constituem descontinuidades que favorecem a capacidade circuladora e armazenadora de água. O potencial hidrogeológico, portanto, é bastante irregular, podendo ocorrer poços com boas vazões que interceptaram estruturas favoráveis, ao lado de poços improdutivos (secos ou com baixas vazões). Quanto ao aspecto da qualidade, as águas podem conter elevados teores de sais, que se concentram devido às características geológicas e às condições climáticas (baixa pluviosidade e elevadas taxas de evaporação).

Figura 3 – Contexto geológico-estrutural regional destacando as principais unidades litoestratigráficas no entorno da área de pesquisa



Fonte: Autor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente estudo foram utilizadas informações bibliográficas de diferentes autores sobre o tema e a região de interesse, além de dados do sistema de informações de águas subterrâneas da CPRM (SIAGAS), em consulta realizada em dezembro de 2021, que contou com um grupo amostral de 18.212 poços tubulares existentes no estado do Ceará, nas regiões onde predomina o contexto fissural.

Além disso, foram levantadas informações oriundas de reconhecimento geológico de campo, análises de imagens de sensores orbitais, levantamento aerofotogramétrico com drone e métodos geofísicos, eletrorresistividade e eletromagnético indutivo, assim como ferramentas complementares na definição do melhor local de construção do poço tubular. Todos esses métodos foram empregados em uma área piloto, com poços de capacidade produtiva variada e próximos, para fins de teste e análise dos resultados.

Na etapa inicial dos levantamentos de campo foi realizado um reconhecimento geológico, para identificar os principais litotipos da região, bem como a litologia predominante da área alvo, além do padrão estrutural rúptil existente no local. Nessa etapa também foi realizada a visita aos poços existentes nas áreas alvo com intuito de coletar informações sobre vazão, profundidade, posição geográfica e situação atual do poço.

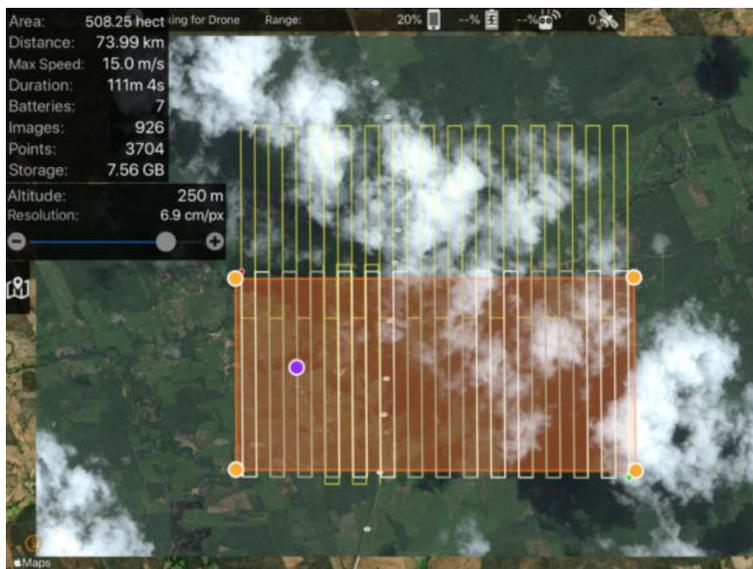
Para a realização do voo e aquisição das fotografias aéreas no local de pesquisa foi utilizado um *Drone Phantom 4 Advanced* produzido pela DJI (figura 4), sendo o planejamento e execução de voo realizado no aplicativo *Mapilot* disponível para o sistema IOS. Este aplicativo permite ao usuário planejar o voo pela inserção de linhas de voo, tendo em vista as seguintes informações: altitude de voo, velocidade, tempo de voo, captura das fotos, sobreposição das imagens, entre outros parâmetros. Na aquisição dos dados na área de pesquisa foram realizados 2 (dois) voos principais (Figura 5) em três dias distintos (30/01/2020 a 01/02/2020), usando 12 baterias para cada voo de modo a cobrir todas as áreas de interesse. Isto foi devido ao tamanho da área, a velocidade do vento e a autonomia do equipamento. O voo foi executado em linhas paralelas (espaçamento 115m) na área de pesquisa na direção N-S, com altura de 250m e resolução das imagens adquiridas de 6,9 cm/px.

Figura 4 - Detalhes do Drone *DJI Phantom 4 Advanced* utilizado no levantamento (A) e do Anemômetro (B) usado para medir a velocidade do vento antes da decolagem.



Fonte: Autor.

Figura 5 - Detalhes da estratégia de aquisição utilizada (planejamento de voo) para o levantamento dos dados aerofotogramétricos na área de pesquisa. Notar a indicação do ponto de partida (circulo lilás) e a distinção entre os 2 (dois) voos realizados (retângulo laranja e porção superior dos perfis).



Fonte: Autor.

Todo o levantamento foi auxiliado com 44 pontos de controle distribuídos regularmente em superfície. Estes são pontos foto identificáveis, ou seja, são utilizados para fazer a relação entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de

coordenadas do terreno, sendo alvos de referência no solo para serem utilizados no pós-processamento das imagens aumentando a acurácia dos produtos finais de interesse, tais como o Ortomosaico e o Modelo Digital de Terreno (MDT). No estudo em questão optou-se usar alvos artificiais, empregando sinalizações em forma de "X" com o material "pó de cal". A distribuição dos pontos de apoio seguiu um padrão regular aproximado de modo a envolver toda a região de estudo (figura 6), sendo georreferenciados por GPS geodésico Trimble R4 no modo RTK.

Figura 6 - Detalhes do controle de precisão no levantamento através de pontos de controle. Ao lado o alvo artificial observado pelo equipamento (Drone) a 250 metros de altura.



Fonte: Autor.

O processamento das imagens adquiridas pelo *Drone Dji Phantom 4 Advanced* foi realizado no *software Agisoft PhotoScan*. Esse *software* é muito utilizado para o processamento de imagens capturadas por drones, em que após carregar as imagens coletadas e os pontos de controle já corrigidos gerou-se os seguintes produtos finais de interesse: modelo digital de terreno (MDT) e Ortomosaico de alta resolução.

Por último, foram adquiridos 11 perfis geofísicos de eletrorresistividade, com extensão mínima de 300m, através de técnicas modernas de Tomografia Elétrica automatizada (ERT) utilizando os equipamentos de alta capacidade de resolução (Supersting R8 da AGI e o GD20 extreme da Geomatic). Foram testados diversos arranjos como dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger e Gradiente. Foram adquiridos 05 perfis eletromagnéticos de indução, onde foi utilizado o equipamento EM-34 XL, da Geonics, através de suas frequências possíveis, distâncias e modos de aquisição (dipolo horizontal e dipolo vertical). Especificamente na área alvo II, por possuir um poço de elevada salinidade, foi empregado o método de polarização induzida para avaliar os efeitos da água salinizada na cargabilidade do meio.

Um fator favorável à aplicação de métodos geofísicos em conjunto ou integrados é a diminuição de problemas relacionados à ambiguidade geofísica, onde um mesmo resultado geofísico aceita mais de uma interpretação ou cenário diferente. Mamede *et al.* (2012), apontam tais vantagens e ressaltam a atenção especial que deve ser dada à geofísica aplicada aos recursos hídricos. Tal importância foi enfatizada com o termo hidrogeofísica, introduzido por Rubin e Hubbard (2005).

Cabe mencionar também que o EM34, por possuir uma bobina emissora e outra receptora, tem uma grande vantagem competitiva em relação a outros métodos eletromagnéticos que, geralmente, não são usados com fonte própria, como o *very low frequency* (VLF). A vantagem de controlar a fonte da onda eletromagnética está em ter maior controle da aquisição, o que garante melhor qualidade dos dados obtidos (Marques, 1995), além da vantagem da possibilidade de utilização da bobina a diferentes distâncias entre si, garantindo diferentes níveis de investigação e a possibilidade de trabalhar em variadas direções, outras das limitações do VLF, sem a fonte EM.

### **3.1 Fundamentação teórica dos métodos geofísicos**

#### ***3.1.1 Eletrorresistividade***

Duas propriedades são básicas na aplicação dos métodos elétricos: a) a resistividade elétrica, ou seja, a dificuldade das rochas de conduzir a corrente elétrica; b) a polarização induzida, ou seja, a polarização que ocorre quando uma corrente elétrica passa através das rochas. Na eletrorresistividade vamos lidar com a primeira propriedade citada, a resistividade elétrica.

A eletrorresistividade é um método geoeletrico que consiste em medidas de impedância com subsequente interpretação, em termos da resistividade elétrica da estruturação geológica em subsuperfície, baseado na resposta de cada material ao fluxo de uma corrente elétrica (WARD, 1990).

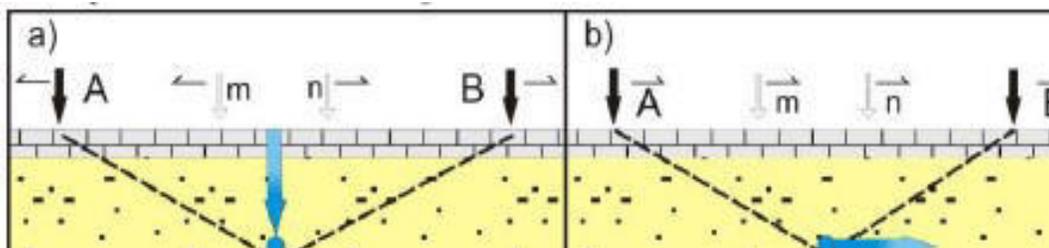
Quando uma corrente elétrica é introduzida no solo através de dois eletrodos (A-B) usando equipamento característico (eletrorresistivímetro), esta produz uma diferença de potencial que é medida pelo equipamento através de um segundo par de eletrodos (M-N). O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade do solo e do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo a

profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (ORELLANA, 1972).

Qualitativamente, resistividade é uma medida de dificuldade que um determinado material impõe a passagem de uma corrente elétrica, correspondendo ao inverso da condutividade. A resistividade é designada por ( $\rho$ ) dada em ohm.m e a condutividade ( $\sigma$ ) é dada em S/m, sendo a relação entre elas:  $\rho = 1/\sigma$ . A aquisição da resistividade aparente do subsolo pode ser feita através da combinação de uma das três técnicas com um dos diversos arranjos propostos para o método da eletrorresistividade (BRAGA, 2005).

As técnicas são: i) Sondagem Elétrica Vertical (SEV), caracterizada pela investigação vertical pontual das variações do parâmetro físico com a profundidade; ii) Caminhamento Elétrico (CE), também chamada atualmente de Tomografia Elétrica (ERT), que corresponde à investigação lateral das variações do parâmetro físico a uma ou várias profundidades determinadas e iii) Perfilagem Elétrica (PERF), referente à investigação lateral e vertical das variações do parâmetro físico efetuadas no interior de furos de sondagens. Já os arranjos correspondem à disposição dos eletrodos na superfície do terreno (Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, etc) (Figura 7).

Figura 7 – Representação simplificada das técnicas referentes ao método da eletrorresistividade, (a) sondagem elétrica vertical, (b) caminhamento elétrico e (c) perfilagem elétrica

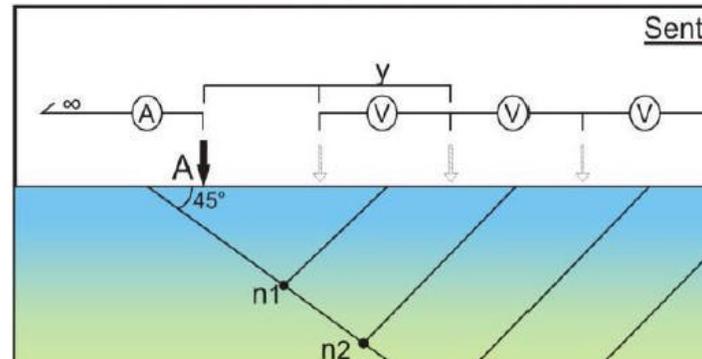


Fonte: Autor.

Quando o interesse do estudo é saber as variações laterais da resistividade utiliza-se a técnica da Tomografia Elétrica (ERT), onde os eletrodos são expandidos simetricamente a partir de um centro que permanece fixo e cujas profundidades de investigação crescem com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente (A e B). A cada medida, os dipolos são deslocados de uma distância igual a X e os dados são novamente obtidos nas profundidades  $n = 1, 2, 3, 4, 5...$ , gerando uma seção de

distribuição de pontos de resistividade aparente como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Ilustração esquemática de uma aquisição utilizando a técnica da tomografia elétrica, com o arranjo dipolo-dipolo



Fonte: Autor.

O método da eletrorresistividade permite a utilização de inúmeras possibilidades de arranjos de eletrodos, vários deles relatados na bibliografia (ORELLANA, 1972). A escolha de qual arranjo utilizar dependerá de uma série de fatores: o tipo de alvo que será mapeado (este fator está relacionado com o padrão de sensibilidade de cada arranjo para as variações horizontais e verticais da resistividade em subsuperfície), a razão sinal/ruído, a profundidade de investigação almejada etc. Neste trabalho foram testados vários arranjos de eletrodos nos perfis de tomografia elétrica, como por exemplo, gradiente, dipolo-dipolo, wenner-schlumberger, etc. Basicamente os que melhores se adequaram foram os arranjos dipolo-dipolo e wenner-schlumberger, baseado na razão sinal/ruído e na capacidade de detecção das estruturas e feições geológicas da área. Um bom parâmetro utilizado para essa percepção foram os poços tubulares existentes, onde havia informação real do meio para efeitos de comparação.

### 3.1.2 Arranjo Dipolo-Dipolo

No arranjo dipolo-dipolo o espaçamento ( $x$ ) entre os eletrodos de corrente ( $AB$ ) e de potencial ( $MN$ ) é o mesmo, ou seja,  $x=AB=MN$ . Quando a distância  $R$  entre os eletrodos de corrente e de potencial aumenta, há um incremento na profundidade dos níveis ( $n$ ) de investigação (LOKE, 2004). O posicionamento de cada ponto de medida nos vários níveis ( $n$ ) é dado pela intersecção entre as linhas que partem do centro dos

eletrodos de corrente (AB) e dos eletrodos de potencial (MN), formando ângulos de 45°.

### ***3.1.3 Arranjo Wenner-Schlumberger***

O arranjo Wenner-Schlumberger é a combinação entre os arranjos Wenner e Schlumberger e apresenta a configuração de uma sondagem elétrica vertical (SEV), ou seja, com o par de eletrodos de potencial no centro e os de corrente nas extremidades. O espaçamento entre os eletrodos AM=BN é um fator “n” do espaçamento “a” entre os eletrodos MN. Depois de realizadas as leituras no primeiro nível de investigação (n=1), para se investigar níveis mais inferiores aumenta-se o fator “n”. Este arranjo é bastante utilizado por apresentar uma elevada razão sinal/ruído.

### ***3.1.4 Aquisição dos dados ERT***

Visando obter melhor entendimento das características hidrogeológicas em meio fissural, assim como a presença de discontinuidades e estruturas armazenadoras de recursos hídricos subterrâneos foram executados 10 (dez) perfis de tomografia elétrica com equipamentos e arranjos diferentes na área de estudo. A seguir temos os quantitativos e principais detalhes da aquisição ERT:

I) Área alvo I (localidade de Angico/Lagedo): foram realizados com o equipamento Supersting R8 03 (três) perfis utilizando o arranjo dipolo-dipolo, sendo 2 (dois) com 420 (quatrocentos e vinte) metros e 1 (um) com 210 (duzentos e dez) metros de comprimento. Já com o equipamento Geomative GD20 foram 5 (cinco) perfis utilizando os arranjos dipolo-dipolo e wenner-schlumberger, sendo 3 (três) com 400 (quatrocentos) metros e 2 (dois) com 300 (trezentos) metros de comprimento. Todos os perfis, com ambos os equipamentos tiveram espaçamento de 10 (dez) metros entre eletrodos;

II) Área alvo II (localidade de São Miguel): foi realizado com o equipamento Supersting R8 1 (um) perfil utilizando o arranjo dipolo-dipolo com 200 (duzentos) metros de comprimento. Já com o equipamento Geomative GD20 foi realizado 1 (um) perfil utilizando os arranjos dipolo-dipolo e wenner-schlumberger, com 290 (duzentos e noventa metros). Ambos os perfis tiveram espaçamento de 10 (dez) metros entre eletrodos; Segue abaixo as fotografias com os principais detalhes da aquisição ERT na área de estudo (Figura 9).

### 3.2 Eletromagnético indutivo (EM-34)

Dentre os métodos geofísicos de prospecção mais usados, se encontram aqueles por campos eletromagnéticos variáveis, mais conhecidos como simplesmente eletromagnéticos. Sua utilização é aplicada tanto para estudar a variação das propriedades das rochas no sentido vertical como para investigações no sentido horizontal, sendo influenciado principalmente pelas variações da condutividade dos materiais terrestres em subsuperfície.

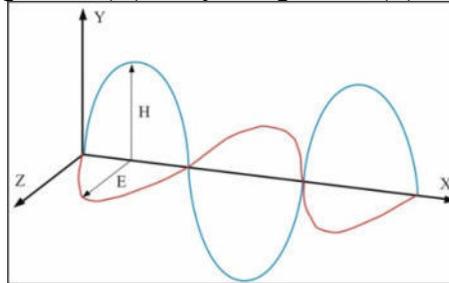
Figura 9 – Detalhes da aquisição dos dados geofísicos (ERT) em campo em (a), (b) (d) e (e), detalhes da base montada para o tomógrafo elétrico e em (c) e (f), detalhes da conexão entre cabos, eletrodos e solo



Fonte: Autor.

Os métodos EM são fundamentados no princípio de indução eletromagnética e registram a resposta oriunda da interação entre uma onda eletromagnética e a subsuperfície do terreno. Esta onda EM é composta por um campo elétrico (E) e por um campo magnético (H) (Figura 10) e pode ser gerada através do fluxo de corrente alternada ao longo de uma bobina transmissora constituída por fios condutores.

Figura 10 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética. (H) campo magnético, (E) campo elétrico

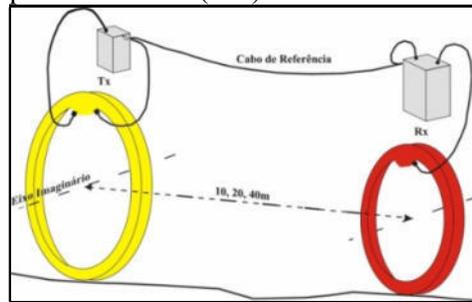


Fonte: Modificado de Reynolds (1997).

O equipamento EM34-3XL, utilizado na aquisição terrestre dos dados de condutividade aparente do subsolo, corresponde a um sistema desenvolvido pela *Geonics Limited* com o objetivo de aplicar técnicas eletromagnéticas de indução como uma alternativa aos levantamentos elétricos que empregam técnicas galvânicas para medir a resistividade elétrica aparente. Atualmente o equipamento EM34-3XL tem sido largamente empregado na prospecção hidrogeológica e em estudos de natureza ambiental, como na identificação e mapeamento de contaminantes diversos e presença de cunhas salinas.

O equipamento em operação de aquisição de dados é constituído por uma bobina transmissora e por uma bobina receptora, conectadas respectivamente a uma unidade de transmissão e uma de recepção, por meio de cabos específicos. Ambos os conjuntos (transmissor (Tx) e receptor (Rx)) são interconectados por um cabo de referência, cujo comprimento pode ser de 10, 20 ou 40 m (Figura 11).

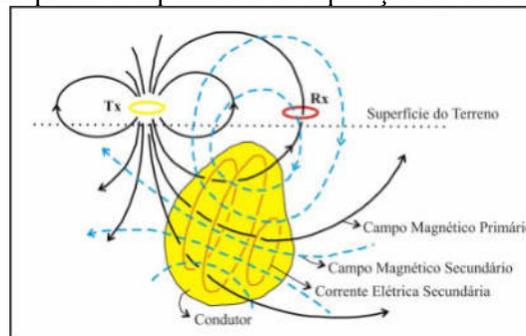
Figura 11 – Ilustração do equipamento EM34-3XL em modo dipolo horizontal (DH)



Fonte: Modificado de Reynolds (1977).

