

Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA E
ESTRUTURAL DE ÁREA CÁRSTICA NA
CIDADE DE SETE LAGOAS – MG COMO
SUBSÍDIO PARA ESTUDO GEOTÉCNICO**

NUGEO

AUTOR: DÉBORA VASCONCELOS DE OLIVEIRA

**ORIENTADOR: Prof. Luís de Almeida Prado Bacellar
(UFOP)**

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - JUNHO DE 2018

O482c Oliveira, Débora Vasconcelos.
Caracterização geofísica e estrutural de área cárstica na cidade de Sete Lagoas, MG como subsídio para estudo geotécnico [manuscrito] / Débora Vasconcelos Oliveira. - 2018.
121f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Descontinuidades. 2. Rocha carbonática. 3. Métodos elétricos. 4. Levantamento azimutal. 5. Geologia estrutural. I. Bacellar, Luís de Almeida Prado. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.13

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA E ESTRUTURAL DE ÁREA CÁRSTICA NA CIDADE DE SETE LAGOAS - MG COMO SUBSÍDIO PARA ESTUDO GEOTÉCNICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

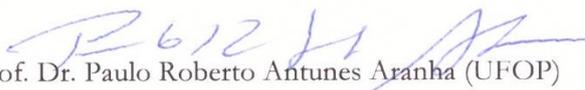
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 14 de junho de 2018 pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Luís Almeida Prado Bacellar (UFOP)



Membro: Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa (UFOP)



Membro: Prof. Dr. Paulo Roberto Antunes Aranha (UFOP)

“Não há vitórias sem lutas, muito menos conquistas sem batalhas. A vida é feita de oportunidades, e o mais importante talvez não seja saber somente aproveitá-las mas também criá-las...”

Leonardo Luís Gomes

Dedico esta dissertação aos meu amados pais, Hélia e Joaquim.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para seguir em frente nessa jornada e a Nossa Senhora por estar sempre ao meu lado.

A minha família que me apoiou o tempo inteiro e sempre torceram para o meu sucesso (meus pais Hélia e Joaquim, meus irmãos Dener e Denise e ao meu sobrinho Caio).

Ao meu orientador Luís Bacellar pela oportunidade de realizar essa pesquisa e pelos ensinamentos ao longo da mesma.

Ao prof. Paulo Aranha que muito me ajudou nesse projeto.

Aos companheiros de campo que me ajudaram demais, sem vocês não seria possível a realização desse trabalho.

Aos meus amigos por fazerem parte da minha história.

As minhas companheiras de casa e de vida Gafe, Eliza e Paula, foi ótimo poder conviver com vocês nesse período.

Ao geofísico da CPRM Marco Antônio Couto Junior por sua disponibilidade.

Ao proprietário da Fazenda Capão Grande por nos permitir realizar o projeto em sua propriedade.

A FAPEMIG pelo projeto e também por me conceder inicialmente uma bolsa de estudos.

A UFOP e NUGEO por me propiciarem esse estudo.

Resumo

O estudo das discontinuidades nos maciços rochosos é fundamental pois essas estruturas podem controlar a estabilidade do meio rochoso. No caso das rochas carbonáticas, a percolação de água nessas discontinuidades dissolve o carbonato originando canais e dutos subterrâneos. Essa trama cárstica subterrânea pode gerar acidentes, como abatimentos e colapsos, como já ocorreram na zona urbana de Sete Lagoas/MG. A geofísica de superfície pode ser empregada na caracterização deste tipo de terreno, pois é um método não invasivo, rápido e de custo relativamente baixo. Dentre os diversos métodos rotineiramente empregados destacam-se, pela facilidade de aquisição e processamento, os métodos geoeletricos, como a eletrorresistividade e os eletromagnéticos. No método de eletrorresistividade inclusive tem-se a técnica de levantamento azimutal que são teoricamente eficientes para a detecção de direções preferenciais de fluxo de água em fraturas subverticais em meios anisotrópicos. Com o intuito de averiguar a eficácia dessa técnica e caracterizar um meio estruturalmente complexo, escolheu-se uma área para pesquisa no município de Sete Lagoas/MG, 70km de Belo Horizonte, onde afloram rochas carbonáticas pouco metamorfizadas. Primeiramente foram traçados os lineamentos utilizando imagens de sensores remotos. Depois realizou-se em campo o levantamento estrutural (acamamento e fraturas) e foram executados os levantamentos geofísicos (eletrorresistividade e eletromagnéticos). Através dessa pesquisa foi possível identificar um anticlinal vazado na área com ocorrência de carstificação no plano do acamamento. A direção do eixo é N28W sendo esta direção predominante nos lineamentos em praticamente todas as escalas de imagens analisadas. Foram identificadas em campo 4 famílias de fraturas, N15E (F1), N85W (F2), N65E (F3) e N45W (F4). A família F2 apresenta maior frequência de medidas e a F4 apresenta as fraturas mais abertas, classificadas como cavernosas. Salienta-se que pelo fato da geologia da área ser complexa ficou difícil averiguar a funcionalidade dos levantamentos azimutais, mas de forma geral esta técnica pode ser útil como um complemento na identificação do padrão de fraturas com água e também pode ser usada em terrenos com pouco espaço superficial.

PALAVRAS CHAVE: Descontinuidades, Rocha carbonática, Métodos elétricos, Levantamento azimutal, Geologia estrutural, Lineamentos.

Abstract

Studying rock mass discontinuities is fundamental since such structures control the stability of rock mass. In the case of carbonate rocks, water flowing in these discontinuities dissolves carbonate giving rise to underground ducting. This underground karst structure is easy to cause geological problems such as subsidences and collapses, as noted in the urban area of Sete Lagoas/MG. Surface geophysics survey for karst landform characterization can be used, since it is a non-invasive, fast and relatively low-cost method. Among various methods routinely employed, the geoelectric methods, such as eletroresistivity and electromagnetic methods, stand out due to their ease of acquisition and processing. Among the eletroresistivity techniques there is the azimuthal survey that is theoretically efficient for detection of preferential groundwater flow in subvertical fractures of anisotropic medium. Aiming the effectiveness of this technique and to characterize a structurally complex environment, the selected research area was situated in Sete Lagoas/MG, 70 km from Belo Horizonte, where metacarbonate rocks crop out. Initially, the lineaments were drawn using images from remote sensors. Then structural survey (bedding and fractures) was carried out in field and geophysical surveys (eletroresistivity and electromagnetic) were performed. Through this research it was possible to identify an breached anticlinal in the area with occurrence of karsification along the bedding. The axis direction is N28W, that is the main lineament direction in practically all images scales. Four fracture sets, N15E (F1), N85W (F2), N65E (F3) and N45W (F4) were identified in the field. The F2 family presents a higher frequency and the F4 presents more open fractures that is classified as cavernous. It should be noted that because geology of the area is complex, it is difficult to ascertain the functionality of azimuthal surveys, but in general this technique can be useful as a complement in identification of fracture pattern and can also be used in terrains with little exposure surface.

KEY WORDS: Discontinuities, Carbonate rock, Electrical methods, Azimuth survey, Structural geology, Lineaments.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Localização e vias de acesso da área de estudo que está demarcada pelo círculo preto (Fonte: Base cartográfica do IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística/2014 e MMA – Ministério do meio ambiente/2008).	4
Figura 2.2: Interpretação de imagens geofísicas de Campo Magnético realizadas pela CPRM na área de abrangência do Projeto Sete Lagoas – Abaeté: A) Mapa com lineamentos e anomalias magnéticas interpretadas B) Diagrama de rosetas com as direções dos lineamentos magnéticos (Fonte: CPRM, 2010).	8
Figura 3.1 - Arranjos mais comumente utilizados em levantamentos de resistividade e seus fatores geométricos (Fonte: modificado Loke, 2000).	17
Figura 3.2: Fração da corrente penetrada abaixo da profundidade z em relação ao espaçamento dos eletrodos (Fonte: modificado Telford et al., 1990).	18
Figura 3.3: SEV utilizando o arranjo Schlumberger. Os eletrodos de corrente são representados pelas letras A e B e os eletrodos de potencial por M e N.	20
Figura 3.4: Configuração Dipolo-dipolo com o sentido do caminhamento. A e B são os eletrodos de corrente e M e N são os eletrodos de potencial (Fonte: Gandolfo, 2007). .	21
Figura 3.5: Posicionamento do sistema de fraturas e geometria dos eletrodos em um maciço hipotético. (Fonte: Taylor e Jansen, 1988).	23
Figura 3.6: Resultado teórico do levantamento azimutal de resistividade. (Fonte: Taylor e Jansen, 1988).	24
Figura 3.7: Levantamento azimutal com arranjo Wenner utilizando ângulo de rotação de 15° em que AB são os eletrodos de corrente e MN os eletrodos de potencial.	25
Figura 3.8: Posição dos eletrodos para medidas no arranjo quadrático (Fonte: modificado Lane et al., 1995).	26
Figura 3.9: Disposição dos eletrodos do arranjo dipolo-equatorial utilizando a técnica azimutal.	28
Figura 3.10: Gráfico mostrando a relação entre a condutividade indicada e a condutividade verdadeira para os levantamentos com EM-34 (Fonte: McNeill, 1980). 30	
Figura 4.1: Etapas desenvolvidas neste trabalho.	34
Figura 4.2: Representação esquemática da área de estudo com a localização dos levantamentos geofísicos.	38

Figura 4.3: Resistivímetros: A) Autoenergia modelo X5 e B) ABEM modelo SAS 1000 (Fonte: ABEM, 2010).....	39
Figura 4.4: Equipamento EM-34: A) bobinas e B) processador.....	40
Figura 4.5: Bobinas nas duas posições A) horizontal (Dipolo Vertical –DV) e B) vertical (Dipolo Horizontal – DH).....	41
Figura 4.6: Equipamento de GPR, com antena de 100MHz.....	43
Figura 5.1: Caracterização física da área de estudo: A) Imagem Landsat da área com localização das fotografias C, D, E e F em branco; B) Áreas delimitadas pela linha tracejada em amarelo são afloramentos de calcário, área delimitada pela linha tracejada azul indica a lagoa e em vermelho a localização do centro dos levantamentos azimutais; C) Fotografia da porção leste da área mostrando os afloramentos de calcário (área delimitada pela linha tracejada amarela); D) Fotografia da porção oeste da área mostrando os afloramentos de calcário (área delimitada pela linha tracejada amarela); E) Fotografia da porção sul da área mostrando a lagoa e porções que apresentam afloramento de calcário (realçadas pela linha tracejada amarela) e F) Fotografia realçando o calcário negro com fratura subvertical de direção N35W com abertura métrica ao centro.....	46
Figura 5.2: Lineamentos traçados na imagem de radar A) com a imagem ao fundo e B) sem a imagem.....	47
Figura 5.3: Análise dos lineamentos traçados a partir de imagem de radar: A) Diagrama de roseta com os azimutes dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada azimute e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.....	48
Figura 5.4: Lineamentos de drenagem.	49
Figura 5.5: Análise dos lineamentos de drenagens traçados a partir de fotos aéreas: A) Diagrama de roseta com as direções dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada direção e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.....	51
Figura 5.6: Lineamentos morfoestruturais.....	51
Figura 5.7: Análise dos lineamentos morfoestruturais traçados a partir de fotos aéreas: A) Diagrama de roseta com as direções dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada direção e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.....	52

Figura 5.8: Lineamentos traçados na imagem de satélite: A) ao fundo a imagem utilizada e B) sem a imagem.	54
Figura 5.9: Imagem Landsat ressaltando dois lineamentos identificados na figura 5.8 relacionados ao direcionamento das ramificações da dolina.	55
Figura 5.10: Análise dos lineamentos traçados a partir de imagem de satélite: A) Diagrama de roseta com as direções dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada direção e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.....	56
Figura 5.11: Fotos dos afloramentos de calcário presentes na área: A) Acamamento subhorizontalizado, B) Acamamento dobrado com lapiseira na zona de charneira, C) Dobra suave e D) Acamamento dobrado.....	57
Figura 5.12: Estereograma com as medidas de acamamentos mostrando um dobramento suave com eixo sub-horizontal na direção NW representado por uma estrela.	57
Figura 5.13: Diagrama de roseta com as medidas das fraturas.....	58
Figura 5.14: Fotos de afloramentos de calcário na área de estudo mostrando: A) fratura sub-vertical, B e C) fraturas sub-verticais com aberturas acima de 0,5m.	59
Figura 5.15: Histograma de representação das direções das famílias de fraturas e suas respectivas porcentagens.	60
Figura 5.16: Histograma mostrando as classes de abertura para as famílias de fraturas encontradas na área.	60
Figura 5.17: Orientação das linhas de levantamento geofísico.....	62
Figura 5.18: Representação esquemática da área de estudo com a localização da SEV.	63
Figura 5.19: Modelo geoeletrico para a SEV realizada.....	64
Figura 5.20: Representação esquemática da área de estudo com a localização das linhas de levantamento RES1, RES2 e RES3.	65
Figura 5.21: Perfis de eletrorresistividade de direção N-S: A) RES1, B) RES2 e C)RES3.	66
Figura 5.22: Mapas de eletrorresistividade gerados a partir dos caminhamentos de direção N-S.....	68
Figura 5.23: Representação esquemática da área de estudo com a localização das linhas de levantamento RES4, RES5 e RES6.	69

Figura 5.24: Perfis de eletrorresistividade de direção SW-NE: A)RES4, B)RES5 e C)RES6.....	70
Figura 5.25: Mapas de resistividade gerados a partir dos levantamentos de direção SW-NE até a profundidade 2,0m.	71
Figura 5.26: Mapas de resistividade gerados a partir dos levantamentos de direção SW-NE até a profundidade 5,5m.	72
Figura 5.27: Mapas de resistividade gerados a partir dos levantamentos de direção SW-NE até a profundidade 9,8m.	73
Figura 5.28: Representação esquemática da área de estudo com a localização do ponto central dos levantamentos azimutais.	74
Figura 5.29: Diagramas polares plotados a partir dos dados gerados nos levantamentos azimutais.	75
Figura 5.30: Diagramas polares mostrando o paralelismo entre os levantamentos com arranjos: A) Wenner AB=16m e Schlumberger e B) Dipolo-equatorial e Quadrático. ...	76
Figura 5.31: Gráficos dos levantamentos azimutais mostrando a relação dos valores de resistividade de cada arranjo.....	76
Figura 5.32: Representação esquemática da área de estudo com a localização das linhas de levantamentos ElMag1, ElMag2 e ElMag3.	77
Figura 5.33: Perfis de condutividade elétrica aparente A) Perfil Oeste e B) Perfil Leste.	79
Figura 5.34: Mapas de condutividade elétrica: A) Mapa com dipolo horizontal e profundidade teórica 7,5m; B) Mapa com dipolo horizontal e profundidade teórica 15m, C) Mapa com dipolo vertical e profundidade teórica 15m e D) Mapa com dipolo vertical e profundidade teórica de 30m.....	80
Figura 5.35: Representação esquemática da área de pesquisa com a disposição das linhas de levantamento realizadas com GPR.	81
Figura 5.36: Radargramas levantados com antena de 100MHz. A) Linha 1 (GPR1-100); B) Linha 2 (GPR2-100); C) Linha3 (GPR3-100) e; D) Linha 4 (GPR4-100).....	83
Figura 5.37: Radargramas levantados com antena de 200MHz. A) Linha 1 (GPR1-200); B) Linha 2 (GPR2-200); C) Linha3 (GPR3-200) e; D) Linha 4 (GPR4-200).....	84
Figura 5.38: Radargramas referentes a linha 5 levantados com antenas de A) 200MHz (GPR5-200) e B) 50MHz (GPR5-50).	85