Na aplicação do método EM, uma corrente elétrica alternada com frequência definida e proveniente da unidade de transmissão, circula pela bobina transmissora produzindo um campo magnético primário alternado ( $H_p$ ), que por sua vez induz correntes elétricas secundárias no subsolo, sendo estas responsáveis pela geração de um campo magnético secundário ( $H_s$ ). Parte deste campo magnético captado pela bobina receptora, que também recebe da bobina transmissora, por meio do cabo de referência, parte do campo magnético primário (Figura 12).

Figura 12 – Esquema simplificado da aquisição de dados com o EM34



Fonte: Modificado de Reynolds (1997).

O EM34-3XL permite aos operadores realizarem seis leituras de condutividade aparente do subsolo em cada estação de medida, uma vez que este equipamento foi desenvolvido para obter os dados de condutividade, combinando três diferentes espaçamentos entre as bobinas (10, 20, 40 m) e dois modos de dipolos: Dipolo Horizontal (DH), onde os eixos das bobinas posicionam-se na horizontal e Dipolo Vertical (DV), onde os eixos das bobinas posicionam-se na vertical.

Como o referido instrumento permite a aquisição dos dados em três diferentes espaçamentos entre as bobinas (10, 20 e 40 m) é possível investigar teoricamente as

profundidades de 7,5m, 15m e 30m para o dipolo DH e 15m, 30m e 60m para o dipolo DV (tabela 03). Os valores de condutividade aparente são expressos em milisiemens por metro (mS/m).

Tabela 1 – Profundidade teórica de investigação do EM34-3XL em relação à distância entre as bobinas e o modo de dipolo/frequências aplicadas pelo equipamento

Distância entre as Bobinas (m)	Frequência (Hz)	Profundidade Teórica de Investigação (m)	
		Dipolo Horizontal (DH)	Dipolo Vertical (DV)
10	6.400	7.5	15
20	1.600	15	30
40	400	30	60

Fonte: Adaptado de Fries (2019).

### 3.2.1 Aquisição dos dados EM-34

Como estratégia de aquisição EM-34 foram realizados alguns perfis sobrepostos aos perfis ERT visando à integração entre os métodos, e desta maneira compreender melhor as características hidrogeológicas locais. Importante destacar que na locação de todos os perfis sempre se buscou o alinhamento dos poços identificados e catalogados para parametrização. Foram executados um total 05 (cinco) perfis eletromagnéticos indutivos na área de estudo. Em todos os perfis EM-34 foi utilizado espaçamento de 10 metros entre as estações, além de que, em todas as estações foram realizadas as 6 (seis) leituras que o equipamento permite (ver tabela 03). A seguir temos os quantitativos e detalhes da aquisição EM-34:

I) Área alvo I (localidade de Angico/Lagedo): Foram 04 (quatro) perfis no total, sendo os tamanhos variados de acordo com a disponibilidade do espaço físico e aspectos técnicos de execução (200, 230, 280 e 350 metros de comprimento);

II) Área alvo II (localidade de São Miguel): 01 perfil de 200 metros de comprimento;

Seguem abaixo fotografias com os principais detalhes da aquisição EM-34 na área de estudo (Figura 13).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise Hidrogeológica

O predomínio de rochas ígneas e metamórficas no semiárido cearense é evidente. Ao analisar o trabalho de CPRM, no mapa geológico do Ceará, em escala 1:500.000 (PINÉO *et al.*, 2020), observa-se que dos 184 municípios do estado do Ceará, 120 deles tem predominância de rochas de contexto cristalino/fissural em mais de 90% do seu território, ou seja, 65% dos municípios existentes no estado. Em termos de área total, esses 120 municípios representam quase 70% da área do estado, com uma extensão territorial de 101.773,025km<sup>2</sup> (IBGE, 2020).

Entender o funcionamento de um sistema aquífero cristalino/fissural é uma tarefa complexa. Segundo Larsson (1984), os três fatores principais a condicionar o acúmulo de água nesse tipo de sistema são a geologia, a morfologia e o clima. A geologia, citado em primeiro lugar, é geralmente o fator limitante, principalmente em se tratando de rochas ígneas e metamórficas, onde geralmente não há espaços intergranulares para acúmulo de água e já foram, por muito tempo, consideradas totalmente impermeáveis. Estudos mais recentes como o de MacDonald (2012), provaram que mesmo com baixa porosidade, baixa permeabilidade e baixos índices de armazenamento, os sistemas fissurais podem representar localmente importantes sistemas aquíferos, haja vista a possível presença de estruturas rúpteis com capacidade de armazenamento e condução de água.

Figura 13 – Detalhes da aquisição dos dados geofísicos (EM-34) em campo. Em (a), (d) e (e), detalhes da aquisição dos dados e em (b), (c) e (f), detalhes do equipamento EM-34 XL da Geonics



Fonte: Autor.

Como forma de analisar a situação geral dos poços existentes nesse contexto no semiárido cearense, foram analisados os dados existentes no SIAGAS (CPRM), com acesso em dezembro de 2021. Destaca-se que para início dessa análise foram selecionados apenas os poços nos municípios onde predomina o contexto fissural/cristalino. O resumo da situação em todo o estado do Ceará foi apresentado no gráfico da Figura 1, onde apenas 48% dos poços existentes, de um total de 11.596 poços

restantes, possuem vazão acima de  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Cabe destacar ainda, a existência de 5.216 poços, dentro do grupo amostral inicial, que foram retirados do cálculo estatístico por não possuírem, em todo ou em parte, as informações necessárias para análise. Para estes, empiricamente, acredita-se que uma parte considerável também seja improdutivo.

Para o cálculo apresentado no Gráfico 1 consideraram-se apenas os poços tubulares, ou seja, foram excluídos da análise as fontes naturais, cacimbas e poços amazonas, estes dois últimos por aproveitarem água basicamente de coberturas sedimentares existentes. Além disso, por esta análise ser relativa à situação do contexto cristalino/fissural em si, foram desconsiderados todos os poços tubulares com profundidades inferiores a 20m, por possivelmente aproveitarem água da interface cobertura sedimentar/topo do embasamento, ou por representarem, em parte, poços construídos em ambiente aluvionar ou coluvionar. Após isso, também foram retirados do cálculo todos os poços os que não possuíam informações relevantes para análise, em especial vazão após estabilização e profundidade.

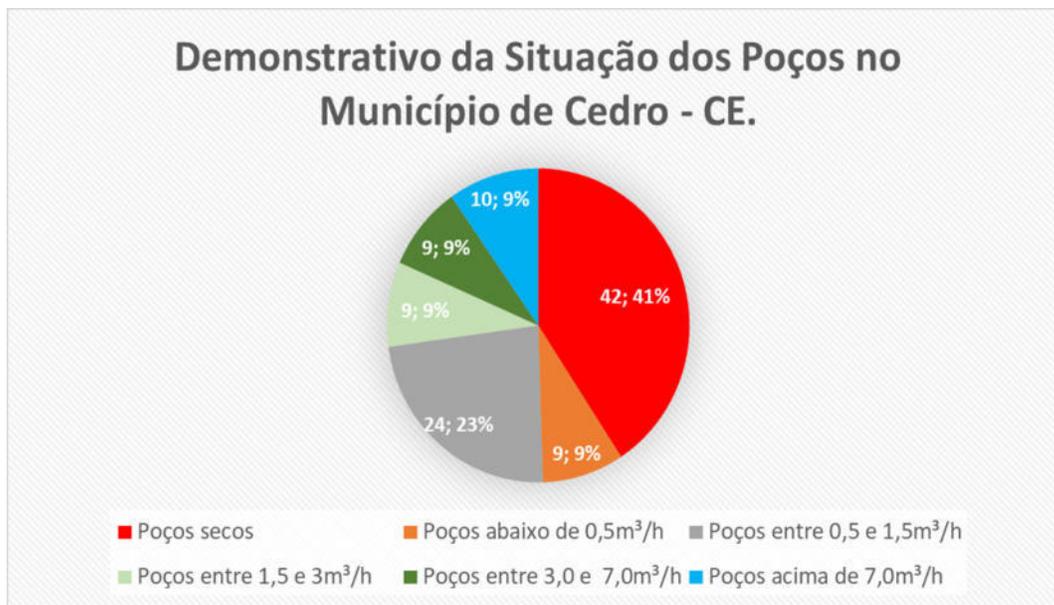
O município de Cedro está inserido no grupo dos 120 municípios com predominância de rochas do contexto fissural. Dessa forma, utilizando os mesmos critérios anteriormente descritos para análise dos 120 municípios, resultou em um total de 103 poços pertencentes ao grupo de análise neste município. Em Cedro/CE, 41% dos poços construídos são totalmente improdutivos, enquanto 73% tiveram vazões inferiores a  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , ou seja, uma capacidade de produção de água reconhecidamente baixa (Gráfico 2). Ademais, a média simples da vazão dos poços produtivos do grupo de análise, considerando os 120 municípios, é de  $3,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , ou seja, 73% dos poços do município de Cedro-CE, possuem vazão inferior à metade dessa média regional calculada.

Um fato importante a ser relatado é que a profundidade média dos poços do grupo de análise foi de 70m, onde o poço mais raso foi de 20m, que foi a profundidade de corte, e o poço mais profundo foi de 257m. Esse poço de 257m, localizado no município de Crateús, Ceará, possui vazão de  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ , ou seja, inferior à média simples dos poços pertencentes ao grupo de análise.

Ao avaliar com maior critério apenas os poços mais profundos do grupo de 120 municípios, acima da média de profundidade, foram selecionados apenas os poços com profundidades superiores a 100m. Nesse grupo, com 513 poços existentes, a média simples de vazão foi de  $3,48 \text{ m}^3/\text{h}$ , praticamente igual à média geral calculada. Além disso, 144 poços desse subgrupo foram totalmente improdutivos, ou seja, 28% desse

total. Um dado, que por si só ilustra a complexidade do sistema aquífero em questão.

Gráfico 2 – Demonstrativo da situação geral dos poços tubulares existentes no município de Cedro, Ceará. Total de poços considerados = 103



Fonte: SIAGAS (2021).

Destaca-se ainda que o poço com maior vazão do grupo de análise, com capacidade produtiva de 120m³/h, localizado no município de Orós, possui apenas 60m de profundidade. Os dados encontrados durante a análise levaram a considerar que a raiz do problema, nesse caso, não é uma questão de profundidade dos poços e sim da escolha dos locais para construção dos mesmos, onde um melhor local, escolhido com melhores critérios, pode resultar em uma capacidade produtiva de água várias vezes superior a um poço construído em local inapropriado, mesmo que este seja muito mais profundo. A profundidade de um poço deve ser definida com base em dados e informações geológicas e pode sim contribuir para aumento da vazão de um poço tubular, desde que atenda a critérios geológicos estabelecidos na hora da escolha no local de construção.

Segundo Nascimento *et al.* (2008), o banco de dados do SIAGAS é um projeto em andamento da CPRM iniciado em 1995 que compila informações de poços fornecidos por órgãos governamentais, gestores dos recursos hídricos, empresas privadas e campanhas de cadastramento de poços realizados pelo corpo técnico da CPRM. Por serem dados de múltiplas fontes, existem inúmeras inconsistências e/ou dados incompletos, que fazem com que o trabalho de estruturação desse banco de dados

seja complexo e algumas vezes necessite até de campanhas de campo para validação. Por isso, é importante ressaltar a deficiência que ainda existe nas informações existentes no sistema e que são motivo de esforço contínuo da CPRM em melhoramentos.

#### 4.2 Levantamentos de Campo

Durante a etapa inicial dos trabalhos de campo foi identificada a predominância de rochas do Complexo Jaguaretama, unicamente representadas por gnaisses paraderivados com baixo padrão de fraturamentos (Figura 14A) e grau variável de metamorfismo, por vezes com fusão parcial/migmatização (Figura 14B), truncados por fraturamentos provocados por eventos tectônicos mais recentes de direção preferencialmente NW e NNW.

Notadamente, verifica-se um baixo potencial hidrogeológico nos litotipos presentes nas áreas alvo I e II e essa é a realidade de grande parte do sertão cearense. Aliado a isso, a região caracteriza-se por um quadro de chuvas irregular, com baixa precipitação e elevadas taxas de evaporação, típicos do clima semiárido (FUNCEME, 2015).

Figura 14 – Gnaisse paraderivado com fratura preenchida por veio de quartzo com direção 340 Az (A); Rocha migmatítica encontrada no local, com pequenos dobramentos truncados por fratura de direção 340 Az (B)



Fonte: Autor.

Durante essa primeira etapa, também foi realizado uma campanha de cadastramento de poços tubulares em ambas as áreas de estudo. Foram encontrados 11 poços tubulares, todos com profundidades superiores a 70m e captando, quando produtivos, água do sistema fissural. Dos 11 poços, 10 estão localizados na área alvo I,

Angico/Lagedo, e 1 está localizado na área alvo II, São Miguel (Tabela 1).

Os poços foram georreferenciados em coordenadas UTM - ZONA 24S (SIRGAS 2000) e devidamente fotografados (Figura 15). Para efeitos de navegação, todos os pontos foram georreferenciados utilizando o *software* Locus Map Pro, um aplicativo GPS/GLONASS que aceita a importação de arquivos do tipo KML/KMZ e permite a navegação sobre imagens de satélite de alta resolução, mesmo em locais sem conexão com internet. No catálogo dos poços foram levantadas informações sobre as características hidrogeológicas como a vazão do poço, finalidade de uso/demanda da água, sua profundidade final e situação atual do mesmo (tabela 2).

Tabela 2 – Situação geral dos poços cadastrados nas áreas alvo I e II em Cedro/CE

ID Poço	UTM E (m)	UTM N (m)	Área Alvo	Profundidade (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Situação
P01	494590	9276258	I	100	1.2	Abandonado
P02	494404	9276561	I	90	1.5	Ativo
P03	494473	9276633	I	90	1.8	Ativo
P04	494524	9276670	I	90	3	Ativo
P05	494594	9276622	I	85	Seco	Seco
P06	494504	9276593	I	90	7	Ativo
P07	494591	9276520	I	90	10	Ativo
P08	494584	9276420	I	85	Seco	Seco
P09	492797	9276026	I	90	Seco	Seco
P10	494941	9276155	I	120	Seco	Seco
P11	495864	9276502	II	90	3	Ativo

Fonte: Autor.

A característica principal que motivou a escolha da área alvo I é a proximidade de poços com vazões variadas e até improdutivo. Dos poços existentes, nota-se que dois possuem vazões superiores a 7 m<sup>3</sup>/h, um poço com vazão entre 3 m<sup>3</sup>/h e 7 m<sup>3</sup>/h, e quatro poços secos/improdutivos, todos com distâncias inferiores a 200m entre si (Figura 16). A quantidade de poços improdutivos nesse local é de 40%, a mesma média geral do município.

No caso da área alvo II há apenas um poço, o qual é utilizado para abastecimento emergencial da comunidade. Cabe citar que o motivo da escolha desse poço tubular para realização de testes foi a qualidade da sua água, com altíssima concentração de sais. Como o elevado teor de sais é uma característica comum de poços no contexto geral do semiárido cearense, há uma necessidade de satisfazer a dúvida de que é possível ter alguma definição da salinidade da água antes da construção do poço

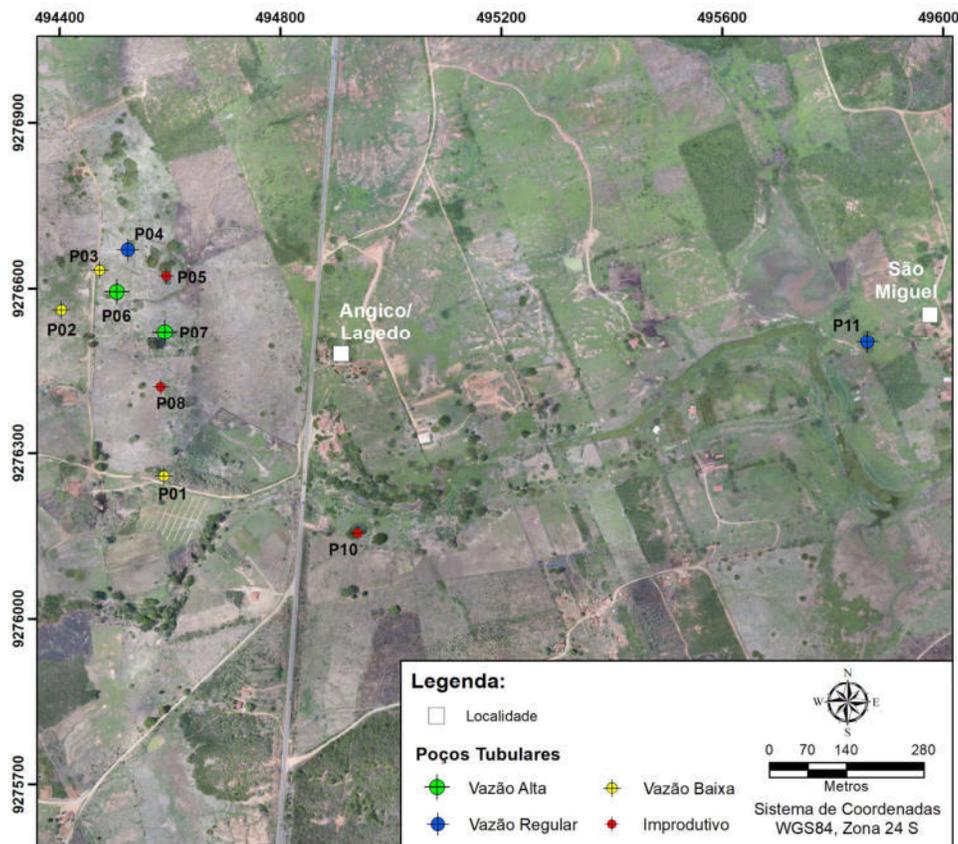
tubular em si.

Figura 15 – Detalhes dos poços catalogados durante a etapa de campo



Fonte: Autor.

Figura 16 - Localização dos poços catalogados em campo nas áreas alvo I (Angico/Lagedo) e II (São Miguel) e suas respectivas nomenclaturas. Imagem: Ortomosaico adquirido com drone



Fonte: Autor.

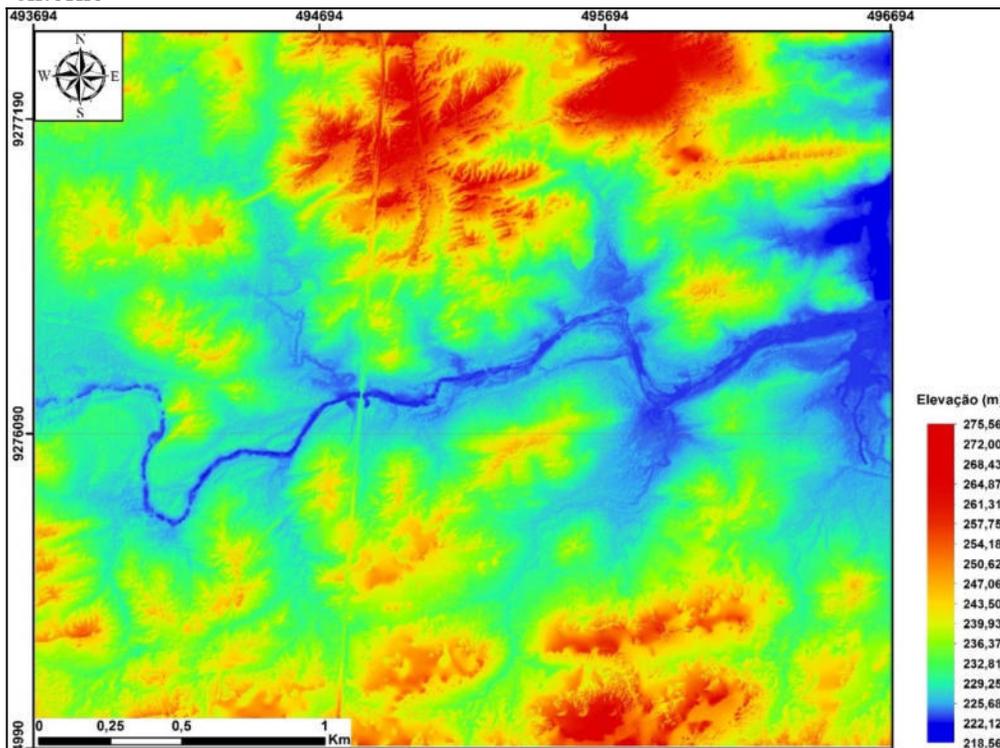
#### 4.2.1 Aerofotogrametria

Após o reconhecimento geológico e cadastro dos poços existentes foi realizada a aquisição dos dados aerofotogramétricos com drone. No total, foi levantada uma área de 978,94ha ao redor dos dois alvos. O principal produto gerado por esse levantamento foi o modelo digital do terreno (MDT) de alta resolução, onde foi possível realizar uma excelente correlação entre o relevo e as estruturas rúpteis mais importantes no local. Um conceito importante utilizado para essa relação foi o riacho/fenda, consagrado na literatura por Siqueira (1963). Ao analisar os produtos gerados pela aerofotogrametria, (Figuras 17 e 18), a correlação do relevo com a estrutural é evidente, possibilitando observar, a partir da principal drenagem local, um conjunto de estruturas riacho/fenda que perpassam a área alvo I, com uma componente que atravessa os dois poços de maior vazão (P06 e P07), justificando, em termos estruturais, a vazão acima da média

encontrada nos dois poços (Figura 8). A visualização da estrutura que corta os dois poços somente foi possível a partir da análise do MDT gerado pelo drone. Em contrapartida, os demais poços existentes nos dois alvos apenas margeiam as estruturas principais identificadas através da análise estrutural da área. Tal fato explicaria a baixa vazão existente em alguns, provavelmente proveniente de fraturamentos secundários, e a alta ocorrência de poços improdutivos.