Figura 5.39: Radargramas levantados com antena de 50MHz. A) Linha 6 (GPR6-50) e B) Linha 7 (GPR7-50).....	86
Figura 6.1: Bloco diagrama esquemático da dobra presente na área de estudo.....	88
Figura 6.2: Modelo esquemático do subsolo com base na interpretação da SEV.	90
Figura 6.3: Perfis de resistividade de direção N-S interpretados: A)RES1; B)RES2 e; C)RES3.....	91
Figura 6.4: Mapas gerados a partir dos levantamentos de direção N-S com as interpretações das direções das anomalias ressaltadas pelas linhas.	92
Figura 6.5: Perfis de resistividade direção SW-NE interpretados mostrando um possível duto sub-horizontal paralelo ao acamamento.	93
Figura 6.6: Mapa de eletrorresistividade na profundidade de 0,6m sobreposto a imagem de Landsat mostrando, nas áreas delimitadas por pontilhado, os locais onde afloram metacalcário.	94
Figura 6.7: Interpretação dos mapas de resistividade levantados com linhas de direção SW-NE. As linhas brancas ressaltam os lineamentos de resistividade.	96
Figura 6.8: Modelo esquemático dos mapas de resistividade em suas respectivas profundidades.....	97
Figura 6.9: Diagramas polares interpretados de acordo com a metodologia de Taylor e Fleming (1988).....	99
Figura 6.10: Interpretação dos mapas de condutividade elétrica obtida com o EM-34.	101
Figura 6.11: Sobreposição dos mapas de resistividade e a imagem de Landsat.....	103
Figura 6.12: Interpretação dos diagramas polares de levantamentos azimutais. Comparação das resistividades baixas com as famílias de fraturas representadas pelas linhas azuis, sendo que as linhas cheias representam as fraturas mais abertas. Em vermelho tem-se o procedimento de interpretação por Taylor e Fleming (1988).	105
Figura 6.13: Perfil de resistividade, RES5, com interpretação de anticlinal em linha pontilhada.	106

Lista de tabelas

Tabela 3.1: Classes de abertura segundo ISRM – International Society Rock Mechanic, (Fonte: ISRM, 1983).	16
Tabela 3.2: Resistividade e condutividade das rochas, solos e águas mais comuns (Fonte:modificado Loke, 2000).	19
Tabela 4.1: Espaçamento utilizado em cada arranjo.	37
Tabela 4.3: Relação entre distância das bobinas e profundidade teórica (Fonte: McNeill, 1980).	41
Tabela 5.1: Parâmetros das camadas do modelo invertido da SEV.	64
Tabela 6.1: Tabela contendo as principais informações dos levantamentos azimutais. .	98

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

- a – Espaçamento entre os eletrodos
- b – Distanciamento entre os eletrodos de corrente e os de potencial
- c - Velocidade da luz no vácuo
- CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
- CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- DH – Dipolo horizontal
- DV – Dipolo vertical
- FEM – Domínio da frequência
- GPR - *Ground Penetrating Radar*
- I – Corrente elétrica
- IGEO - Instituto Geotécnico
- ISRM - *International Society Rock Mechanic*
- K – Fator geométrico
- n – Fator de multiplicação
- SAEE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto
- SEV – Sondagem elétrica vertical
- SIAGAS – Sistema de informações de águas subterrâneas
- SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
- TEM – Domínio do tempo
- U – Velocidade de uma onda de radar
- V – Diferença de potencial
- z – Profundidade
- ρ_a – Resistividade aparente
- ρ_y – Resistividade transversal
- ρ_x – Resistividade longitudinal
- λ – Coeficiente de anisotropia
- μ_r – Permeabilidade magnética relativa
- ϵ_r – Permissividade dielétrica relativa

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 NATUREZA DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS	2
1.3 OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 2	4
2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO	4
2.2 GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL	5
2.2.1 Contexto geotectônico e estratigráfico.....	5
2.2.2 Estrutural	7
2.3 GEOMORFOLOGIA	10
2.4 SOLOS	11
2.5 CLIMA E VEGETAÇÃO	12
2.6 HIDROGRAFIA, HIDROGEOLOGIA E HIDROLOGIA.....	13
CAPÍTULO 3	15
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
3.1 GEOFÍSICA APLICADA	15
3.2 MÉTODO DE ELETORRESISTIVIDADE	16
3.2.1 Técnicas de levantamento.....	19
3.3 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO.....	28
3.4 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO - GPR.....	30

CAPÍTULO 4	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E AQUISIÇÃO DE DADOS PRÉVIOS.....	35
4.2 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS DA ÁREA E LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS.....	36
4.4 TRATAMENTO DOS DADOS	43
4.5 INTERPRETAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	44
 CAPÍTULO 5	 45
5 RESULTADOS.....	45
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO	45
5.2 ANÁLISE DOS SENSORES REMOTOS	46
5.2.1 Imagem radar (SRTM).....	47
5.2.2 Fotos aéreas	49
5.2.3 Imagem de satélite (<i>Landsat</i>).....	52
5.3 LEVANTAMENTO ESTRUTURAL DE CAMPO	56
5.3.1 Acamamentos.....	56
5.3.2 Fraturas.....	58
5.4 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO.....	61
5.4.1 Método de eletrorresistividade.....	63
5.4.2 Métodos eletromagnéticos	77
 CAPÍTULO 6	 87
6 DISCUSSÃO	87
 CAPÍTULO 7	 107
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	107

REFERÊNCIAS 110

ANEXOS..... i

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo das discontinuidades nos maciços rochosos mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam, de maneira muito forte, seu comportamento, especialmente em relação à deformabilidade, resistência e permeabilidade, podendo controlar toda sua estabilidade (Serra Junior e Ojima, 1998).

No caso das rochas carbonáticas, a percolação de água nessas discontinuidades dissolve o carbonato originando canais e condutos subterrâneos. Essa trama cárstica subterrânea pode proporcionar a formação de aquíferos que muitas vezes é a fonte principal de abastecimento de água nas regiões onde se encontram. Por outro lado ela também pode ocasionar desastres naturais como subsidência e colapso do terreno formando depressões fechadas chamadas dolinas (Oliveira, 1996).

No Brasil várias cidades, como Cajamar (SP), Sete Lagoas (MG), Almirante Tamandaré (PR), Colombo (PR), enfrentaram problemas relacionados às subsidências de solos provocadas por carstificação sendo o maior deles verificado em 1986 na cidade de Cajamar (SP) (Vestena, *et al.*, 2002).

Na cidade de Sete Lagoas (MG) foram registrados 17 colapsos e/ou subsidências a partir de 1988. Alguns estudos foram realizados na área urbana da cidade com o intuito de avaliar o risco geotécnico do terreno (Silva, 1988; CPRM, 2010; Galvão, 2015). Mas ainda faz-se necessário outros estudos para melhor caracterização do terreno principalmente nas áreas adjacentes ao centro urbano nos locais onde há ocorrências de dolinas.

Muitos são os métodos empregados para a caracterização dos terrenos e aquíferos cársticos, como aqueles baseados em dados obtidos em poços (e.g.: testes de aquíferos e

perfilagem geofísica), geofísica de superfície, traçadores, datação isotópica e até mesmo o monitoramento de hidrogramas e quimiogramas de fluxos hídricos superficiais (e.g. Pessoa, 1996; White, 2002; Genthner *et al.*, 2003; Bakalowicz, 2005; Pessoa, 2005).

O emprego da geofísica de superfície tem crescido, por ser um método não invasivo, rápido e de custo relativamente baixo, possibilitando obter informação espacializada de amplos trechos de áreas. Dentre os diversos métodos rotineiramente empregados destacam-se, pela facilidade de aquisição e processamento, os métodos geoeletricos, como a eletrorresistividade, e os eletromagnéticos.

No método de eletrorresistividade existem diversas técnicas de aquisição de campo, dentro das quais há uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos (Telford *et al.*, 1990).

Uma dessas técnicas é o levantamento azimutal de eletrorresistividade, ainda pouco difundida no Brasil. Segundo Taylor e Fleming (1988), este tipo de levantamento é teoricamente muito útil para detectar descontinuidades verticais.

1.2 NATUREZA DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS

Escolheu-se uma área dentro da fazenda Capão Grande na região do município de Sete Lagoas/MG para fazer os levantamentos. Haja vista que a área é suscetível a problemas geotécnicos devido à dissolução da rocha calcária nas descontinuidades que propiciam abatimentos do terreno. Inclusive a sul da área existe uma dolina de diâmetro aproximado de 100m, feição esta que indica processo de carstificação. Além disso como citado anteriormente no município existem registros históricos de abatimento de solo (Silva, 1988). Por isso faz-se necessário um melhor conhecimento sobre o terreno cárstico local principalmente em relação às descontinuidades que direcionam o fluxo de água nos aquíferos cársticos.

De forma geral, além do controle geotécnico de áreas cársticas o entendimento do comportamento das descontinuidades é essencial em várias outras situações, como na proteção de águas subterrâneas, no transporte de contaminantes, na disposição de rejeitos

e nas obras de barragens, de fundações, de escavações subterrâneas e de taludes (Wyllie e Mah, 2004).

A técnica de levantamento azimutal de eletrorresistividade é usada, entre outras aplicações, para medições *in situ* de anisotropia em maciços rochosos e para detectar direções preferenciais de sistema de fraturas com mergulho vertical a subvertical. Pode ainda ser usada para estimar a intensidade de fraturamento do maciço principalmente em áreas desprovidas de afloramentos e de informações de subsuperfície (Taylor, 1984). Tem também a vantagem de ser uma técnica que necessita de pouco espaço superficial para atingir grandes profundidades (especialmente o arranjo quadrático) além de ser fácil o processamento de dados (Habberjam, 1972).

1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo principal a caracterização preliminar de um meio cárstico, de forma a subsidiar uma gestão geotécnica e hidrogeológica mais eficiente. Para alcançar este objetivo serão feitas:

- Análise de lineamentos através de imagens de sensores remotos,
- análise estrutural de campo (fraturas e acamamento),
- análises de parâmetros físicos do terreno como resistividade e condutividade através de aquisições com os métodos de eletrorresistividade (caminhamento, SEV e azimutal) e eletromagnéticos (Indutivo e GPR).

Pretende-se também averiguar a eficácia dos levantamentos azimutais de eletrorresistividade na detecção de fraturas verticais hidraulicamente mais condutivas no maciço rochoso.

CAPÍTULO 2

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A cidade de Sete Lagoas situa-se na região central do estado de Minas Gerais e está a norte da região metropolitana de Belo Horizonte distando, aproximadamente, 70 km da capital do estado de Minas Gerais (Figura 2.1). O acesso pode ser feito pela rodovia BR-040 que liga a cidade do Rio de Janeiro ao Distrito Federal ou pela rodovia MG – 424 que passa pelos municípios Prudente de Moraes, Matozinhos, Pedro Leopoldo, Vespasiano e Belo Horizonte.

A área seleccionada para estudo, com 10.000 m² localiza-se na fazenda Capão Grande porção noroeste da cidade de Sete Lagoas e é delimitada pelas seguintes coordenadas: 571141/ 7847641, 571161/ 7847558, 571277/ 7847578, 571280/ 7847674 em projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), zona 23, datum SAD-69.

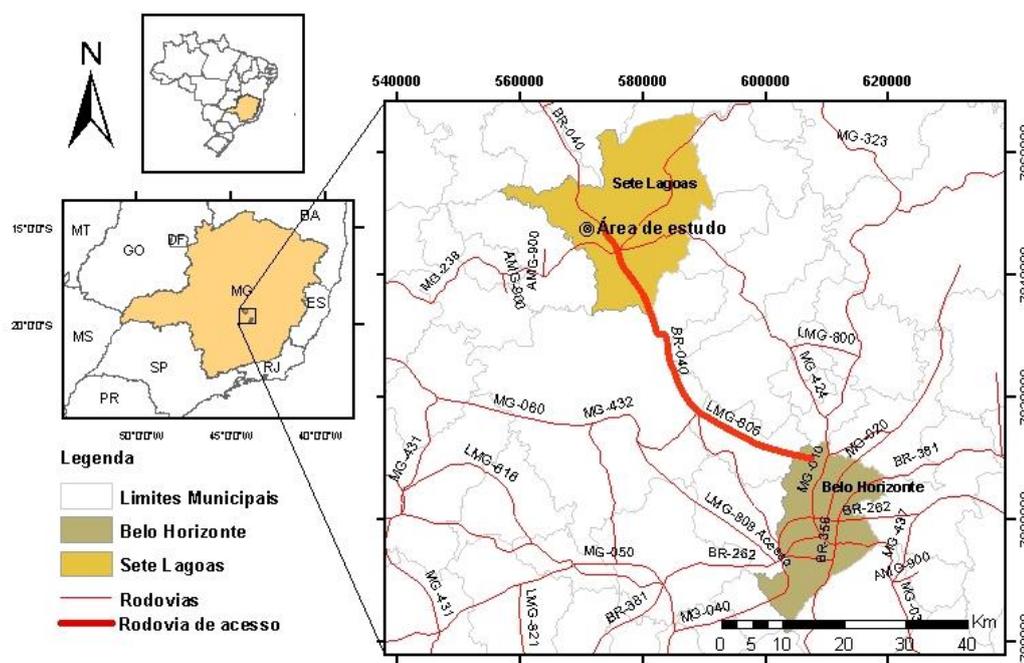


Figura 2.1 - Localização e vias de acesso da área de estudo que está demarcada pelo círculo preto (Fonte: Base cartográfica do IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística/2014 e MMA – Ministério do meio ambiente/2008).

2.2 GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

2.2.1 Contexto Geotectônico e estratigráfico

A região alvo deste projeto insere-se no extremo sul da Bacia do São Francisco (Pflug e Renger, 1973), caracterizada como a porção sul do Cráton do São Francisco (Alkmim e Martins-Neto, 2001). Tal bacia cobre uma área de, aproximadamente, 500.000 km² do Cráton sendo este definido como um núcleo estabilizado no final do Ciclo Transamazônico, margeado a oeste pela Faixa Brasília (Almeida, 1978) e a leste pela Faixa Araçuaí (Almeida, 1977).