O processamento das imagens adquiridas pelo drone foi realizado após carregar as imagens coletadas e os pontos de controle já corrigidos, onde gerou-se os seguintes produtos finais de interesse: Modelo Digital de Terreno (MDT) e Ortomosaico (figuras 17 e 18).

Figura 17 – Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado para a área de pesquisa e entorno



Fonte: Autor.

Os produtos gerados no método aerofotogramétrico constituíram um excelente mapa-base e um MDT para os trabalhos de campo, sendo valiosos na locação precisa de pontos de interesse e na análise das intercalações entre esses pontos. A utilização deste método na pesquisa de água subterrânea em ambiente cristalino na região de Cedro-CE foi absolutamente imprescindível, tornando possível aperfeiçoar o planejamento da

geofísica pela seleção de alvos prioritários e pela programação racional e objetiva das linhas de medições, em conjunto com as informações de poços locais.

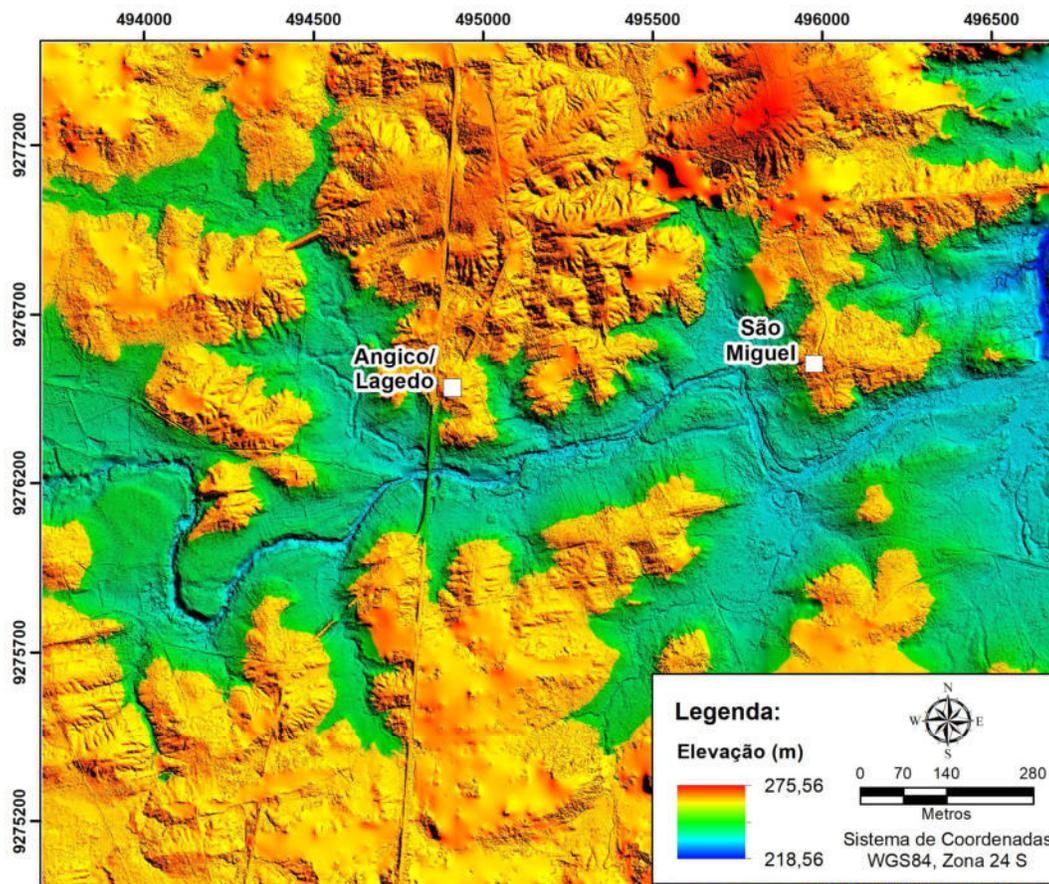
Figura 18 – Ortomosaico elaborado para a área de pesquisa e entorno



Fonte: Autor.

Cabe mencionar que múltiplos produtos e maneiras de visualização são possíveis com os produtos de aerofotogrametria, dessa forma é possível realçar estruturas e delimitar os locais com maior potencial para proceder com uma futura campanha de levantamentos geofísicos e determinar os melhores locais para construção dos poços de captação de águas subterrâneas (Figura 19). Hoje é possível gerar produtos ainda mais sofisticados utilizando sensores/câmeras multiespectrais disponíveis no mercado, com capacidade de captar frequências distintas do espectro eletromagnético, tais como bandas do infravermelho, como é o caso de sensores orbitais, como o ETM ou o ETM+ dos satélites LANDSAT, mas com resolução espacial muito superior. Dito isso, é possível afirmar que os levantamentos aéreos com drone muito podem contribuir para o resultado final de uma campanha de aquisição de dados geofísicos com foco em prospecção de águas subterrâneas e outros.

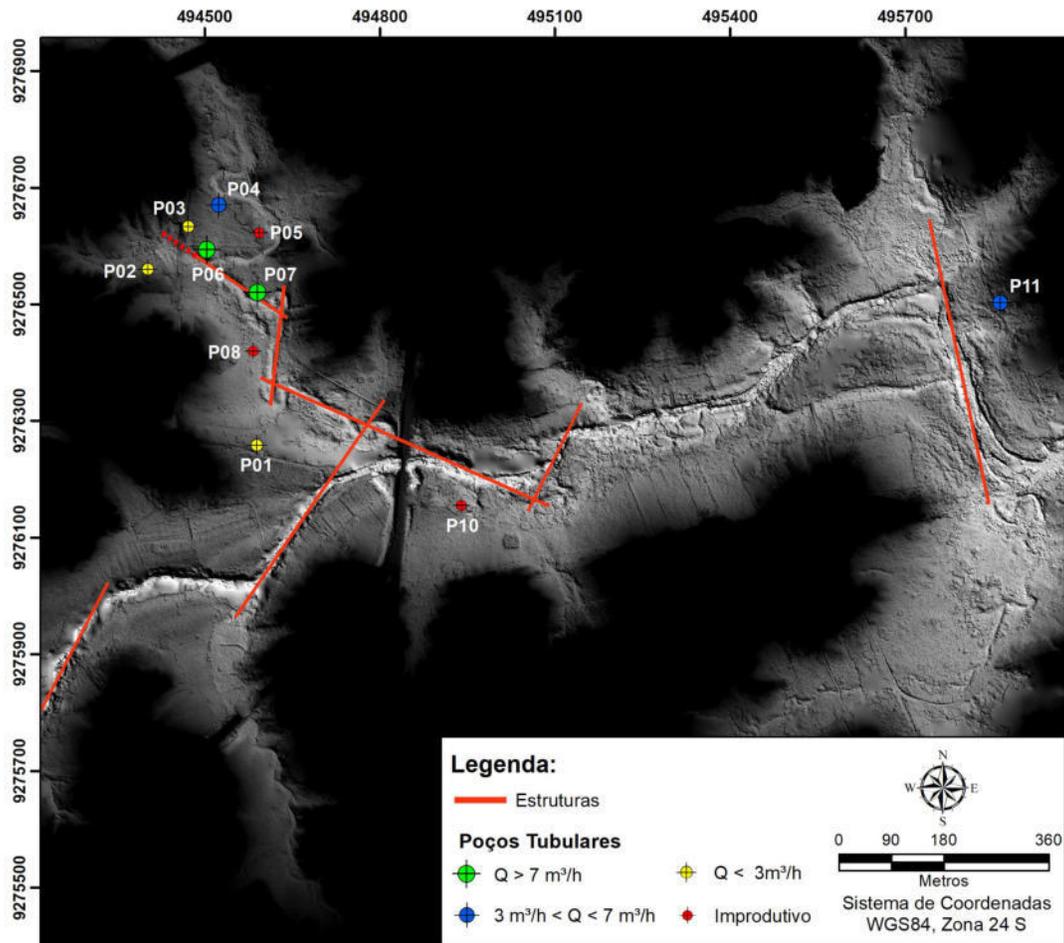
Figura 19 – Realce do Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado para a área de pesquisa e entorno



Fonte: Autor.

Com os produtos gerados pela aerofotogrametria foi possível contatar os primeiros resultados dos trabalhos de campo. Ao observar os poços P06 e P07 notou-se que ambos estão posicionados em cima de uma componente estrutural do tipo riacho/fenda, observada na análise estrutural da área (Figura 20). Essa componente estrutural é a projeção de um conjunto de fraturas/planos de quebra que se estendem desde a drenagem principal da área em um sentido NW-SE, truncados por uma estrutura NNE. Esse fato constitui a primeira explicação para a grande diferença de vazão entre os poços existentes no local, pois nenhum dos outros poços estão posicionados sobre alguma outra estrutura “mapeável” a olho nu através dos produtos de aerofotogrametria convencional utilizados.

Figura 20 – Estruturas riacho/fenda identificadas nos cursos de drenagem da área alvo I e II



Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Geofísica aplicada e principais resultados

Em continuidade ao trabalho, foram aplicados os métodos eletromagnético e eletrorresistividade para caracterização da geologia de subsuperfície, conforme demonstrado na Figura 21 para o Alvo I e na Figura 24 para o Alvo II. Para efeito de explicação, os principais resultados, aqueles selecionados para publicação técnico-científica, serão demonstrados primeiramente e em seguida os resultados dos demais perfis e outros processamentos realizados nos dados geofísicos.

Para uma melhor visualização dos resultados do alvo I, fez-se uma correlação lateral entre os perfis de resistividade 1, 2 e 5 (Figura 22). Há diferença significativa nas escalas de resistividade do PER01 em relação ao PER02 e PER05, isso se deve

principalmente pelo fato de o PER01 ser um perfil mais longo, e, conseqüentemente, mais profundo. Além disso, o perfil apresentado utilizou o arranjo Wenner-Schlumberger, enquanto os outros dois perfis foram realizados através do arranjo dipolo-dipolo. Mesmo assim, há uma excelente correlação entre os três perfis, com uma estrutura principal bem marcada e que foi demonstrada através da análise estrutural realizada no MDT.

O arranjo dipolo-dipolo exibiu um excelente resultado, em termos de resolução, para prospecção de estruturas com padrão vertical, enquanto o arranjo Wenner-Schlumberger apresentou menor resolução para detecção desse tipo de estruturas e melhor qualidade para avaliação de estruturas/feições preferencialmente horizontais. Além disso, considerando um equipamento multicanal, como é o caso dos equipamentos utilizados, o arranjo dipolo-dipolo tem uma aquisição mais rápida, agilizando o processo de campo e melhorando a produção, pois utiliza todos os canais disponíveis no equipamento. O arranjo Wenner-Schlumberger, por utilizar os eletrodos de corrente externos e eletrodos de potencial internos, utiliza apenas um canal de leitura e, portanto, é um arranjo de aquisição mais lenta.

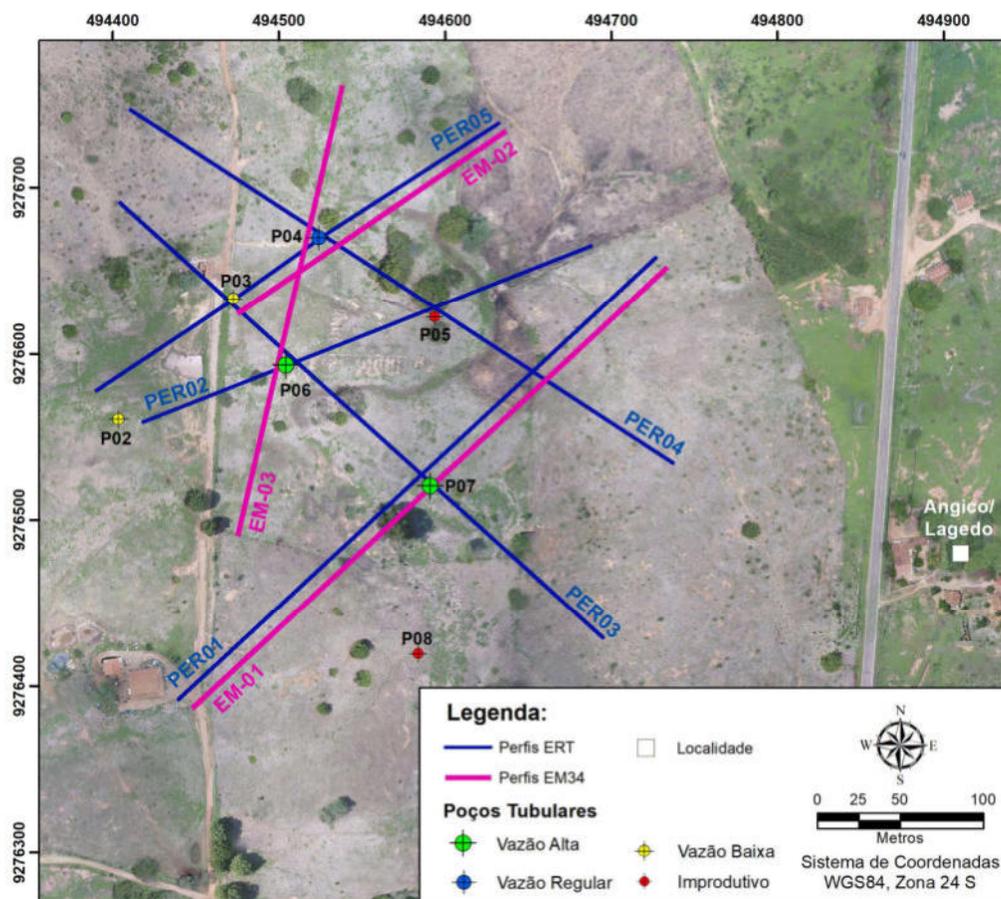
A grande vantagem da utilização do arranjo Wenner-Schlumberger é a razão sinal/ruído demonstrada nos dados coletados, muito superior ao arranjo dipolo-dipolo, com dados de alta qualidade e pouca presença de ruídos. Isso se deve pela sua geometria de eletrodos, onde os eletrodos de potencial estão sempre centralizados entre os eletrodos de corrente, obedecendo a uma relação de distância padrão entre si, respeitando essa condição mesmo com o aumento de profundidade, enquanto no arranjo dipolo-dipolo o distanciamento dos dipolos pode ocasionar um significativo aumento de ruído à medida que a profundidade aumenta.

Por isso, no caso do PER01, o perfil apresentado foi o Wenner-Schlumberger, com melhor relação sinal/ruído, apresentando uma qualidade superior ao dipolo-dipolo, que estava com ruídos excessivos, dificultando o processamento e interpretação. No entanto, há uma necessidade de aumento de ganho/filtro de realce vertical com pelo menos o dobro daqueles utilizados no processamento dos dados dipolo-dipolo, para esse caso. Esse é um parâmetro que deve ser utilizado com cuidado, com bom entendimento estrutural do local, pois pode alterar significativamente o resultado da inversão do dado geofísico.

Os poços P06 e P07 estão diretamente posicionados nos locais com fraturamentos na rocha, observados por padrões de quebra significativos na

resistividade, conforme demonstrado na Figura 22. Além disso, estão posicionados na componente estrutural do tipo riacho/fenda, observada na análise estrutural dos produtos do drone (Figura 20), e perpassam a projeção do plano de quebra da resistividade a uma profundidade intermediária, entre 40 e 60m. O poço P04, de vazão regular, 3m<sup>3</sup>/h, perpassa uma feição de fratura observada na geofísica a uma profundidade estimada de 60m.

Figura 21 – Posições dos perfis ERT e EM-34 na ÁREA ALVO I (localidade de Angico/Lagedo)



Fonte: Autor.

Essa estrutura não foi observada nos produtos do drone, sendo, portanto, uma estrutura mapeada exclusivamente com a geofísica e não visível a olho nu. O poço P03 está próximo à projeção da feição principal que atravessa os poços P06 e P07, mas ficou deslocado cerca de 25m para nordeste, podendo cortar essa estrutura principal apenas a profundidades superiores a 70m. Como esse poço tem apenas 90m de profundidade e somente teria condições de perpassar a feição estrutural principal a profundidades

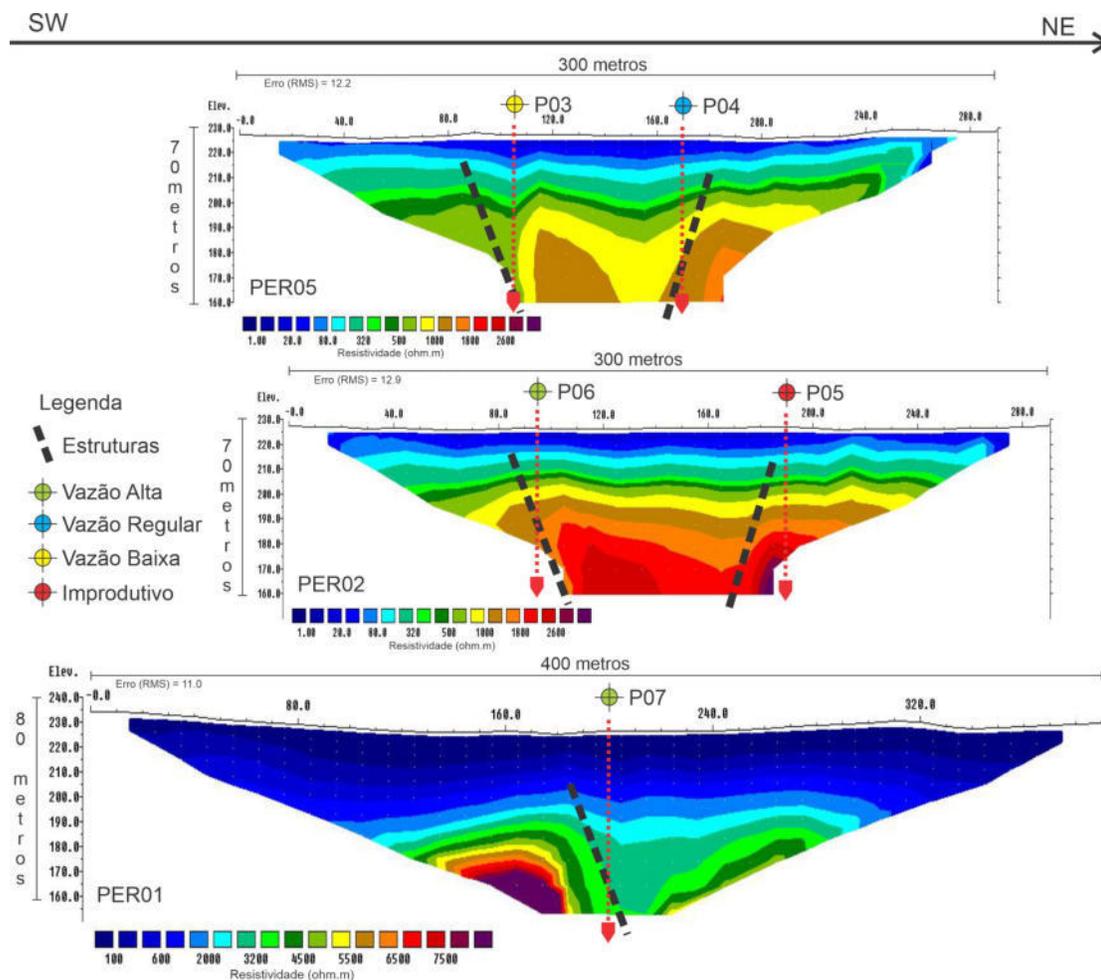
superiores a 70m é compreensível que tenha menor vazão que aqueles localizados em uma posição que melhor aproveite essa estrutura riacho/fenda. Em relação ao P05, pode-se dizer que não foi encontrada nenhuma justificativa para a posição onde foi construído, visto que não há feições estruturais visíveis a olho nu em imagens de sensoriamento remoto, assim como não se localiza em nenhuma descontinuidade marcada pela geofísica. Tal fato justifica o resultado improdutivo e provavelmente reflete e representa uma parte significativa dos resultados similares encontrados no semiárido cearense, ou seja, poços locados sem uma quantidade mínima de critérios bem definidos ou sem critério algum.