A Bacia do São Francisco é composta pelas seguintes unidades litoestratigráficas maiores: o Supergrupo Espinhaço, de idade paleo/mesoproterozóica e unidades correlativas, o Supergrupo São Francisco, de idade neoproterozóica, o Grupo Santa Fé, de idade permo-carbonífera, além dos grupos Areado, Mata da Corda e Urucuaia, de idade cretácica (Alkmim e Martins-Neto, 2001).

Juntas, essas unidades marcam episódios de estiramento litosférico abortado, e um ciclo completo de quebra e aglutinação de um supercontinente. A Bacia do Espinhaço (1,73-1,50 Ga) recorda o estiramento litosférico abortado da massa continental São Francisco-Congo, que foi amalgamada durante a orogenia Transamazônica (2,2-2,0 Ga) (Trompette, 1994; Alkmim e Marshak, 1998 *apud* Martins-Neto e Alkmim, 2001). A Bacia Macaúbas-Salinas (950-700 Ma) compreende sucessões de *rift a drift* depositadas durante a quebra do supercontinente Rodínia e abertura do oceano Adamastor (Dalziel, 1997 *apud* Martins-Neto e Alkmim, 2001). A Bacia Bambuí (800-650 Ma) formou-se como consequência do encurtamento do Cinturão Brasília no flanco oeste do Cráton São Francisco durante o fechamento do Oceano Adamastor e amalgamento do supercontinente Gondwana (Martins-Neto e Alkmim, 2001).

Um maior foco será dado ao Grupo Bambuí, por ser a unidade presente na área de estudo. A megassequência Bambuí (800-650 Ma) foi depositada em uma bacia *foreland* relacionada ao fechamento do Oceano Adamastor-Brazilide e a construção do Orógeno Brasília. A evolução da Bacia Bambuí foi controlada principalmente pela tectônica,

embora efeitos eustáticos possam ter contribuído para seu preenchimento. Da base para o topo, a Bacia Bambuí apresenta as formações (Dardenne, 1978): Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias.

Folhelhos marinhos da Formação Sete Lagoas, potenciais rochas fontes de hidrocarbonetos (Martins-Neto e Alkmim, 2001), foram depositadas na porção central da bacia Bambuí. Depósitos distais consistem de rampas carbonáticas rasas de baixa energia dominada por uma sedimentação química-bioquímica representada pelos calcários, dolomitos, e calcários argilosos às vezes mostrando estruturas estromatolíticas (Castro 1997; Castro e Dardenne, 2000). Parte destes depósitos foi, eventualmente, retrabalhada em episódios de turbulência responsáveis pela geração e acumulação dos calcários detríticos, que estão subordinados nesta unidade (Dardenne e Walde, 1979). Segundo Magalhães *et al.* (1989), a rampa carbonática progrediu para oeste, cobrindo pelitos de águas profundas, produzindo o primeiro megaciclo transgressivo-progradacional, raso em direção ao topo, de Dardenne (1981). Cada um desses megaciclos representa o registro da geração de um maior espaço de acomodação (maiores taxas de subsidência devido à carga tectônica e sua resposta flexural) e subsequente preenchimento desse espaço por estoques de sedimentos existentes. Essa formação é dividida e caracterizada em dois membros: Pedro Leopoldo, na base, composto por calcários, dolomitos, e pelitos de granulometria fina e coloração branca; e Lagoa Santa, no topo, formado por calcários pretos de granulometria média (Ribeiro *et al.*, 2003). Os calcários encontrados na área de estudo pertencem a esta formação, membro Lagoa Santa.

O segundo megaciclo transgressivo-progradacional começa com os folhelhos, siltitos e calcários argilosos da Formação Serra de Santa Helena; acima estão calcários, calcarenitos, calcários oolíticos e siltitos (depositados em rampas de tempestade, Formação Lagoa do Jacaré) progradante (Dardenne, 1978; Dardenne, 1981). O último megaciclo consiste de folhelhos marinhos e siltitos na base da Formação Serra da Saudade, que está coberta por siltitos, arenitos, arcósios e conglomerados da Formação Três Marias, depositados em um sistema marinho raso dominado por tempestade, passando para ambientes aluviais no topo. (Chiavegatto, 1992; Chiavegatto e Dardenne., 1997).

2.2.2 Estrutural

A porção meridional da Bacia do São Francisco foi dividida em quatro compartimentos estruturais: o Oeste e o Leste, que se encontram deformados pela influência das faixas marginais e outros dois na porção central da bacia poupados de deformação (Alkmim *et al.*, 1989). A área desse estudo está inserida no compartimento estrutural leste.

Segundo Magalhães (1988), as rochas presentes na porção leste da bacia do São Francisco foram envolvidas num evento deformacional Brasileiro progressivo (900 – 500 Ma) dirigido de leste para oeste. Tal evento pode ser subdividido em duas fases superpostas. Na região de Sete Lagoas, Daniel e Teodoro (1992) descrevem estruturas que corroboram essa subdivisão proposta por Magalhães (1988).

Planos de acamamento e foliação com mergulhos subhorizontalizados, lineações com direção E-W e dobras com eixo N-S estariam relacionadas a primeira fase com uma tectônica tangencial de baixo ângulo e com sentido de movimento de E para W. As megadobras suaves conformariam a segunda fase num padrão do tipo domos e bacias que afetaram as estruturas da primeira fase.

A seguir são apresentados dados estruturais de pesquisas realizadas na região do município de Sete Lagoas.

Lineamentos

Dentre os diversos métodos geofísicos, a magnetometria tem-se mostrado uma ferramenta bastante eficiente no delineamento estrutural regional (Kearey *et al.*, 2009).

No projeto de mapeamento da região de Sete Lagoas Abaeté, Tuller *et al.* (2010) traçaram lineamentos a partir de imagens geofísicas de magnetometria, utilizando as imagens de Campo Total, Sinal Analítico e Derivada Vertical processadas a partir do Campo Total medido (Tuller *et al.*, 2010) (Figura 2.2 A).

A partir do mapa de lineamentos gerado neste projeto (Figura 2.2 A) observam-se três padrões regionais de lineamentos segundo as direções NW, NE e E-W, sendo este último menos frequente, mas expressivo por apresentar um lineamento muito próximo a área de estudo. No diagrama de rosetas (Figura 2.2 B) observa-se que a padrão N65W é predominante na região mapeada. Esse padrão é produzido por fraturas geralmente preenchidas por diques de diabásio e suas direções variam de N45W a N70W (Tuller *et al.*, 2010). O segundo padrão observado no diagrama de rosetas é o N70E, menos notável e no geral não apresenta intrusão de diques. O padrão E-W é pouco evidente nos mapas de Campo Total no entanto é melhor ressaltado nas imagens de Sinal Analítico. Nessas imagens apresentam-se como lineamentos de grande persistência (>100km) (Tuller *et al.*, 2010).

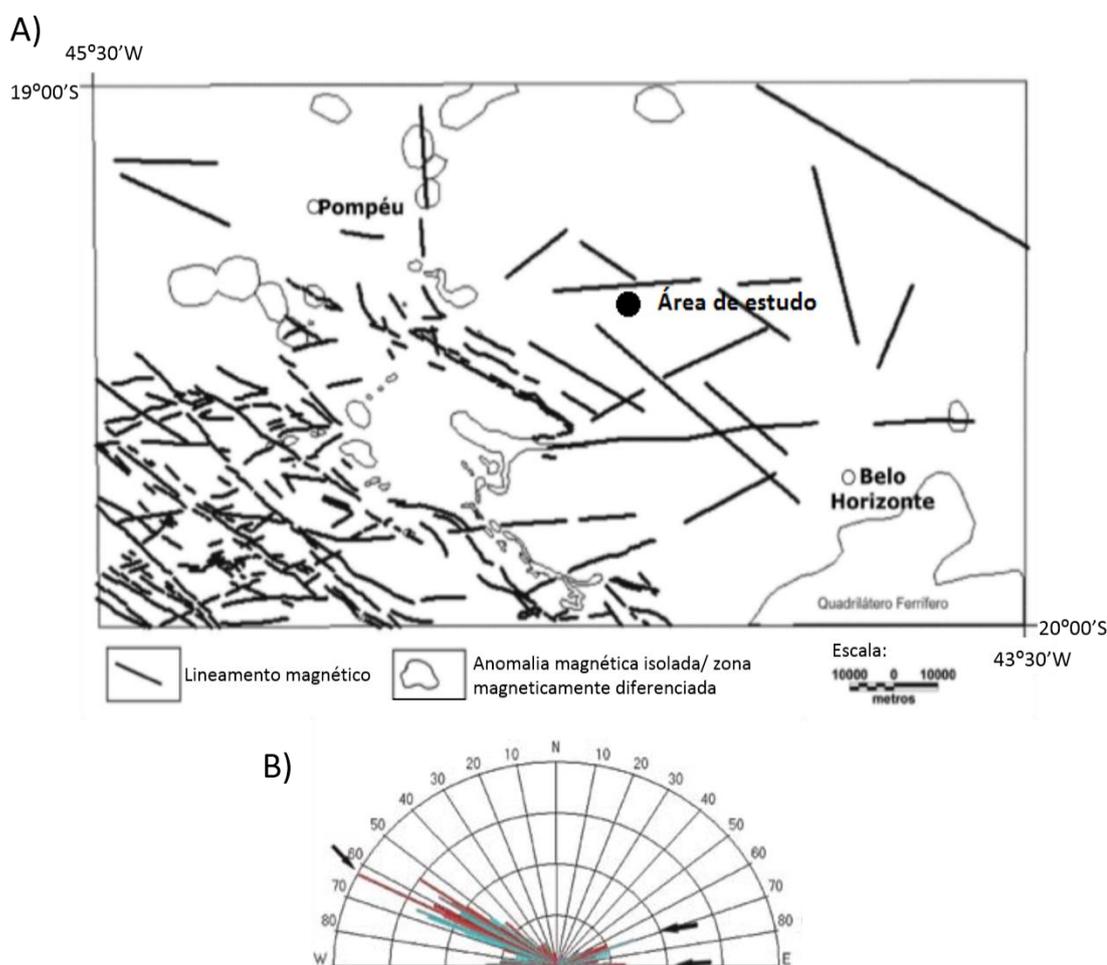


Figura 2.2: Interpretação de imagens geofísicas de Campo Magnético realizadas pela CPRM na área de abrangência do Projeto Sete Lagoas – Abaeté: A) Mapa com lineamentos e anomalias magnéticas interpretadas B) Diagrama de rosetas com as direções dos lineamentos magnéticos (Fonte: CPRM, 2010).

Acamamento

As atitudes do acamamento das rochas da região de Sete Lagoas de uma forma geral oscilam em torno de eixos N-S e mergulham preferencialmente para leste segundo Magalhães (1988).

Analisando as estruturas na formação Sete Lagoas, Salgado (2016) identifica dobras amplas e abertas com eixos seguindo a direção geral N10-20W e mergulhos sub-horizontais a mediamente inclinados. O autor associa esse padrão de deformação ao processo de dobramento por flambagem (Hobbs *et.al.*, 1976), que envolve o deslizamento flexural dos planos de estratificação. Tal processo torna essas superfícies favoráveis ao deslocamento após soerguimento regional e expansão dos maciços rochosos. Esse deslocamento deixa o maciço permeável permitindo a circulação de água subterrânea nas superfícies de estratificação. Evidências dessa percolação de água são vistas em cortes como cavas de pedreiras (Salgado, 2016).

Galvão *et al.* (2015) ressaltam que grandes volumes de água nos calcários do município de Sete Lagoas são transmitidos pela porosidade terciária cárstica desenvolvida nos acamamentos, combinada com fraturas subverticais. Através de estudos de registros ópticos dos furos de sondagem e de mapeamento geológico, esses autores descrevem duas zonas carstificadas associadas ao acamamento nos calcários da formação Sete Lagoas na região de Sete Lagoas. A primeira teria espessura de 1 a 8m e estaria próxima ao contato com o solo; e a outra menos espessa, 20cm a 1m, estaria a 10 – 20m abaixo da primeira zona.

Faturas

Em uma área maior que abrange a cidade de Sete Lagoas, Magalhães (1988) destaca 3 direções de fraturas. Um sistema de pares conjugados com direções N40-50E e N50-70W e mergulhos subverticais. E uma família de direção E-W também subvertical, bem menos frequente, grosseiramente paralela ao plano bissetor do sistema anterior.

Daniel e Teodoro (1992) realizaram 65 medidas de fraturas na formação Sete Lagoas e observaram que há uma grande dispersão na direção de fraturamento, mas ainda assim foi possível reconhecer uma família principal com direção em torno de N85W. São caracterizadas como curvas, não preenchidas, de baixa frequência (em média menores que 3 por metro linear).

Salgado (2016) identificou na região de Sete Lagoas - MG 3 famílias de fraturas predominantes, sendo elas C1 de direção N10-20E, C2 orientada a N30-40E com uma dispersão que chega até N50E e C3 com direção variando de N80W a E-W. Todas as famílias apresentam mergulho subvertical.

Lima *et al.* (2017) fizeram levantamento de fraturas na Bacia Gordura-Escrivânia, região que fica a leste da área de estudo. Foram realizadas 113 medidas no calcário da formação Sete Lagoas. A partir deste levantamento foi identificada uma família de fraturas com direção preferencial N30-55E com alto ângulo de mergulho. Também foram encontradas famílias de fraturas com menor frequência nas direções N15-50W e EW também subverticais.

2.3 GEOMORFOLOGIA

De uma forma geral as feições geomorfológicas da região tem uma relação com os tipos litológicos predominantes. Em maior proporção tem-se o relevo de colinas com predomínio de formas convexas desenvolvidas sobre as rochas pelíticas do Grupo Bambuí (CPRM, 1994). As drenagens nessas áreas geralmente obedecem a um padrão dendrítico, às vezes com condicionamentos estruturais por fraturas e/ou falhas com direções preferenciais NE e NW (CPRM, 2010).

Outro relevo encontrado tanto de forma regional como local é o cárstico. Ele é proveniente de ciclos de intemperismo bem desenvolvidos sobre rochas calcárias compactas e densamente fraturadas que propiciam tal processo (CPRM, 1994). Feições do exocarste (domínio morfológico superficial), como sumidouros, dolinas, vales cegos, lapiez, relevos de aspecto ruiforme e escarpamentos, são comuns na região (CPRM,

1994). Ressalta-se que as dolinas geralmente são adaptadas a rede de fraturas “nas direções N70-89E e N50-69E” (CETEC, 1987).

Também se encontram na área cárstica formas do domínio morfológico subterrâneo (endocarste), constituído por um conjunto de galerias e grutas e por sistemas de drenagem alimentados por inúmeros sumidouros (CPRM, 1994).

Discordantemente sobre as rochas do Grupo Bambuí ocorrem em algumas áreas depósitos coluviais predominantemente argilosos. Essas coberturas detríticas correspondem às superfícies de aplainamento que se apresentam como topos suavemente ondulados ou como extensas superfícies rebaixadas, planas a onduladas, onde é comum a formação de lagoas (CPRM, 1994).