No mesmo local onde foi realizada a aquisição do PER01, também foi executada a aquisição do EM34 – 01, ou EM01 (Figura 11), com extensão aproximada e profundidade de investigação de 60m, sendo esta a máxima possível de ser atingida com o EM34-XL (Fries *et al.*, 2019). A região que marca o local do poço P07 apresentou grande semelhança no padrão do resultado com aqueles exibidos no PER01, mostrando uma boa correlação entre a resistividade e o método eletromagnético nesse local. Através da aquisição realizada com o método eletromagnético foi possível observar a presença de novas estruturas com padrão similar a fraturamento/planos de quebra. Nas imediações da posição 200m do perfil, por exemplo, há a possibilidade de mais de uma estrutura presente no local, justificando a vazão superior ocorrida no poço P07. O EM34 ganha destaque pela simplicidade na aquisição dos dados, no tratamento dos mesmos e facilidade na interpretação de estruturas de padrão vertical, como fraturas e descontinuidades nas rochas, além disso, tem maior resolução em profundidade nas extremidades do perfil e não precisa de muito espaço para atingir a profundidade de 60m, com apenas 40m entre as bobinas e um dipolo vertical isso já é possível.

Há, porém, duas grandes desvantagens na utilização do EM34 e outros métodos eletromagnéticos de investigação rasa em relação à eletrorresistividade: a propensão a ruídos e interferências e o limite de profundidade. O método eletromagnético indutivo pode sofrer severas interferências aéreas, por exemplo, pela presença de linhas de transmissão de alta tensão ou presença até mesmo de linhas de energia comuns. Dessa forma, pode-se dizer que é um método que precisa de bastante critério em relação ao local onde será empregado, visto que pode gerar resultados incompatíveis com a realidade, sendo o VLF ainda mais susceptível. Ademais, apesar do espaço necessário, a eletrorresistividade pode atingir profundidades muito superiores e com um volume de dados muito maior, garantindo maior confiabilidade dos resultados.

Quando empregados em conjunto, os dois métodos são totalmente complementares, pois o método eletromagnético pode ser aplicado de maneira preliminar, destacando as regiões com potencial para ocorrência de estruturas rúpteis e planos de quebra. Em contrapartida, a eletrorresistividade, sendo um método mais trabalhoso, mas notoriamente menos propenso a ruídos, pode ser aplicada apenas nos locais onde há algum potencial já pré-mapeado, confirmando as anomalias estruturais e definindo a melhor posição para construção do poço tubular.

Figura 22 – Visualização da correlação lateral entre os perfis 1, 2 e 5, com a locação dos poços existentes nos perfis

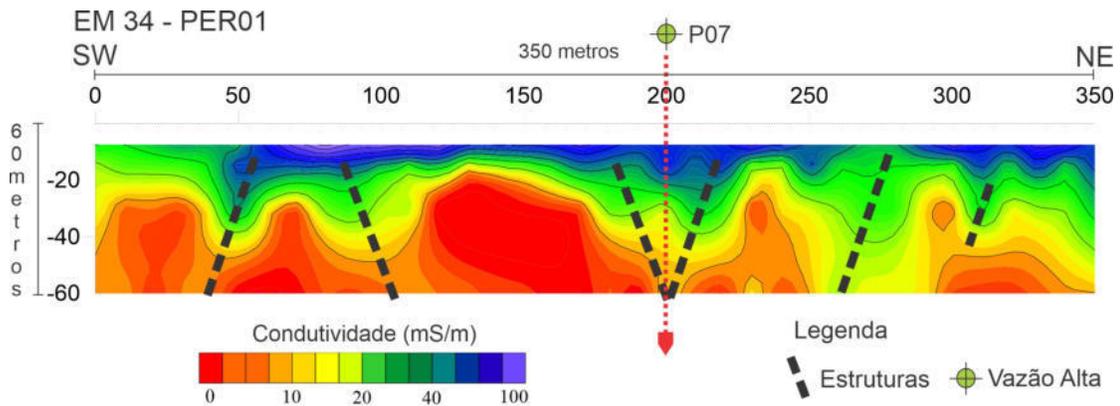


Fonte: Autor.

Em relação aos levantamentos realizados na área alvo II (Figura 24), os principais perfis a serem apresentados são o PER11 e o EM 05 (Figura 25), onde foi possível comparar o resultado direto de um poço de água com alto teor de sais e os

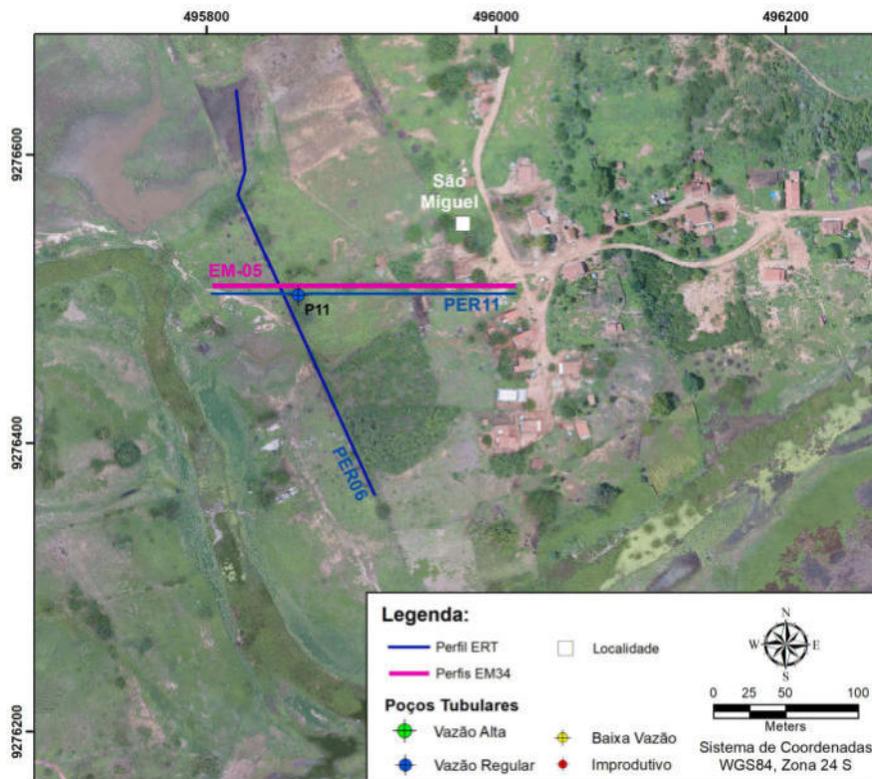
diferentes métodos geofísicos empregados. No caso do PER11, em específico, também foram levantados dados de polarização induzida (IP) utilizando o equipamento Supersting R8.

Figura 23 – Visualização do perfil EM34-01



Fonte: Autor.

Figura 24 – Perfis ERT e EM34 realizados na área alvo II, no caso do PER11 também foram levantados dados de polarização induzida



Fonte: Autor.

A influência da água salobra nos resultados geofísicos foi bastante destacada. Os valores de condutividade aparente medidos no perfil EM34 -05 foram quatro vezes superiores àqueles medidos nos demais perfis, fazendo com que a escala linear utilizada prejudicasse a visualização das anomalias existentes do restante do perfil (Figura 25). Sabe-se que os valores de condutividade elevada têm relação direta com a presença de água salinizada nesse local e que, com a existência de poços com água salobra e poços com água de boa qualidade em uma mesma região, é possível parametrizar os dois cenários e diminuir, caso seja de interesse, o posicionamento de poços em locais com propensão à elevada salinidade.

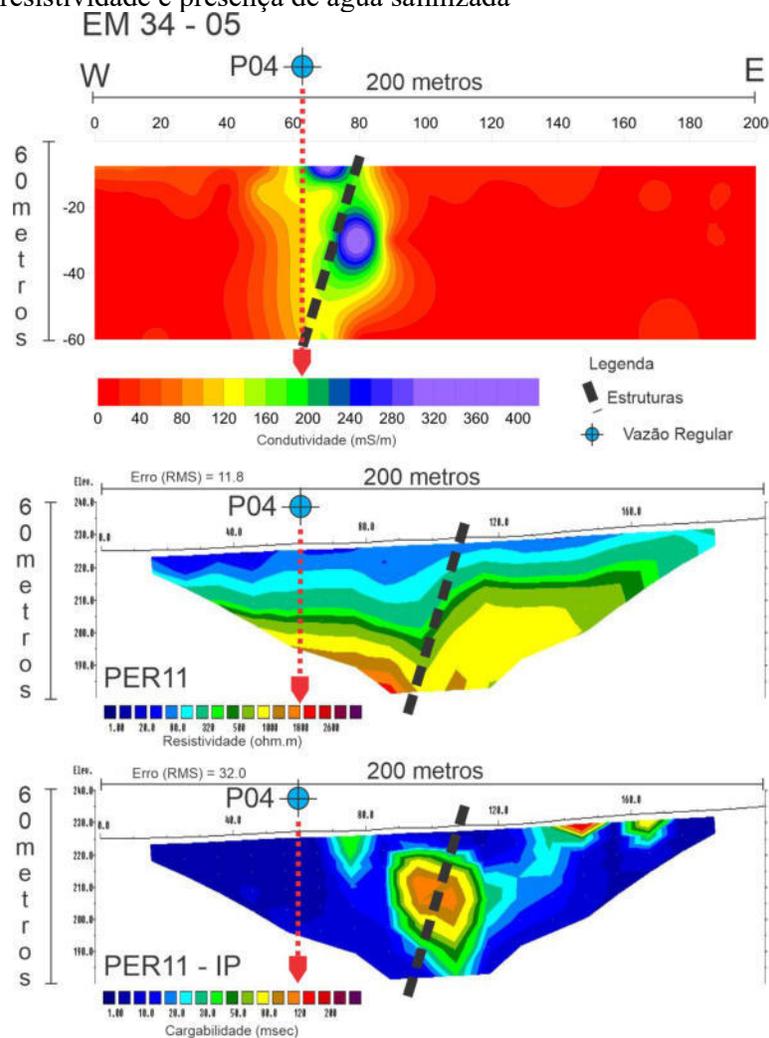
Uma questão interessante em relação ao comparativo apresentado na Figura 25, é que embora a seção de resistividade e de cargabilidade (IP) tenham apresentado uma estrutura de fratura e uma alta cargabilidade, estes ficaram deslocados em relação a posição do poço P04 e maiores estudos seriam necessários para entendimento dessa situação. O fato de a presença da água salinizada nessa região ter apresentado valores elevados de cargabilidade é esperado, pois uma solução com elevada concentração de íons tende a polarizar e concentrar cargas, sendo “mapeável” através do método polarização induzida. Entretanto, o IP é um método extremamente trabalhoso, que requer a utilização de eletrodos não polarizáveis para medição do decaimento do potencial ao longo de um intervalo de tempo (*time domain*) e um tempo de medição até oito vezes superior ao da resistividade. Para esse cenário apresentado, o método IP torna-se inviável em comparação a outros métodos como o eletromagnético indutivo, mas, em situações que sejam necessárias medições profundas ou ultra profundas, o IP pode ser uma solução, pois assim como a resistividade pode ter profundidades maiores de investigação à medida que os eletrodos são ajustados em campo.

Por fim, considerando todos os métodos geofísicos empregados e o volume de informações levantadas pode-se dizer que, mesmo em situações emergenciais que envolvam algum colapso hídrico durante a seca do Nordeste, há a necessidade de um quantitativo mínimo de levantamentos para a escolha do local de construção de um poço tubular. Inicialmente é necessária a realização de uma análise estrutural através de imagens de sensores orbitais ou de algum levantamento de maior resolução como a aerofotogrametria com drone, seguindo-se por um reconhecimento geológico local para determinação dos litotipos predominantes. Somente a partir desse ponto é que será possível ter entendimento dos poços existentes no local, avaliando o potencial da região. Nas áreas alvo selecionadas, por fim, deverão ser aplicados métodos geofísicos para

determinar os pontos exatos onde serão construídos os poços, o que acarretará menores erros.

Em termos de quantidade de levantamentos geofísicos, como o método eletromagnético está sendo indicado como um método preliminar, sugere-se quantitativos lineares maiores. Para a eletrorresistividade, considerando o caso da região em estudo, considerando poços a profundidades superiores a 70m, que é a profundidade média dos poços do semiárido cearense, recomenda-se executar perfis com comprimento mínimo de 300 a 400m de extensão para os arranjos sugeridos nesse trabalho. Os resultados apresentados no alvo I indicaram a vantagem de realização de vários perfis para entendimento do padrão estrutural e direção preferencial das fraturas de um local.

Figura 25 - Visualização do perfil EM34-05 e sua correlação com perfis de resistividade e presença de água salinizada



Fonte: Autor.

Assim, indica-se, a realização de pelo menos 2 perfis para cada alvo de 50ha, ou seja, uma quantidade mínima de pelo menos 600m lineares de perfil de resistividade e que deverá aumentar de acordo com o tamanho do alvo prospectado. O espaçamento entre eletrodos máximo indicado para o nível de detalhe necessário para esse tipo de levantamento é de 10m.

Uma sugestão em relação aos quantitativos lineares de perfis de eletrorresistividade e eletromagnético em relação à área de trabalho segue na Tabela 3. Cabe ressaltar que isso trata-se apenas de uma sugestão, um parâmetro mínimo, por assim dizer, sendo totalmente variável em função de cada cenário ou situação geológica encontrada em campo.

Tabela 3 – Sugestão de quantitativos mínimos para campanha de investigação geofísica utilizando métodos elétricos e eletromagnéticos em conjunto em relação à área de trabalho

Área (ha)	Quantitativo EM (m)	Quantitativo RES (m)
50	1500	600
100	2500	900
500	4000	1800
1000	7000	3600

Fonte: Autor.

#### **4.2.3 Demais dados e resultados geofísicos**

Os dados apresentados nesse tópico são oriundos de um processamento geofísico diferente, utilizando o software Earthimager 2D, com escalas diferentes, pois foram elaborados anteriormente à elaboração do artigo científico e anteriormente às análises finais do trabalho.

##### *4.2.3.1 Eletrorresistividade*

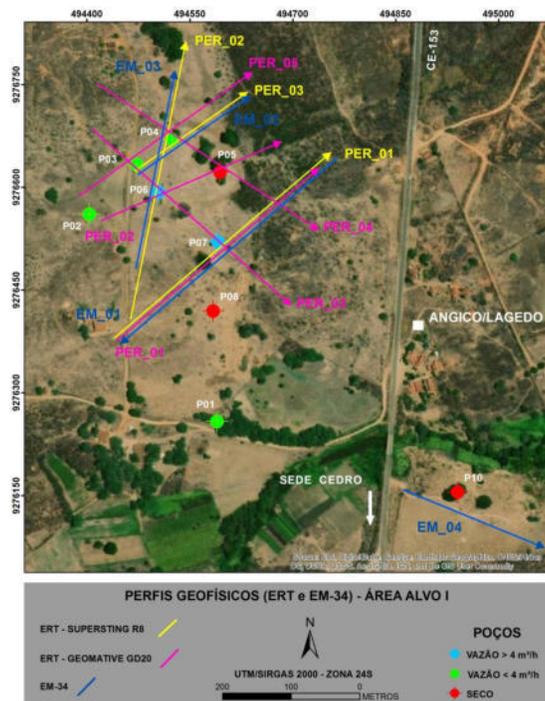
###### *4.2.3.1.1 Área alvo I*

A seguir serão apresentados os resultados do processamento (modelagens e inversões) para as respectivas seções de resistividade (ERT), com suas principais características geoeletricas para os perfis realizados na área alvo I com as 2 (duas)

tecnologias (equipamentos) utilizadas (Figura 26). Primeiramente serão apresentados os 3 (três) perfis de tomografia realizados com o equipamento Supersintg R8 de fabricação norte-americana (figuras 27 a 30).

O perfil de resistividade PER01 (Figura 27) foi realizado com sentido de sudoeste para nordeste cruzando o poço cadastrado (P07) de uso público. O poço apresentou na época da construção uma boa vazão ( $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ), sendo considerado muito bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 5 a 2.000 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 90 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados as rochas do embasamento cristalino. É possível destacar a presença de uma zona anômala resistiva com presença de descontinuidades subverticais na seção, mais especificamente na posição entre 190 a 210 metros. Do ponto de vista hidrogeológico/estrutural trata-se de uma feição anômala muito interessante e corrobora com a localização do poço bem-sucedido em termos de vazão.

Figura 26 – Mapa com a localização dos perfis ERT e EM-34 na Área Alvo I (localidade de Angico/Lagedo). Notar a localização dos poços e o sentido dos perfis indicado pela seta no final dos mesmos

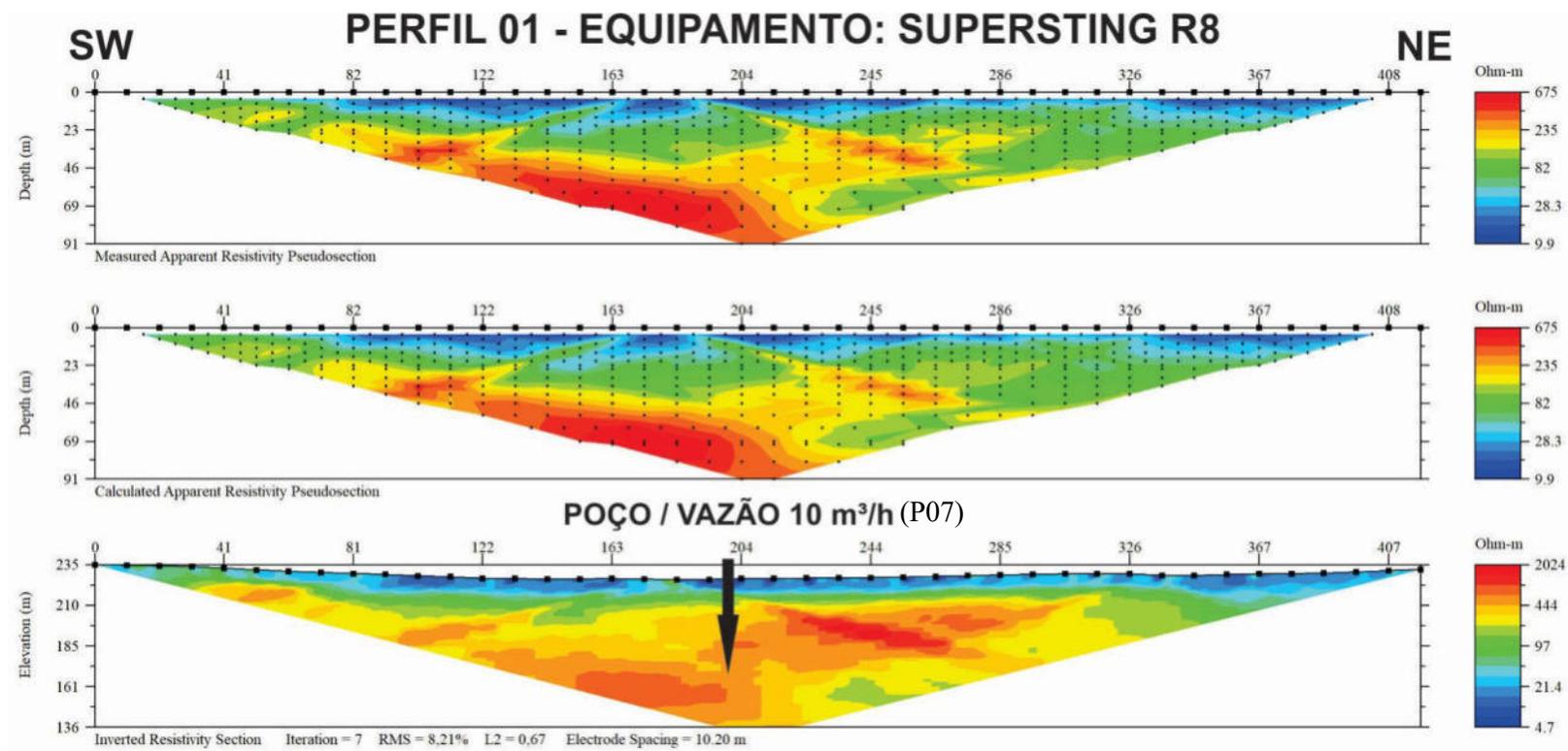


Fonte: Autor.

O perfil de resistividade PER02 (Figura 28) foi realizado com sentido de sudoeste para norte-nordeste cruzando os poços cadastrados (P06 e P04) de uso público. Os poços apresentaram na época da construção uma boa vazão para o P06 (7 m<sup>3</sup>/h) e uma vazão razoável para o P04 (3 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 7 a 750 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 90 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados as rochas do embasamento cristalino. É possível destacar a presença de zonas anômalas resistivas com presença de descontinuidades subverticais na seção, mais especificamente nas posições onde foram posicionados os poços (190 e 270 metros). Do ponto de vista hidrogeológico/estrutural trata-se de feições anômalas interessantes e corrobora com as vazões obtidas na construção dos referidos poços citados acima.

O perfil de resistividade PER03 (Figura 29) foi realizado com sentido de sudoeste para nordeste cruzando os poços cadastrados (P03 e P04) de uso público. Os poços apresentaram na época da construção uma vazão baixa para o P03 (1.8 m<sup>3</sup>/h) e uma vazão razoável para o P04 (3 m<sup>3</sup>/h), referente ao aquífero fissural captado. Como o poço P03 está localizado no início do perfil (Figura 26), o mesmo não foi posicionado na referida seção, pois não há informação em profundidade nesse local. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 8 a 250 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 40 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos associados as rochas do embasamento cristalino. É possível observar a presença de zonas anômalas resistiva com presença de descontinuidades subverticais na seção, mais especificamente nas posições 70 metros (esta mais discreta) e 140 metros. Do ponto de vista hidrogeológico/estrutural o faturamento observado na posição 140 metros é bem interessante ao comparado com o local onde o poço foi posicionado (posição 65 metros).

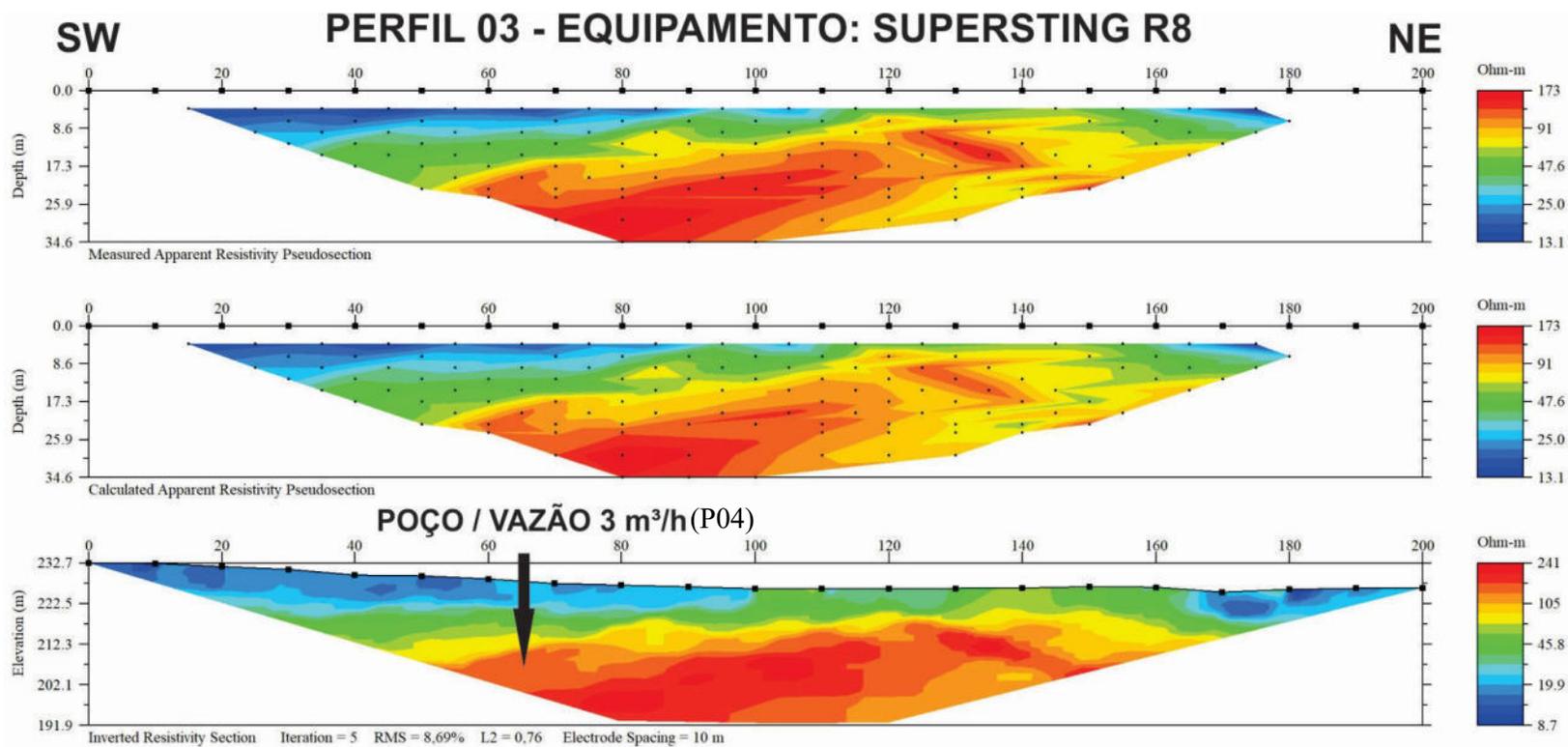
Figura 27 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 01 realizados na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P07 na seção final invertida.



Fonte: Autor.



Figura 29 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 03 realizados na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P04 na seção final invertida



Fonte: Autor.

Dando sequência aos resultados das tomografias elétricas executadas na área alvo I, segue abaixo os 5 (cinco) perfis de realizados com o equipamento Geomative GD20 de fabricação Chinesa (figuras 36 a 40).

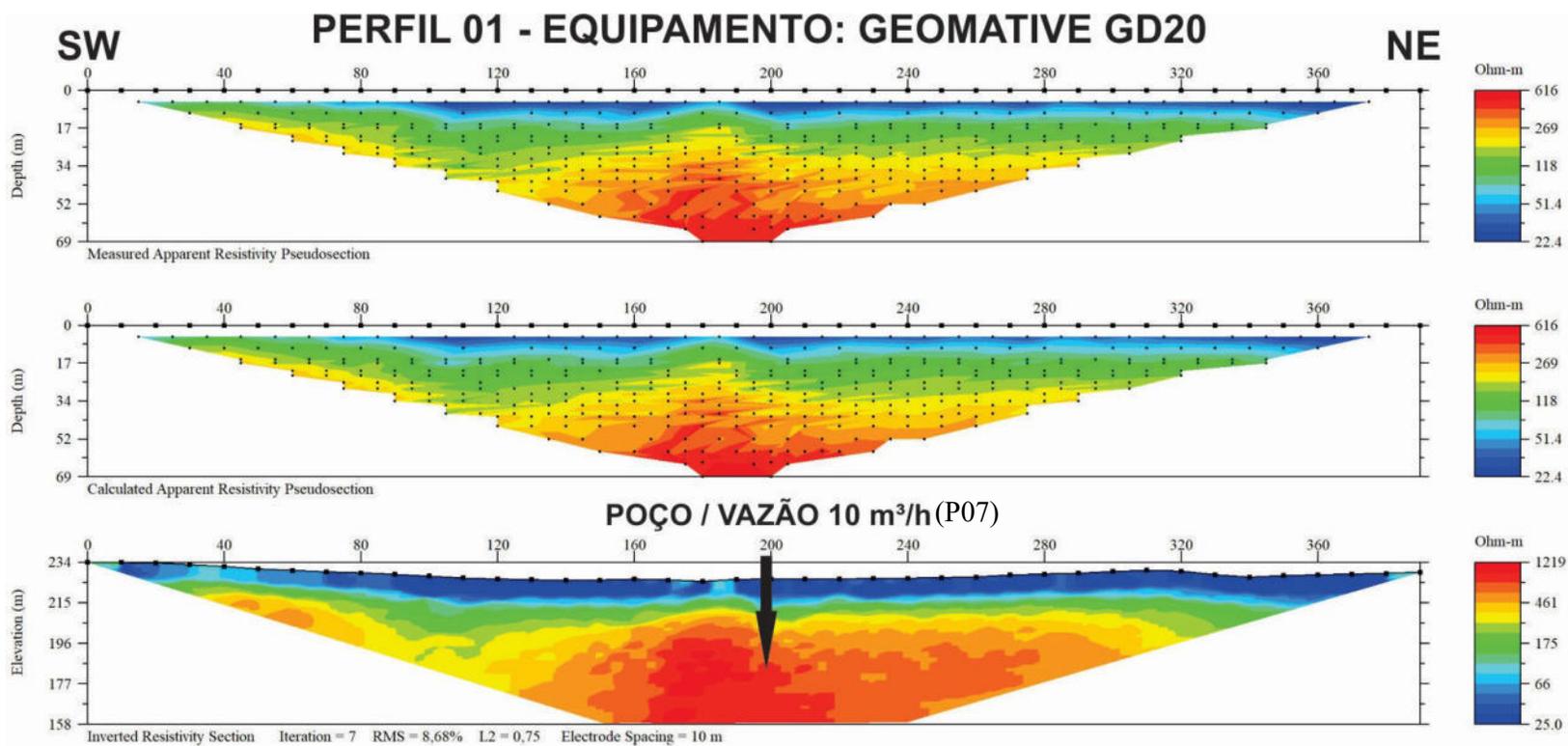
O perfil de resistividade P01 (Figura 30) foi realizado com sentido de sudoeste para nordeste cruzando o poço cadastrado (P07) de uso público. O poço apresentou na época da construção uma boa vazão (10 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado muito bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 25 a 1220 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 75 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados às rochas do embasamento cristalino. É possível observar a presença de uma zona anômala resistiva na seção, mais especificamente na posição entre 160 a 210 metros. Do ponto de vista hidrogeológico/estrutural esta zona observada, a princípio, não parece ser promissora, pois não fica evidente a presença de descontinuidades e/ou feições que pudessem justificar o poço bem sucedido em termos de vazão, citado anteriormente (posição 195 metros).

O perfil de resistividade P02 (Figura 31) foi realizado com sentido de sudoeste para nordeste cruzando os poços cadastrados (P06 e P05) de uso público. Os poços apresentaram na época da construção: i) uma vazão para o P06 (7 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado; e ii) enquanto o P05 foi considerado “poço seco”. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 25 a 1000 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 65 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados às rochas do embasamento cristalino. Com relação as posições dos 2 (poços) na seção podemos destacar: i) Ambos estão posicionados próximos a zonas anômalas resistivas (posições 92 e 188 metros); ii) Não é possível identificar com clareza a presença de descontinuidades relevantes na seção, inclusive nos locais dos poços; iii) Num primeiro momento fica difícil a diferenciação entre P06 (7 m<sup>3</sup>/h) de boa vazão e o P05 (considerado seco) com o padrão observado na seção geométrica, ou seja, ao analisar o resultado da inversão e modelagem não fica claro o motivo que justificaria esta diferença de vazão entre os 2 (dois) poços.

O perfil de resistividade P03 (Figura 32) foi realizado com sentido de noroeste para sudeste cruzando os poços cadastrados (P03, P06 e P07) de uso público. Os poços apresentaram na época da construção: i) uma vazão baixa para o P03 (1.8 m<sup>3</sup>/h); e ii) uma vazão de 7 m<sup>3</sup>/h para o P06 e 10 m<sup>3</sup>/h para o P07, sendo considerados poços bons para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 25 a 1100 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 70 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados às rochas do embasamento cristalino. Com relação a posição do P03, como trata-se do início da seção, sua análise com relação a seção ficou comprometida, devido o efeito de borda da seção, onde os dados são mais rasos. Já os outros 2 (dois) poços considerados bons em termos de vazão sugerem uma boa correlação com a seção geoeletrica. Tanto na posição 140 metros (P06), como na posição 252 metros (P07) podemos observar a presença de zonas anômalas com ocorrência de feições alinhadas (descontinuidades). Para o P06 esta ocorre em valores mais resistivos (tons amarelados), em contrapartida, para o P07, de maior vazão, esta zona apresenta-se menos resistiva (tons esverdeados), em maiores profundidades.

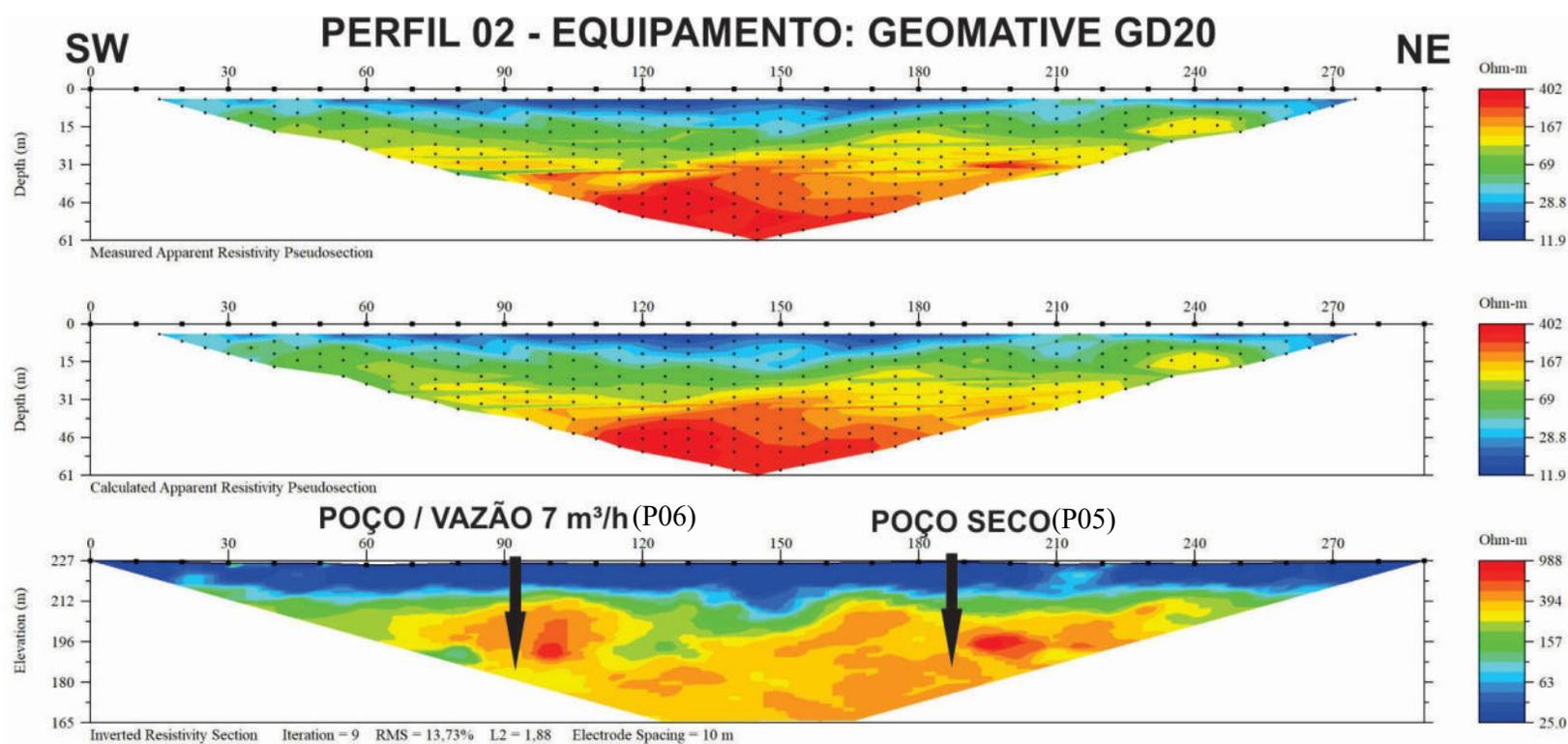
O perfil de resistividade P04 (Figura 33) foi realizado com sentido de noroeste para sudeste cruzando os poços cadastrados (P04 e P05) de uso público. Os poços apresentaram na época da construção: i) uma vazão para o P04 de 3 m<sup>3</sup>/h, sendo considerado razoável para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado; e ii) enquanto o P05 foi considerado “poço seco”. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 25 a 1000 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 90 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados às rochas do embasamento cristalino. Com relação as posições dos 2 (poços) na seção podemos destacar: i) O P04 de vazão 3 m<sup>3</sup>/h está posicionado em uma zona anômala resistiva com ocorrência de uma relevante descontinuidade subvertical, que sugere ter continuidade em profundidade (mesmo com ausência de dados neste local); e ii) No local onde foi construído o poço P05, considerado seco) não fica evidente a presença de feições estruturais, apenas uma “massa” menos resistiva (tons esverdeados).

Figura 30 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 01 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P07 na seção final invertida



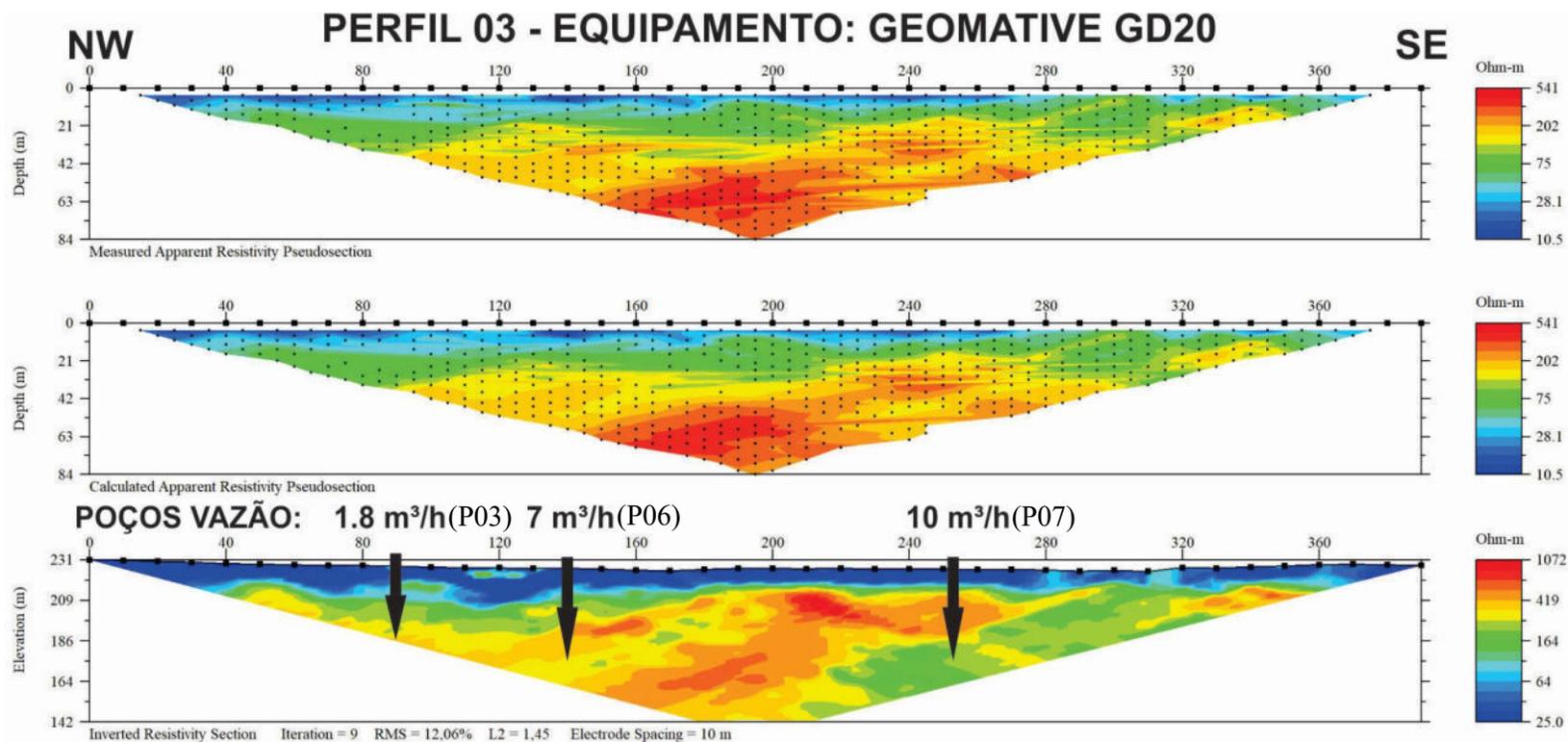
Fonte: Autor.