Nas calhas dos rios são comumente encontrados sedimentos detríticos aluviais que constituem as planícies e terraços fluviais (CPRM, 1994).

2.4 SOLOS

Os solos na região de Sete Lagoas, segundo Viana (2005), são compostos por uma mistura de materiais alóctones derivados, possivelmente, da degradação e do transporte a longa distância de couças e solos associados com materiais *in situ* proveniente do intemperismo das rochas metapelíticas do Grupo Bambuí. Essas coberturas coluviais são assentadas discordantemente sobre as rochas e incorporadas aos solos *in situ*. Encontram-se nas superfícies de aplainamento com topos suavemente ondulados, ou em extensas superfícies rebaixadas.

Nas classes de solos identificadas da região, tendo como base para classificação o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), é comum em superfície a presença do horizonte A moderado e em subsuperfície o horizonte B latossólico, sendo ambos de grande expressão (Panoso *et al.*, 2001).

As classes predominantes são Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelhos Amarelos, que apresentam caráter álico, ou seja, teor de alumínio extraível superior a 0,5cmol/Kg

de solo e saturação por alumínio superior a 50%, comprovando-se que o solo tem pouca influência da rocha calcária (Panoso *et al.*, 2001).

Os Latossolos Vermelhos apresentam maior expressão geográfica e são encontrados nos relevos planos a ondulados. Exibem coloração avermelhada, embora tenham teores de ferro total baixos para essa classe, em média de 11 a 12%. Apresentam alto teor de óxido de alumínio se comparado ao de ferro. Esses dados associados as demais características químicas indicam a presença de caulinita como mineral de argila e possivelmente gibsita como óxido (Panoso *et al.*, 2001).

A segunda classe de solos de maior expressão geográfica na região é a dos Latossolos Vermelhos Amarelos. Apresentam predominantemente granulometria fina, argilosa, e teores de óxido de ferro e de alumínio bem próximos aos dos Latossolos Vermelhos. E novamente pela química infere-se a presença do mineral gibsita (Panoso *et al.*, 2001).

Nas partes baixas e planas da região encontram-se as outras classes de solos identificadas como os solos desenvolvidos de sedimentos quarternários aluvionares e ou coluvionares com maior ou menor influência do nível freático. Incluem-se nestes os Neossolos e os Gleissolos (Panoso *et al.*, 2001).

Pela localização, Panoso *et al.* (2001) inferem que essas classes de solos menos expressivas possam ter recebido maior contribuição do calcário nos processos de formação.

2.5 CLIMA E VEGETAÇÃO

Clima

Segundo Panoso *et al.* (2001) o clima da região é do tipo Cwa, mesotérmico úmido, de acordo com a classificação de Köppen. O período chuvoso ocorre entre outubro e março e é bastante seco nos meses de abril a setembro. O índice pluviométrico anual varia entre 1.000mm a 1.500mm (Machado, 2011). A temperatura média no período seco está em torno de 20°C e no chuvoso sobe para 23°C (Machado, 2011).

Vegetação

Segundo a caracterização dos tipos vegetacionais brasileiros de Rizzini (1997), a vegetação predominante na região é do tipo Cerrado, composta por árvores esparsas com alturas variáveis, podendo alcançar até 8 metros, com copas que não se tocam, troncos geralmente tortuosos e folhas coriáceas e/ou pilosas (Ferri, 1980).

Viana (2005) salienta que essa vegetação na área já está bastante antropizada, sujeita à ação de queimadas periódicas, extração de madeira e coleta de minhocaçus. Ao longo das drenagens observa-se mata pluvial (ciliar) bem desenvolvida devido a maior umidade do solo (Tuller *et al.*, 2010).

2.6 HIDROGRAFIA, HIDROGEOLOGIA E HIDROLOGIA

A área do município de Sete Lagoas compreende as bacias dos rios das Velhas e Paraopeba, ambas pertencentes à bacia do Rio São Francisco. O divisor de água dessas bacias são as Serras de Santa Helena e Tombador, com altitudes que atingem até 1.000m. Na região sul do município tem-se outro divisor dessas bacias, o planalto dissecado do ribeirão da Mata, com altitude máxima de 950m. Tem-se na região rios de pequena expressão, como o São João e dos Macacos (rio Paraopeba) e o ribeirão Jequitibá e córregos Matadouro e Vargem do Tropeiro (rio das Velhas) (Cabral, 1996).

Na região encontram-se três tipos de aquíferos que se associam a três unidades distintas de rochas: o aquífero cárstico, associado as rochas carbonáticas do grupo Bambuí; o aquífero fissural, associado ao embasamento formado por migmatitos e gnaisses do complexo Belo Horizonte; e o aquífero poroso associado essencialmente aos materiais de alteração das rochas supracitadas, os quais distribuem-se de acordo com a intensidade de transporte – alúvios, colúvios e elúvios.

A região de estudo está inserida em terrenos carbonáticos, por isso será dado um maior enfoque ao aquífero cárstico. Este aquífero ocupa uma área de 130 km² do município, correspondendo a área de extensão das rochas da formação Sete Lagoas, e é responsável pelo abastecimento da cidade para consumo humano, perfazendo mais de 80% dos poços

tubulares cadastrados (Galvão, 2015). É formado pela percolação de água nas fraturas que condiciona a formação de condutos a partir da dissolução do material carbonático (Pessoa, 1996).

A unidade carbonática tem espessura variável, podendo chegar a 160 metros (Pessoa, 1996). Pode ser dividida em duas porções: a basal, com calcário mais impuro em contato com o embasamento cristalino e a parte superior, formada por calcário puro, sotoposto as rochas pelíticas da formação Serra de Santa Helena. Geralmente essa unidade é coberta por solos argilosos residuais cuja espessura média é de 25 metros (Pessoa, 1996).

Na área de estudo e em alguns outros locais onde o calcário aflora observam-se processos de carstificação, que em alguns casos levam ao desenvolvimento de cavernas de tamanhos consideráveis. Estes processos são mais intensos nas porções de calcário puro e nas zonas de fraqueza da rocha como fraturas e/ou falhamentos. Sendo assim, em subsuperfície esses planos de fraqueza vão sendo alargados por dissolução, criando zonas favoráveis à circulação de água (Pessoa, 1996).

A dinâmica hídrica subterrânea no endocarste é regida pela circulação de grande volume de água, propiciando a formação de fluxo turbulento nos condutos bem desenvolvidos. Segundo Palmer (1991), a origem do endocarste está condicionada aos seguintes fatores:

- recarga de fluxo difuso através de rochas sobrejacentes não solúveis, as quais contribuem com volumes consideráveis para as fraturas da rocha calcária subjacente;
- agressividade da água subterrânea incrementada pela mistura com águas provenientes de outras fontes, de composição química diferente (solo + ácido húmico = águas ácidas), aumentando a capacidade de dissolução do calcário (Pessoa, 1996).

A água subterrânea no carste de Sete Lagoas é classificada como bicarbonatada-cálcica, com valor de pH entre 6,5 e 7,5. Devido à alta concentração de sais dissolvidos tem condutividade elétrica em torno de 333µmhos/cm. Apresenta boa qualidade para o consumo humano, no entanto pode às vezes causar um gosto desagradável e problemas de encrustação em tubulações com diâmetro pequeno por causa da presença de cálcio e magnésio (Galvão, 2015).

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 GEOFÍSICA APLICADA

Parâmetros físicos dos maciços, tais como resistividade elétrica, contrastes de densidade, velocidade de propagação de ondas acústicas, elásticas e campo magnético da terra podem ser medidos com métodos geofísicos. A distribuição destas propriedades em profundidade está diretamente relacionada com características geológico-geotécnicas do maciço, como grau de alteração, de fraturamento e tipo litológico, aspectos fundamentais na investigação de uma determinada área (Brito e Oliveira, 1998).