Figura 31 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 02 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P06 e P05 na seção final invertida



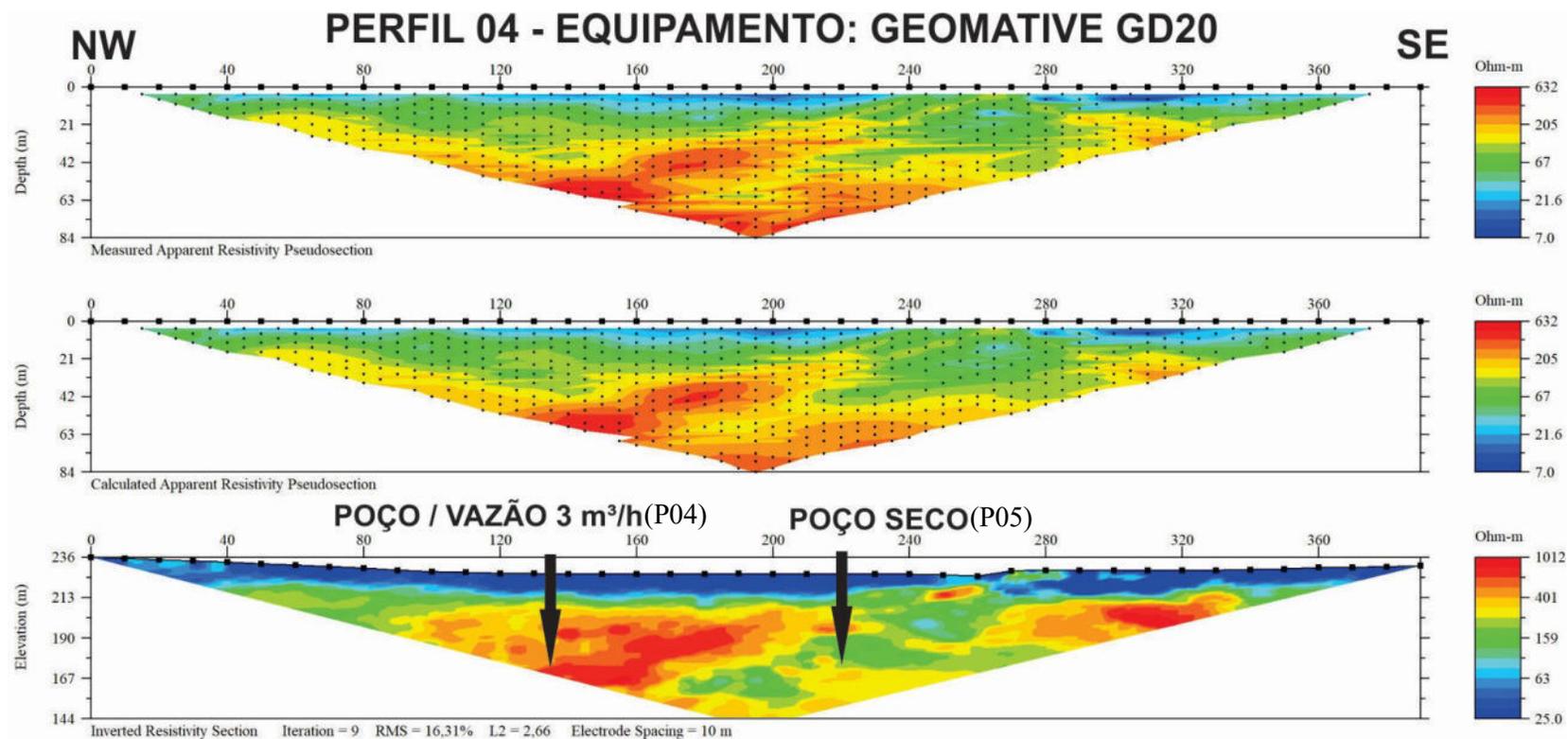
Fonte: Autor.

Figura 32 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 03 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P03, P06 e P07 na seção final invertida



Fonte: Autor.

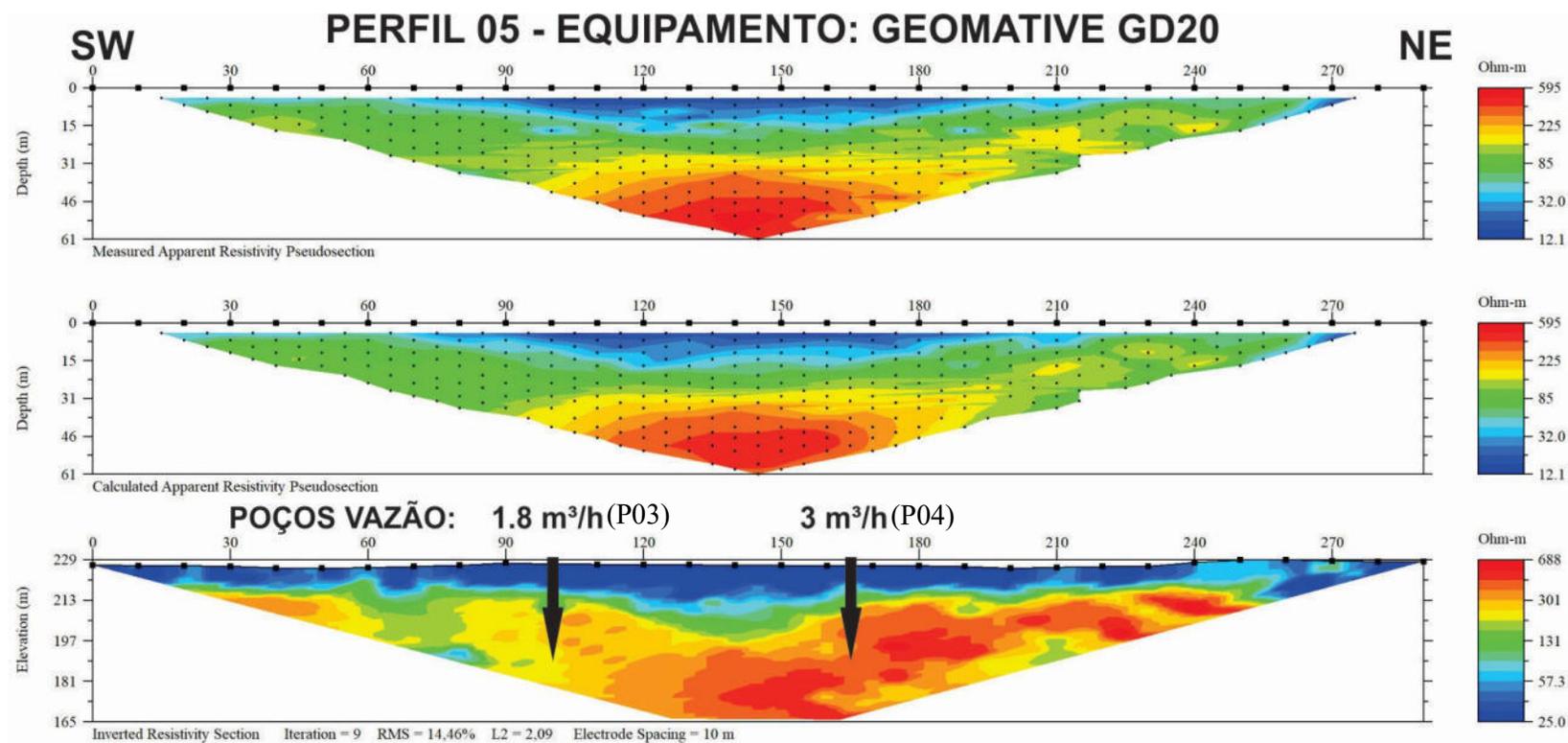
Figura 33 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 04 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P04 e P05 na seção final invertida



Fonte: Autor.

O perfil de resistividade P05 (Figura 34) foi realizado com sentido de sudoeste para nordeste cruzando os poços cadastrados (P03 e P04) de uso público. Os poços apresentaram na época da construção uma vazão baixa para o P03 (1.8 m<sup>3</sup>/h) e uma vazão razoável para o P04 (3 m<sup>3</sup>/h), referente ao aquífero fissural captado. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 25 a 700 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 65 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados as rochas do embasamento cristalino. É possível observar a ocorrência de zonas anômalas resistivas com presença de descontinuidades subverticais na seção, mais especificamente entre as posições 140 e 210 metros. Do ponto de vista hidrogeológico/estrutural as feições observadas na posição 165 (local do P04) é bem interessante ao comparado com o local onde o poço P03 foi construído (posição 100 metros).

Figura 34 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 05 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar as indicações dos poços P03 e P04 na seção final invertida



Fonte: Autor.

#### 4.2.3.1.2 Área Alvo II

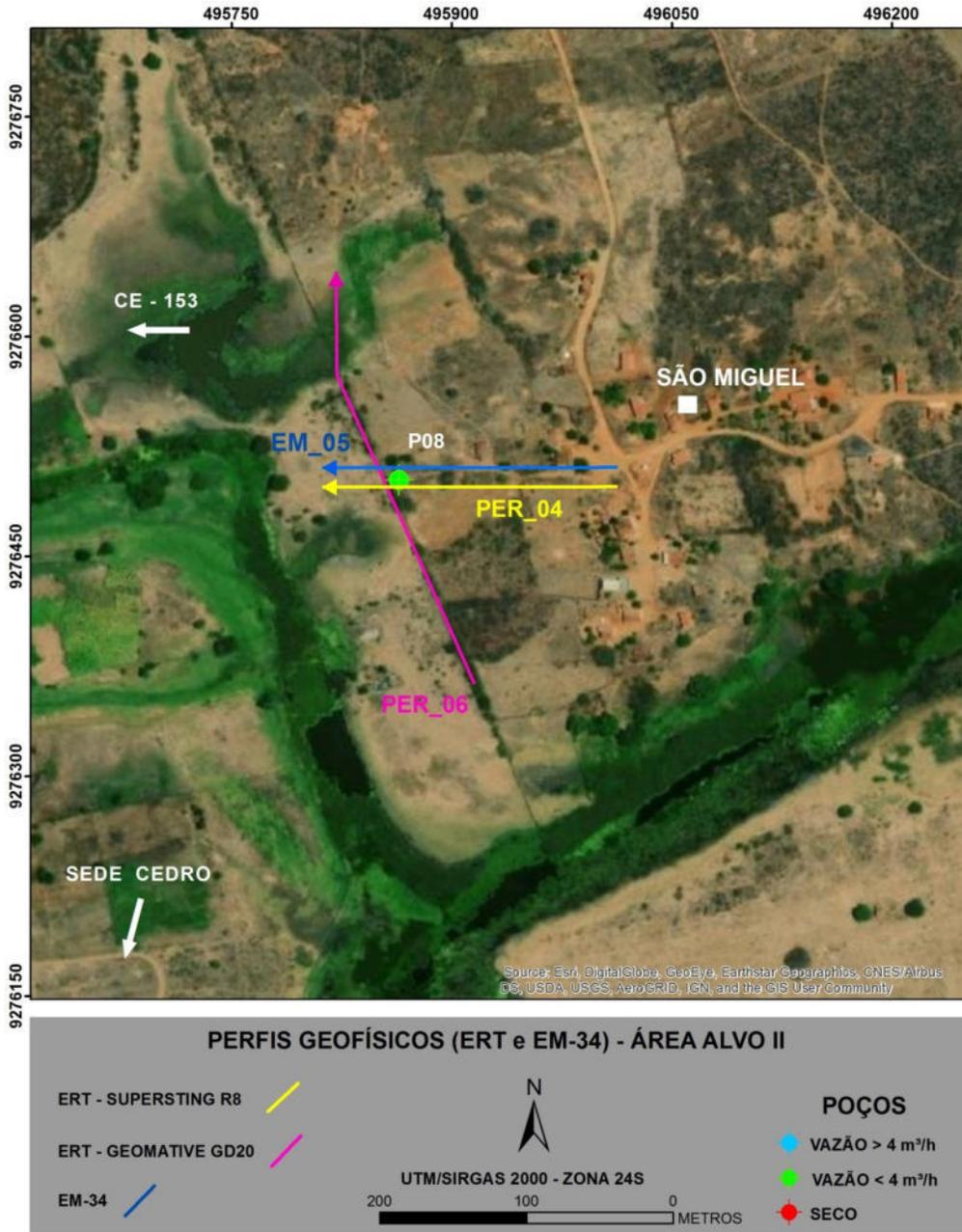
A seguir serão apresentados os resultados do processamento (modelagens e inversões) para as respectivas seções de resistividade (ERT), com suas principais características geoeletricas na Área Alvo II (Figura 35). Primeiramente será apresentado o perfil de tomografia realizado com o equipamento Supersting R8 e posteriormente o perfil com o Geomative GD20 (figuras 36 e 37).

O perfil de resistividade P04 (Figura 36) foi realizado com sentido de leste para oeste cruzando o poço cadastrado (P11) de uso público. O poço apresentou na época da construção uma vazão razoável (3 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado muito bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A questão foi a salinidade muito elevada do mesmo, praticamente comprometendo sua utilização pela comunidade. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 12 a 485 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 50 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas praticamente ao longo de todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados as rochas do embasamento cristalino.

Por falta de espaço físico e presença de área alagada no final do perfil, a seção teve que ser posicionada desta forma, comprometendo um pouco a parametrização com o poço P11. De modo geral não é possível identificar feições associadas ao mesmo, ficando apenas o elevado teor de sais encontrado no poço podendo ser justificado pela baixa resistividade na escala total da seção (valor máximo de 485 ohm.m).

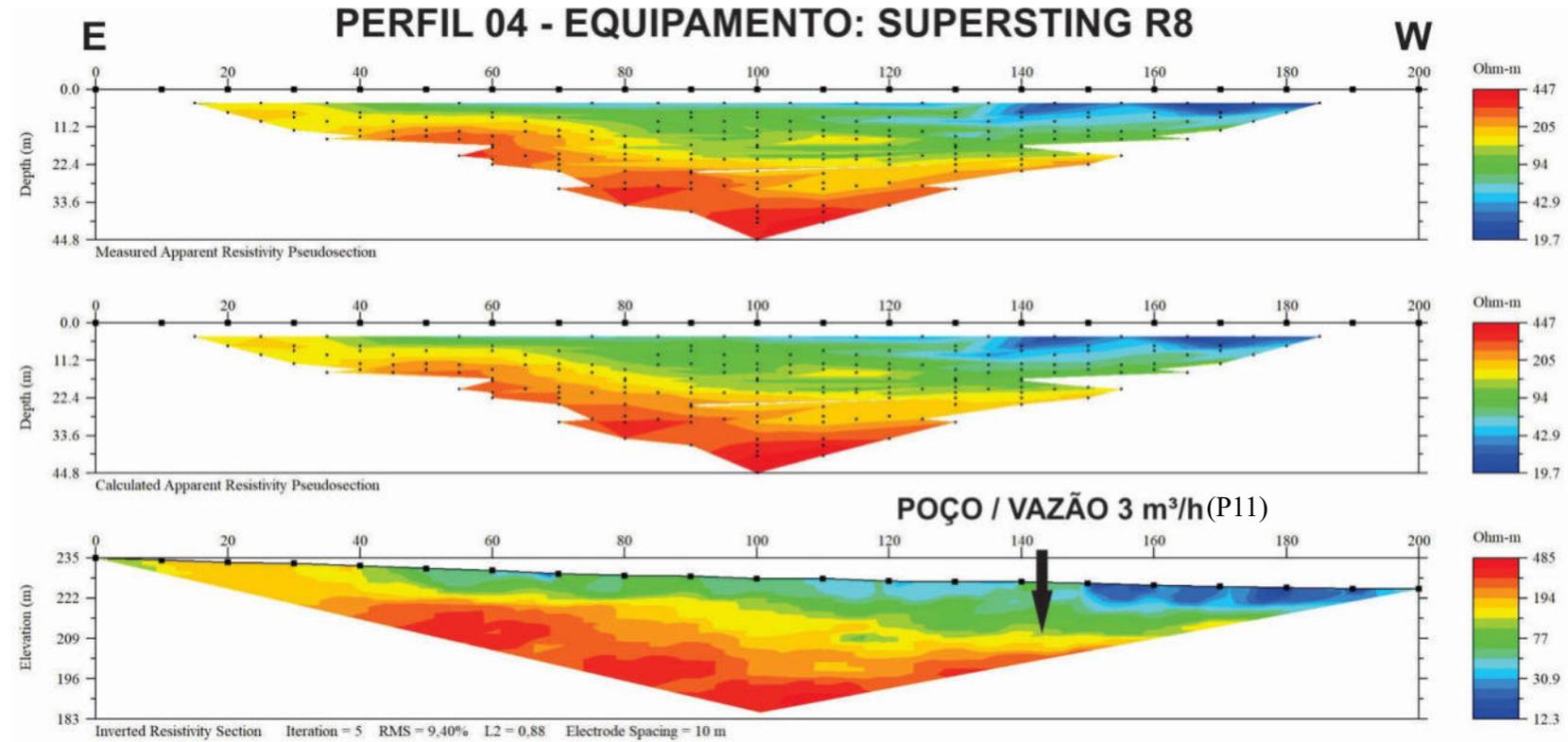
O perfil de resistividade P06 (Figura 37) foi realizado com sentido de sudeste para norte-noroeste cruzando o poço cadastrado (P11) de uso público, mesmo descrito anteriormente. A seção de resistividade apresentou variações nos valores de 25 a 5193 ohm.m e investigou até uma profundidade aproximada de 65 metros. As coberturas argilosas superficiais rasas ficaram bem marcadas ao longo de quase todo o perfil (tons em azul) e posteriormente temos a passagem para estratos mais resistivos (tonalidades amarelo/avermelhadas) associados às rochas do embasamento cristalino. É possível observar a presença de uma zona anômala resistiva na seção, mais especificamente na posição entre 110 a 145 metros. Do ponto de vista hidrogeológico/estrutural esta zona observada, a princípio, não evidencia a presença de descontinuidades e/ou feições. Com relação à elevada salinidade do P11 fica difícil também estabelecer qualquer relação com a seção.

Figura 35 – Mapa com as posições dos perfis ERT e EM-34 na Área Alvo II (localidade São Miguel). Notar a localização do poço e o sentido dos perfis indicado pela seta no final dos mesmos



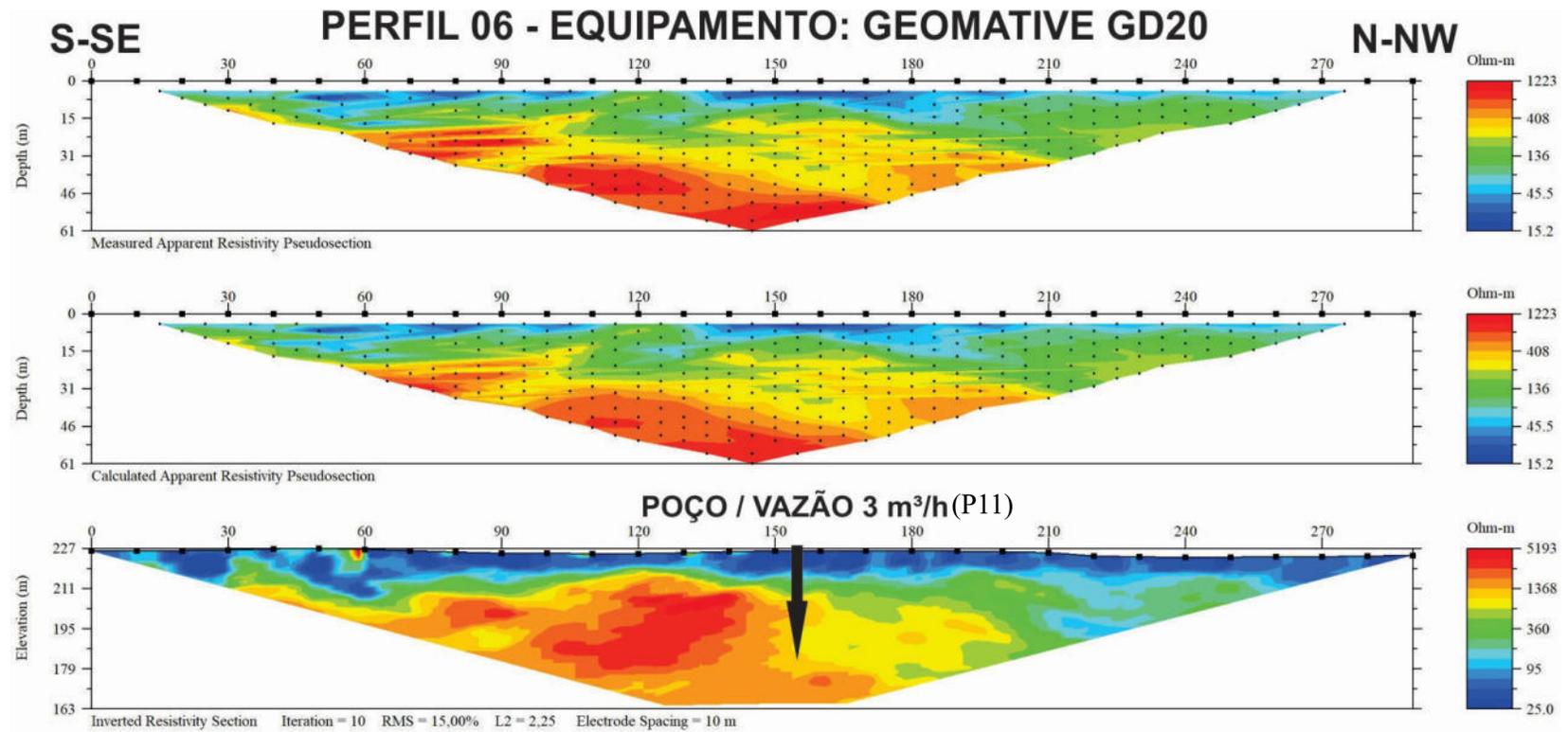
Fonte: Autor.

Figura 36 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 04 realizado na área alvo II (localidade São Miguel), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P11 na seção final invertida



Fonte: Autor.

Figura 37 – Seção de resistividade final após inversão/modelagem referente ao perfil 06 realizado na área alvo II (localidade São Miguel), com seus detalhes referentes a escala de profundidade, distância e resistividade. Destacar a indicação do poço P11 na seção final invertida



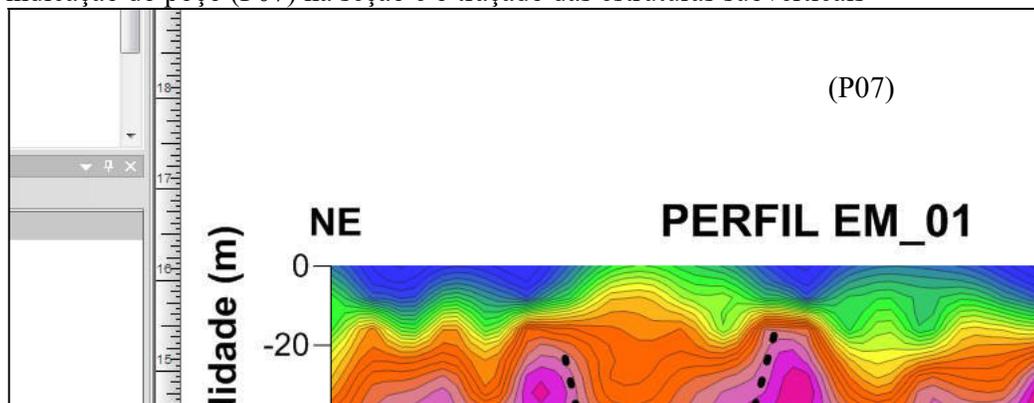
Fonte: Autor.

#### 4.2.3.2 Eletromagnético indutivo – EM34

##### 4.2.3.2.1 Área Alvo I

O perfil EM-34 01 (Figura 38) foi realizado com sentido de nordeste para sudoeste cruzando o poço cadastrado (P07) de uso público. O poço apresentou na época da construção uma boa vazão (10 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado muito bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de condutividade aparente apresentou variações nos valores de 0 a 120 mS/m. As coberturas superficiais ficaram bem marcadas ao longo de toda a seção, com destaque para as porções mais condutivas rasas e argilosas associadas a presença de riachos que ocorrem em maior destaque entre as posições 220 e 280 metros (tons em azul e lilás). Ao aprofundar as leituras observamos um ambiente geoeletrico resistivo (tons em rosa e vermelho), associado à ocorrência do embasamento cristalino. Este apresenta em alguns locais a presença de estruturas ou descontinuidades subverticais penetrativas (linha tracejada em cor preto) ao longo de todo o perfil (destaque para a posição 75 metros). Em uma destas feições estruturais bem marcadas, mais especificamente nas proximidades da posição 200 metros encontra-se localizado o referido poço acima citado.

Figura 38 – Seção referente ao perfil 01 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de nordeste para sudoeste. Destaque para os detalhes da profundidade teórica alcançada, distância e condutividade aparente. Observar a indicação do poço (P07) na seção e o traçado das estruturas subverticais

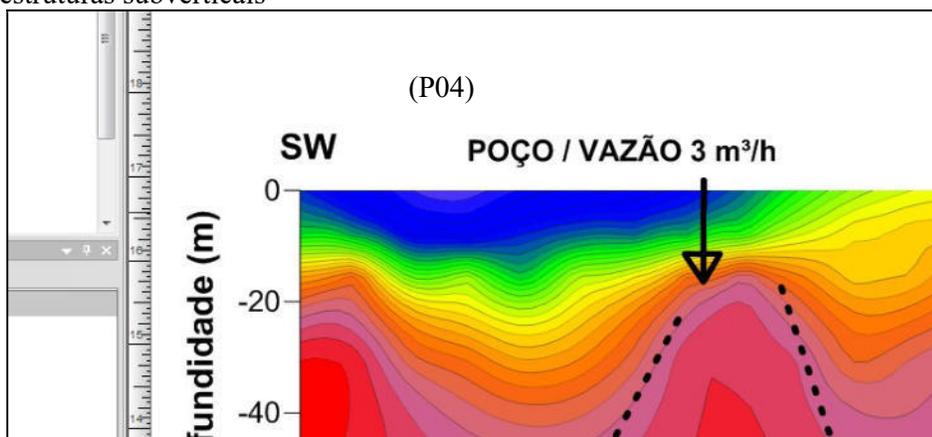


Fonte: Autor.

O perfil EM-34 02 (Figura 39) foi realizado com sentido de sudoeste para nordeste cruzando o poço cadastrado (P04) de uso público. O poço apresentou na época da construção uma vazão razoável (3.000 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de condutividade aparente apresentou

variações nos valores de 0 a 100 mS/m. Novamente temos a presença das coberturas superficiais condutivas bem marcadas na seção (tons em azul), assim como a ocorrência do embasamento cristalino resistivo (tons em laranja/rosa e vermelhos). Importante destacar a presença de uma descontinuidade subvertical bem evidente na posição entre 140 a 160 metros (tracejado em cor preto). No local do poço citado acima observamos uma região resistiva encaixada entre 2 (duas) discretas descontinuidades, sendo a feição da posição 45 metros com caráter um pouco mais penetrativa em relação a feição da posição 100 metros.

Figura 39 – Seção referente ao perfil 02 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de sudoeste para nordeste. Destaque para os detalhes da profundidade teórica alcançada, distância e condutividade aparente. Observar a indicação do poço (P04) na seção e o traçado das estruturas subverticais

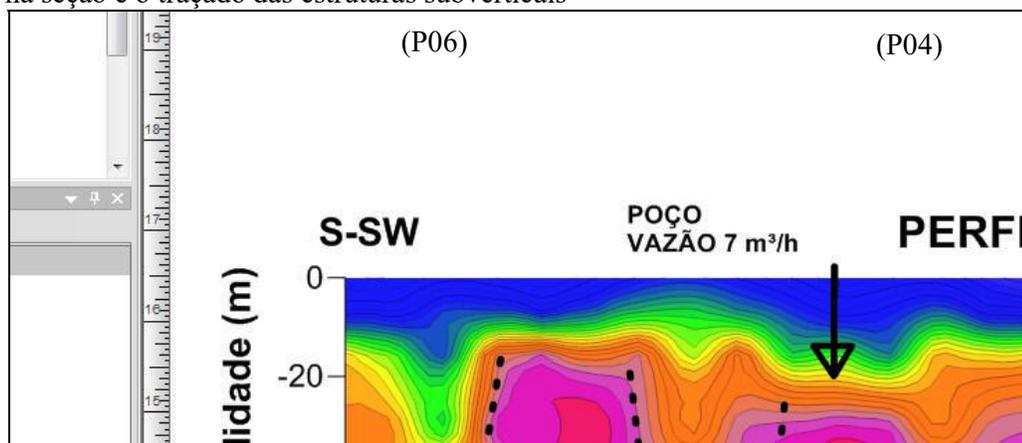


Fonte: Autor.

O perfil EM-34 03 (Figura 40) foi realizado com sentido de sul-sudoeste para norte-nordeste cruzando os poços cadastrados (P04 e P06) de uso público. Estes 2 (dois) poços apresentaram na época da construção, vazões de razoável a boa (3.000 m<sup>3</sup>/h e 7.000 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado uma situação de sucesso para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. A seção de condutividade aparente apresentou variações nos valores de 0 a 80 mS/m. Novamente temos a presença das coberturas superficiais condutivas bem marcadas na seção (tons em azul), assim como a ocorrência do embasamento cristalino resistivo (tons em vermelho/rosa/laranja). Nesta seção podemos observar a presença de algumas descontinuidades/feições subverticais que se destacam (encaixadas no tracejado em cor preto): **i)** A primeira feição ocorre logo no início do perfil (posição de 0 a 20 metros) sendo a mais penetrativa entre elas. **ii)** Outras 2 (duas) descontinuidades ocorrem nas posições 70 metros e 225 metros respectivamente. Importante observar que os poços acima citados

estão posicionados entre estas 2 (duas) feições, numa região pouco mais resistiva. O P06, por exemplo, foi locado bem ao lado da segunda descontinuidade, e pela sua boa vazão, parece sofrer influência dessa região fraturada bem próxima.

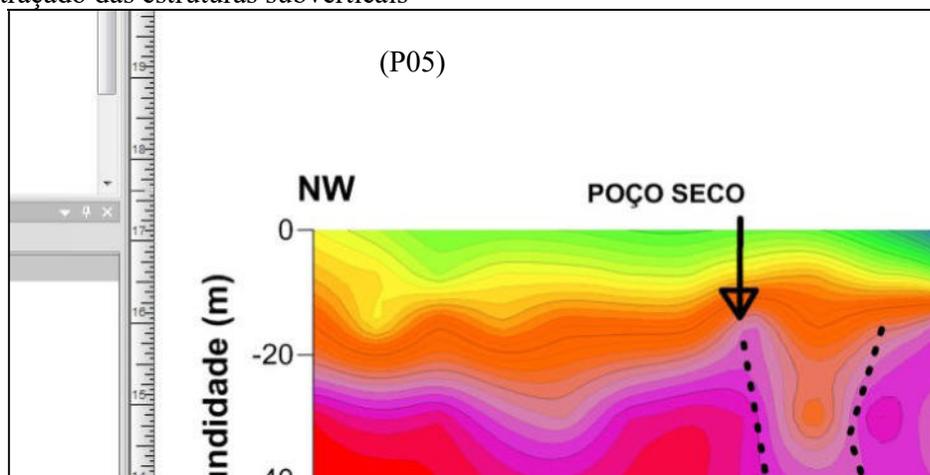
Figura 40 – Seção referente ao perfil 03 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo), sentido de sul-sudoeste para norte-nordeste. Destaque para os detalhes da profundidade teórica alcançada, distância e condutividade aparente. Observar as indicações dos poços (P04: vazão 3 m<sup>3</sup>/h e P06: vazão 7 m<sup>3</sup>/h) na seção e o traçado das estruturas subverticais



Fonte: Autor.

O perfil EM-34 04 (Figura 41) foi realizado com sentido de noroeste para sudeste cruzando o poço cadastrado (P10) de uso público. Este poço foi considerado como “seco” no ato da sua construção. A seção de condutividade aparente apresentou variações nos valores de 0 a 120 mS/m. No início, assim como nos demais perfis, temos a presença das coberturas superficiais condutivas bem marcadas na seção (tons em azul e lilás), assim como a ocorrência do embasamento cristalino resistivo (tons em rosa avermelhados). Nesta seção podemos observar uma discreta região com possíveis feições subverticais (da posição 75 a 180 metros) que poderia representar algum destaque do ponto de vista hidrogeológico/estrutural (tracejado em cor preto). O local onde o poço foi posicionado encontra-se um pouco antes desse intervalo referido acima, ficando na posição aproximada de 65 metros. Mesmo estando bem próximo zona fraturada, isso poderia justificar o seu insucesso na perfuração, sendo considerado seco. Outra explicação para este fato seria a possibilidade do fraturamento vizinho ao poço não conter água, sendo esta a mais plausível para tal situação.

Figura 41 – Seção referente ao perfil 04 de EM-34 realizado na área alvo I (localidade Angico/Lagedo, sentido de noroeste para sudeste. Destaque para os detalhes da profundidade teórica alcançada, distância e condutividade aparente. Observar a indicação do poço (P10, considerado poço seco) na seção e o traçado das estruturas subverticais



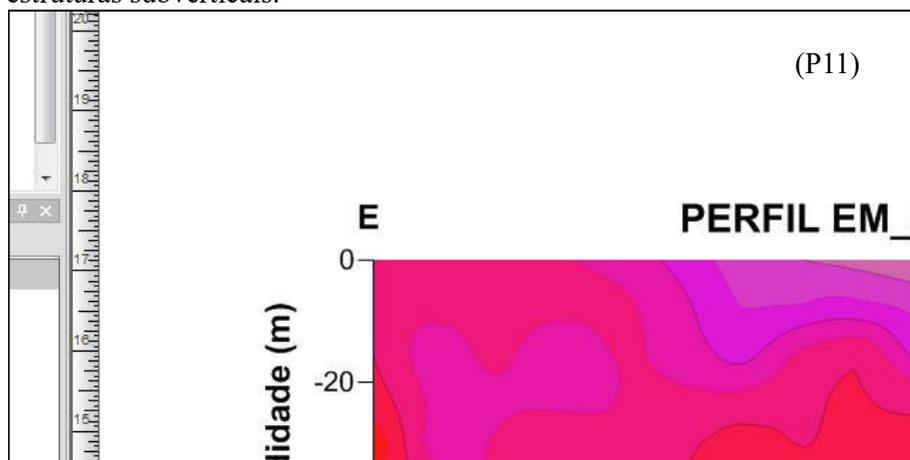
Fonte: Autor.

#### 4.2.3.2.2 Área Alvo II

Já na área alvo II foi realizado 1 (um) perfil de condutividade aparente (EM-34). Segue abaixo a seções de condutividade com suas principais observações (Figura 28):

O perfil EM-34 05 (Figura 42) foi realizado com sentido de leste para oeste cruzando o poço cadastrado (P11) de uso público. O poço apresentou na época da construção uma vazão razoável (3.000 m<sup>3</sup>/h), sendo considerado bom para os padrões da região, sobretudo pelo aquífero fissural captado. Em contrapartida, o poço apresentou água com níveis elevados de teores de sais, comprometendo seu uso na comunidade local. A seção de condutividade aparente apresentou variações nos valores de 0 a 410 mS/m. No geral a seção é composta por material resistivo condizente com as rochas do embasamento cristalino (tons em rosa/vermelho). O que se destaca nesta seção é a faixa de descontinuidade subvertical que ocorre entre a posição 110 e 150 metros (região encaixada no traçado de cor preto). Esta feição apresenta caráter penetrativo e do ponto de vista hidrogeológico/estrutural é bastante promissora, exceto pelo fato da questão dos elevados valores anômalos de condutividade (>400 mS/m) comprometendo a qualidade da água. O poço foi posicionado nesta estrutura (posição 140 metros) justificando sua vazão razoável/boa. Por fim a questão da salinização da água fica muito evidente na anomalia condutiva observada na seção.

Figura 42 – Seção referente ao perfil 05 de EM-34 realizado na área alvo II (localidade São Miguel), sentido de leste para oeste. Destaque para os detalhes da profundidade teórica alcançada, distância e condutividade aparente. Observar a indicação do poço (P11, considerado com razoável vazão, mas com elevados níveis de salinização) na seção e o traçado das estruturas subverticais.



Fonte: Autor.

### 4.3 Comentários acerca da integração e aplicabilidade dos métodos geofísicos

Conforme discutido e construído ao longo do trabalho, atualmente um dos principais problemas enfrentados por gestores e responsáveis pelo abastecimento hídrico de vários municípios cearenses, sobretudo aqueles municípios situados em regiões semiáridas e com baixas precipitações, é o baixo índice de acerto na construção de poços tubulares. Problemas de vazões mínimas que não atendem à demanda, problemas de qualidade da água seja por salinização ou por outros motivos e principalmente o elevado número de perfurações de poços considerados secos.

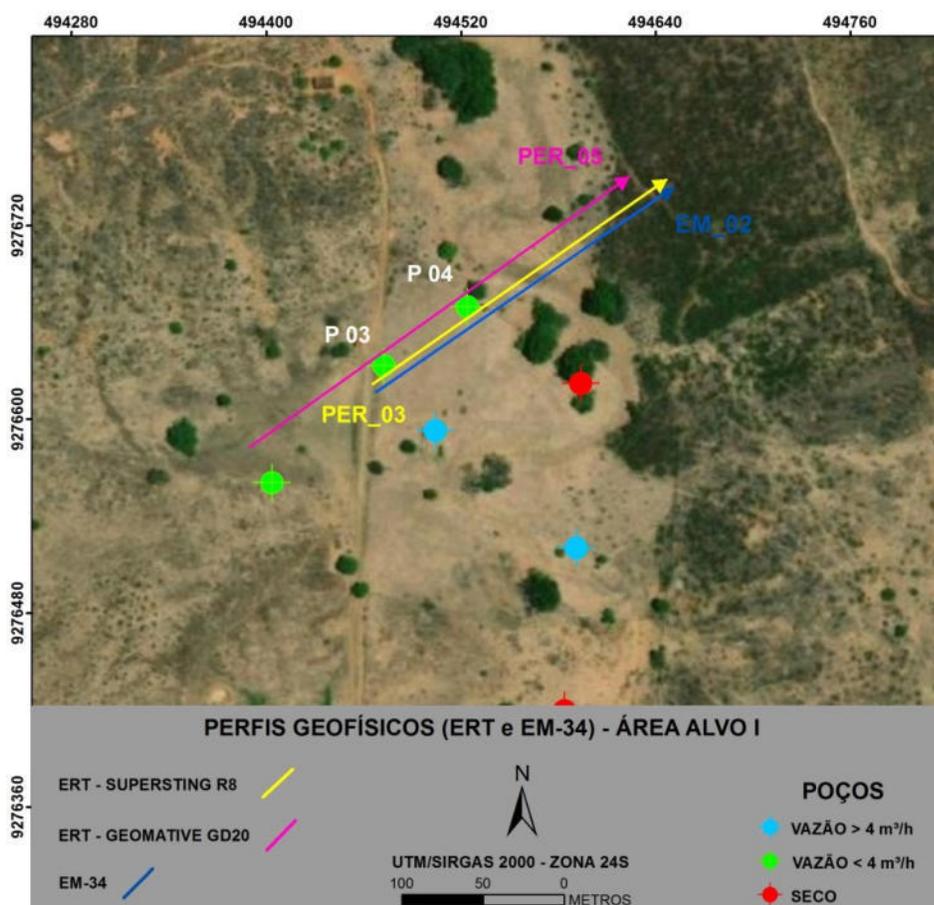
Diante deste fato, se tornou importante, dentro do escopo desse projeto de pesquisa exemplificar como a integração de métodos geofísicos pode mitigar situações em campo que possam minimizar estes problemas, baseando-se principalmente na utilização de novas tecnologias e, sobretudo na integração entre 2 (duas) ou mais ferramentas de pesquisa como forma de complementar alguma lacuna presente.

O fato é que qualquer método geofísico está susceptível a limitações e ambiguidades nos seus resultados. Ao acrescentarmos um segundo parâmetro físico na equação de análise, estamos de fato diminuindo significativamente essa ambiguidade e ajudando, com mais informações em mãos, na obtenção de um resultado mais satisfatório.

Em se tratando especificamente dos métodos trabalhados durante essa pesquisa notou-

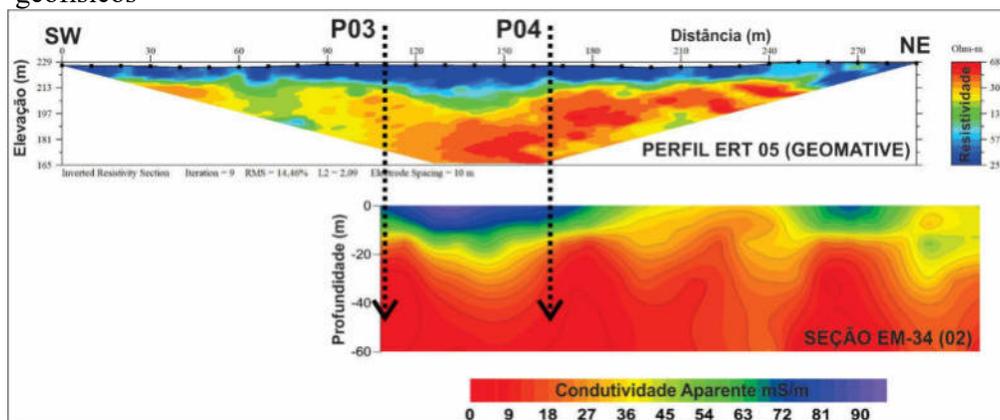
se grande similaridade nos resultados, ou seja, grande facilidade de interpretação conjunta, haja vista que resistividade e condutividade, os dois parâmetros físicos, são extremamente correlacionáveis e inversamente proporcionais. Tal situação apresentada na Figura 43, onde é demonstrado a posição do perfil PER05 obtido com o equipamento GD20 e a seção EM34 - 02. Nessa situação, em que temos dois perfis adquiridos no mesmo local, com a mesma direção, é possível observar feições muito similares nos resultados, tais como a profundidade da rocha sã e cobertura sedimentar (Figura 44). Vale destacar a faixa entre os poços P03 e P04 onde até mesmo um aprofundamento do embasamento cristalino é captado exatamente com a mesma simetria pelos dois métodos.

Figura 43 – Mapa de localização dos perfis ERT PER05 EM-34 -02 cruzando os poços P03 e P04 (vazões 1.8 m<sup>3</sup>/h e 3 m<sup>3</sup>/h respectivamente) na área de estudo



Fonte: Autor.

Figura 44 – Integração entre os perfis de ERT e EM-34 (em mesma escala horizontal) demonstrando a similaridade de resultados entre os dois métodos geofísicos



Fonte: Autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos trabalhos realizados foi possível caracterizar o estado dos poços no semiárido cearense, utilizando dados do SIAGAS/CPRM e considerando 120 municípios onde predominam condições hidrogeológicas de contexto fissural/cristalino, situação de 70% do semiárido cearense. A profundidade média dos poços do grupo de análise foi de 70m, onde 18% foram improdutivos e 34% tiveram vazões inferiores a 1,5m<sup>3</sup>/h. Apenas 29% desse grupo amostral tiveram vazões superiores a 3m<sup>3</sup>/h. Em relação ao Município de Cedro, alvo da presente pesquisa, 41% dos poços amostrados foram totalmente improdutivos e apenas 18% dos poços tiveram vazões superiores a 3m<sup>3</sup>/h.

Com os levantamentos em campo realizados em local com poços com vazões diversas (alta, regular e baixa) e poços improdutivos, foi possível definir parâmetros básicos para aquisição de dados e escolha dos locais de construção de poços tubulares nesse tipo de cenário, onde predominam regiões de baixo potencial hidrogeológico. A sequência de trabalho sugerida envolve tratamento preliminar de imagens de sensores orbitais ou dados levantados com drone para determinação de estruturas alvo visíveis a olho nu, seguindo-se por um reconhecimento geológico de campo e aquisições geofísicas integradas para determinação do local de construção do poço tubular.

Os métodos geofísicos empregados foram eletrorresistividade, eletromagnético indutivo e polarização induzida. O método eletromagnético indutivo mostrou-se como um excelente método para seleção preliminar de áreas alvo com estruturas potenciais para exploração de água subterrânea e o método eletroresistividade como um método mais robusto

para determinação final do ponto exato de construção. Já a polarização induzida pode ser utilizada como uma alternativa ao eletromagnético em estudos mais profundos para avaliação preliminar de zonas mais propensas a possuir água salinizada, contudo, trata-se de um método mais demorado, trabalhoso e sensível. A utilização do IP para esse tipo de cenário deve ser bem pensada e planejada, pois pode refletir em um aumento significativo dos custos envolvidos e tempo de aquisição.

Os poços de maior vazão encontrados nas áreas alvo foram exatamente aqueles em que a análise estrutural mostrou uma estrutura do tipo riacho/fenda visível no MDT oriundo do levantamento com drone, a qual também foi destacada nos dados geofísicos, tanto eletromagnético quanto eletrorresistividade.

Os poços de vazão intermediária a baixa margearam as estruturas mapeadas ou apenas tiveram condições de interceptá-las a grandes profundidades, superiores a 70m, e os poços improdutivos não interceptaram nenhuma estrutura visível na análise estrutural ou nos dados geofísicos, sendo assim, mal posicionados durante a escolha do local para sua construção.

Além disso, com a utilização dos métodos geofísicos, demonstrou-se que é possível, desde que bem parametrizado e embasado geologicamente, ter ideia de locais com elevado teor de sais na água, mesmo anteriormente à construção dos poços em si. Todavia, destaca-se que isso é apenas um indicador, que pode sofrer interferências em relação a outros aspectos do meio geológico, tais como tipo de rocha, teor de argila, presença de determinados minerais e outros.

Por fim, com base no volume de dados coletados, foram definidos quantitativos mínimos para cada método geofísico a ser aplicado na escolha do local ideal para construção de um poço tubular em um sistema fissural na região semiárida. A sugestão, para um alvo com 50ha, já delimitado por uma avaliação geológica e estrutural prévia, é de 1500m lineares de eletromagnético indutivo e 600m lineares de eletrorresistividade. Essa definição se baseia em profundidades de investigação de 70m, podendo variar em caso de profundidades maiores. Não é recomendável a realização de perfis geofísicos isolados, tendo em vista que o objetivo é o entendimento do padrão estrutural da área. Também é aconselhável que o espaçamento entre eletrodos e medidas não seja superior a 10m, para garantir um bom detalhamento do local. Essa definição pode nortear os cálculos de quantitativos em contratos públicos para esse segmento, por exemplo, que são muito comuns nessa região.

Ainda, é possível afirmar que o termo “locar poço”, tão amplamente utilizado e usado no nordeste brasileiro, notadamente no semiárido, inclusive por instituições financiadoras, órgãos públicos e privados, seja repensado e até normatizado em termos técnicos, práticos e

orçamentários, além dos respectivos órgãos de classe muitas vezes alheios às problemáticas que envolvem as águas subterrâneas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. **Províncias estruturais brasileiras**. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 7, 1977, Campina Grande. Atas do... Campina Grande, SBG, 1977, p. 363-391.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. **Earth Science Reviews**, v. 17, p. 1-29, 1981.
- ANGELIM, L. A. A. (Organizador). **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte**, Escala 1:500.000. Recife: Convênio de Cooperação e Apoio Técnico – Científico / CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 119 p., 2006.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos Geométricos Aplicados**. Universidade Estadual Paulista – UNESP/Campus de Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE/ Departamento de Geologia Aplicada – DGA. 2005.
- BRAGA, A. de P. G. & MENDONÇA, J. C. G. de S. Sequências Vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe – Folha SB.24-Z-A-I – Região sudeste do estado do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, SBG, 1984, v.5, p.2.512 - 2.526.
- CAMPOS, M.; BRAGA, A. P. G.; SOUSA, E. M.; SILVA, F. A. F.; FRANÇA, J. B. **Projeto Rio Jaguaribe**. Relatório Final. Geologia. Volume I. Recife: Convênio Departamento Nacional da Produção Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 293 p., 1976.
- CAVALCANTE, J. C. **Estratigrafia das folhas Mombaça e Catarina uma proposta**. CPRM/REFO, 1987, 15p. il. (Relatório Interno).
- COSTA, L. C.; LIMA, R. F.; PAIXÃO, G. C.; PANTOJA, L. D. M. Avaliação da Qualidade das Águas Subterrâneas em Poços do Estado do Ceará, Brasil. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 171-180. 2012. DOI: 10.5433/1679-367.2012v33n2p171.
- ECKHARDT, R. R.; DIEDRICH, V. L., FERREIRA, E. R.; STROHSCHOEN, E.; DEMAMAN, L. C. Mapeamento e Avaliação da Potabilidade Subterrânea do Município de Lajeado, RS, Brasil. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 58-80, 2008.
- FETTER, A. H.; VAN SCHMUS, W. R.; SANTOS, T. J. S.; NOGUEIRA NETO, J. A.; ARTHAUD M. H. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution of basement architecture of Ceará state NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent Atlântica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n.1, p.102-106, 2000.
- FERREIRA, C. A. & SANTOS, E. F. dos. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE**. Folha SB.24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco. Escala 1:500.000. Geologia e Metalogênese. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil, 2000.

FUNCEME. **Zoneamento Ecológico-Econômico das Áreas Susceptíveis à Desertificação do Estado do Ceará Núcleo II – Inhamuns**, Relatório Completo. 2015. Disponível em: [http://www.funceme.br/?page\\_id=2787](http://www.funceme.br/?page_id=2787). Acesso em: 30 nov. 2021.

FRIES, M.; MACHADO, M. Z.; SOARES, L. C. Aplicação do Método Eletromagnético Sistema EM-34 Integrado a Dados Estruturais e de Sensoriamento Remoto em um Estudo Hidrogeológico. **Anuário do Instituto de Geociência – UFRJ**. v. 42, n.2, p.126-136, 2019.

GARCES, Alexandro dos Santos. **Prospecção de Água Subterrânea por Eletroresistividade em Terrenos Cristalinos**. Fortaleza, 2019. 91 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará.

GOMES, J. R. C. & VASCONCELOS, A. M. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SW**. Folha SB.24-Y. Estado do Ceará, Pernambuco e Piauí. Escala 1:500.000. Geologia e Metalogênese. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil, 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2020**. Rio de Janeiro. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 08 dez. 2021.

LARSSON, I. **Ground Water in Hard Rocks**: Project 8.6 of the International Hydrological Programme UNESCO. 228 p., 1984. ISBN 92-3-101980-5.

LOKE, M. H. **Res2Dinv versão 3.54 for windows 98/Me/200/NT/XP. Rapid 2D Resistivity and IP Inversion using the least – square method**. Software Manual, 2004, 133p.

MABESSONE, J. M. História Geológica da Província Borborema (NE Brasil). **Revista de Geologia – UFC**, v. 15, p. 119-129, 2002.

MACDONALD, A. M.; BONSOR, H. C.; DOCHARTAIGH, B. É. O.; TAYLOR, R. G. **Quantitative Maps of Groundwater Resources in Africa**. Environmental Research Letters. 7.042009. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009>.

MAMEDE, I. C.; ELIS, V. R.; PRADO, R. L.; PORSANI, J. L. 2012. Métodos Geofísicos Integrados Para Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos da Microbacia Andes, Bebedouro em São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 42, n. 3, p. 597-614, 2012.

MARQUES, Rinaldo Moreira. **Utilização do VLF (Very Low Frequency) na Prospecção de Águas Subterrâneas nas Zonas de Rochas Cristalinas**. 1995. 62 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

NASCIMENTO, F. M. F.; CARVALHO, J. E.; PEIXINHO, F. C. **Sistema de Informações de Água Subterrânea - SIAGAS**. Histórico Desafios e Perspectivas. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/aguassubterraneas/article/view/23834>. Acesso em: 30 nov. 2021.

OLIVEIRA, J. F. & CAVALCANTE, J. C. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**: Mombaça, Folha SB.24-V-D-V, Estado do Ceará, Escala 1:100.000. Brasília:

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Convênio Superintendência Regional de Recife / Departamento Nacional da Produção Mineral, 1993.

OLIVO, A. M.; ISHIKI, H. M. Brasil Frente à Escassez de Água. **Colloquium Humanarum**, Presidente Prudente, v. 11, n.3, p.41-48, 2014. DOI: 10.5747/ch.2014.v11. n3.h170

ORELLANA, E. **Prospection Geoeletrica em Corriente Continua**. Madrid: Ed. Paraninfo, 1972, 523p.

OSAKO, L. S.; CASTRO, D. L.; FUCK, R. A.; DE CASTRO, N. A.; PITOMBEIRA, J. P. A. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 2, p. 309-329. 2011.

PRADO, F. S.; OLIVEIRA, A. A.; LEITE, E. A.; GOMES, F. E.; SILVA, F. P.; COLARES, J. S. **Projeto Lavras da Mangabeira. Relatório da etapa 1. Texto e Anexos**. Volume 1. Fortaleza: Ministério das Minas e Energia, Convênio Departamento Nacional da Produção Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1980.

PINÉO, Tercyo Rinaldo Gonçalves. **Integração de dados geofísicos, geológicos e de sensores remotos aplicados à prospecção de água subterrânea em meio fissural (DISTRITO DE JUÁ, IRAUÇUBA/CE)**. 2005. 126 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

PINÉO, T. R.G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. C. **Mapa Geológico do Estado do Ceará. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará**. Escala 1:500.000. Fortaleza: CPRM, 2020.

RUBIN, Y.; HUBBARD, S. S.; LUNT, I. A. Soil Moisture Content Estimation Using Ground Penetration Radar Data. **Journal of Hidrology**, v. 307, n. 9, p. 254-269, 2005.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. Oxford: John Wiley & Sons Inc., 1997, 796 pp.

SÁ, J. M.; BEZERRA, F. H. R.; MACEDO, M. H. de F.; PEREIRA, R. 1988. Middle Proterozoic Supracrustals and Brasiliano Orogeny in the Southeast Ceará State: a monocyclic evolution. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7, Belém, 1988. **Anais...** Belém, SBG, v. 1, p. 35-48, 1988.

SANTOS, E. J. DOS; COUTINHO, M. G. N.; COSTA, M. P. A.; RAMALHO, R. **A Região de Dobramentos Nordeste e a Bacia do Parnaíba, incluindo o Cráton de São Luís e as Bacias Marginais**. In: SCHOBENHAUS, C. (organizador), **Geologia do Brasil**. Brasília: DNPM, p. 131-189, 1984.

SANTOS, E. J. Soldagem metamórfica, suturamento plutônico e outros mecanismos de amalgamação de terrenos na Província Borborema. In: VII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos – SNET. **Anais...** Recife-PE, p. 107-110, 2001.

SIAGAS (Sistema de Informações de águas Subterrâneas) - CPRM. **Cadastro de poços, banco de dados do Ceará**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/>. Acesso em: 12 dez. 2021.

SILVA, F. J. A.; ARAÚJO, A. L.; SOUZA, R. O. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. **Revista Tecnologia Fortaleza**, v. 28, n. 2, p. 136-159, 2007.

SILVEIRA, R. N. C. M.; COSTA, R. N. T.; PEIXOTO, F; S.; SOUSA, H. G.; CAVALCANTE, I. N.; OLIVEIRA, R. M. Reservas Hídricas Subterrâneas e Contribuição à Gestão dos Recursos Hídricos em Aluviões no Semiárido. **Geociências**, v. 35, n. 4, p. 642-651, 2016.

SIQUEIRA, L. **Contribuição da Geologia à Pesquisa de Água Subterrânea no Cristalino**. 1ª. Ed. Recife: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 1963.

WARD, S.H. **Resistivity and Induced Polarization Methods in Geotechnical and Environmental Geophysics**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990.

## APÊNDICE A – ROTEIRO SIMPLIFICADO DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS

### Etapa 1 – Preliminar

- 1.1. Realizar levantamento das informações geológicas da área;
- 1.2. Levantar imagens aéreas ou orbitais do local e traçar estruturas geológicas principais;
- 1.3. Definir *trend* principal das estruturas do local;
- 1.4. Se não houver imagens de boa qualidade no local, realizar levantamento aéreo com drone;
- 1.5. Levantar cadastro de poços existentes no local e identificar correlação com as estruturas existentes;
- 1.6. Definir as áreas alvo para levantamento dos dados.

### Etapa 2 – Campo

- 2.1. Realizar levantamentos geofísicos nas áreas alvo, sendo no mínimo para cada alvo, considerando no mínimo:

Área (ha)	Quantitativo EM (m)	Quantitativo RES (m)
50	1500	600
100	2500	900
500	4000	1800
1000	7000	3600

Quantitativos mínimos em metros lineares.

Ou seja, para uma área de 50 hectares:

- 2.1.1. 600 metros de eletrorresistividade, técnica tomografia elétrica (ERT), espaçamento máximo de 10 metros, arranjo dipolo-dipolo em locais com boa resistência de contato, arranjo wenner-schlumberger em locais com resistência de contato ruim, avaliar em campo.
- 2.1.2. 1.500 metros de eletromagnético indutivo, técnica caminhamento com avanço lateral, espaçamento máximo de 20 metros.
- 2.1.3. Se o local possuir cobertura sedimentar relevante, realizar eletroresistividade, técnica sondagem elétrica vertical, 2 unidades, abertura AB máxima suficiente para definição da profundidade da rocha sã.

Observações:

- O método eletromagnético indutivo deverá ser realizado imediatamente sobreposto aos

perfis de eletrorresistividade.

- O quantitativo proposto deverá ser dividido em dois perfis ortogonais entre si.
- A direção dos perfis deverá ser definida pela análise estrutural da área.
- O quantitativo proposto é suficiente para escolha de locais para poços de até 100 metros de profundidade, para profundidades maiores o tamanho de cada perfil individual deverá ser maior.

A profundidade de investigação do método eletrorresistividade, arranjo dipolo-dipolo, é de 25% do tamanho do perfil no máximo.

### **Etapa 3 – Análise dos dados**

3.1. Todos os dados geofísicos deverão passar por inversão geofísica em software apropriado. A inversão por mínimos quadrados ou suavização são aconselháveis. Utilizar fator de realce vertical.

3.2. Os locais a serem designados deverão atender aos seguintes critérios:

- Apresentar estrutura visível na seção modelada de eletroresistividade;
- Apresentar estrutura visível na seção do método eletromagnético;
- Estar em formação geológica favorável;
- Estar preferencialmente em estrutural geológica mapeável nas imagens aéreas ou orbitais

Observações: Os valores de resistividade ou condutividade variam em cada ambiente geológico diferentemente. Os valores de condutividade referentes a água salobra na área teste foram superiores a 200 mS/m e foram, em média, 3 vezes maiores do que os valores encontrados nos outros levantamentos realizados na área.