Os métodos geofísicos (inclui-se nestes métodos, os elétricos e eletromagnéticos utilizados neste trabalho) são rotineiramente usados em investigações rasas de maciços nos campos da engenharia e hidrogeologia (Brito e Oliveira, 1998; Kearey *et al.*, 2009).

Em hidrogeologia e geotecnia, normalmente antes dos ensaios geofísicos, uma análise em fotografias aéreas e imagens de sensores remotos é realizada para observar os principais lineamentos estruturais e suas direções. Com base nessas informações pode-se direcionar melhor em campo as linhas de levantamentos geofísicos que geralmente são locadas perpendicularmente a direção das possíveis estruturas.

No caso das fraturas, além da direção outra característica muito importante na análise hidrogeológica e geotécnica é a sua abertura, que é definida como o espaço perpendicular que separa as paredes de uma fratura, podendo estar vazio ou preenchido. Esse preenchimento das fraturas pode ser por sedimentos finos provindos do intemperismo da rocha, por água, por mineralizações que ocupam o plano da descontinuidade, entre outros. Quando as fraturas estão abertas em superfície subentende-se que em subsuperfície, abaixo no nível freático, poderão estar preenchidas por água, tendo assim uma influência direta na quantidade de água que percola o interior dos maciços rochosos. De acordo com a Lei Cúbica (Snow, 1969), a condutividade hidráulica nos meios fraturados é

proporcional ao cubo da abertura da fratura. Já a densidade do fraturamento, ditada pela frequência ou espaçamento, causa variação apenas linear.

O padrão para classificação de aberturas, conforme indica a ISRM (*International Society Rock Mechanic*, 1983), pode ser visualizado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classes de abertura segundo ISRM – *International Society Rock Mechanic*, (Fonte: ISRM, 1983).

Abertura (cm)	Descrição
0	Fechada
0 a 1	Aberta
1 a 10	Muito larga
10 a 100	Extremamente Larga
>100	Cavernosa

3.2 MÉTODO DE ELETORRESISTIVIDADE

O método da eletrorresistividade consiste na injeção de corrente elétrica (I) no solo através de dois eletrodos e na medição da diferença de potencial (V) por outros dois eletrodos. O cálculo da resistividade aparente (ρ_a) é dado pela equação:

$$\rho_a = K \cdot V / I \quad (3.1)$$

Onde:

ρ_a : em ohm.m

V: em volt (V)

I: em ampére (A)

K: em metros (m).

Em que K é o fator geométrico que depende do arranjo dos eletrodos utilizado.

Na Figura 3.1 tem-se os arranjos mais comumente utilizados com seus respectivos fatores geométricos.

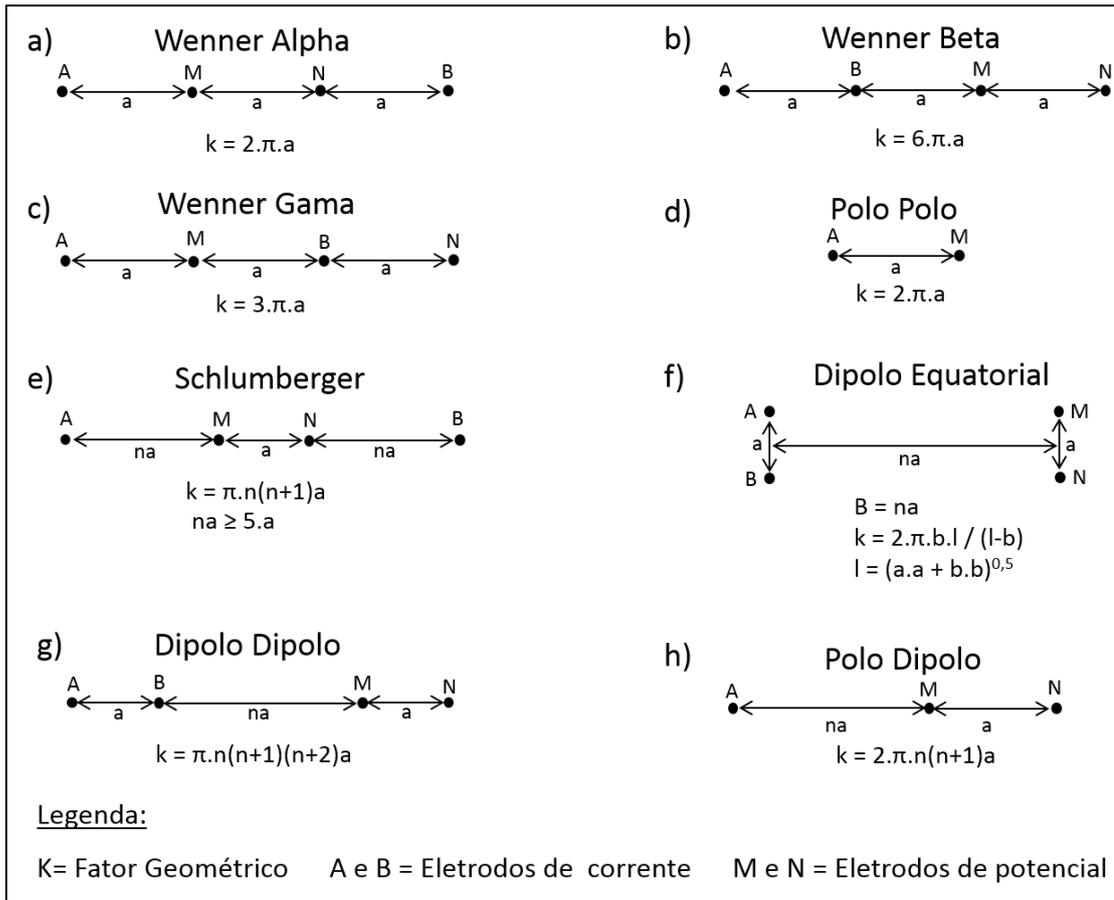


Figura 3.1 - Arranjos mais comumente utilizados em levantamentos de resistividade e seus fatores geométricos (Fonte: modificado Loke, 2000).

Ressalta-se que os valores encontrados nos levantamentos de eletrorresistividade são chamados de resistividades aparentes, pois dependem das dimensões do material em que a corrente elétrica passa (função do arranjo) e também do meio em que a corrente é injetada, sendo este normalmente heterogêneo, englobando solo, rocha e influência de nível freático (Borges, 2002). A resistividade medida desta forma não será mais a resistividade de uma rocha ou de uma camada e sim a resistividade média do pacote de rochas (Borges, 2002).

A profundidade de penetração da corrente elétrica em um terreno homogêneo aumenta de acordo com o maior distanciamento dos eletrodos de corrente. A Figura 3.2 mostra a fração do fluxo de corrente que passa abaixo de uma profundidade Z, de acordo com a relação entre o distanciamento dos eletrodos de corrente (L) e essa profundidade. Percebe-se que quando a distância dos eletrodos é duas vezes maior que a profundidade Z, metade da corrente flui abaixo dessa profundidade. Como a diferença de potencial medida em

superfície está diretamente relacionada ao fluxo de corrente que passa na profundidade alvo, deve-se usar um espaçamento grande o suficiente para atingir valores consideráveis de fluxo de corrente em tal profundidade. Isso coloca uma limitação no método de eletrorresistividade, dada a dificuldade em estender longos comprimentos de cabo e em gerar energia suficiente (Telford *et al.*, 1990).

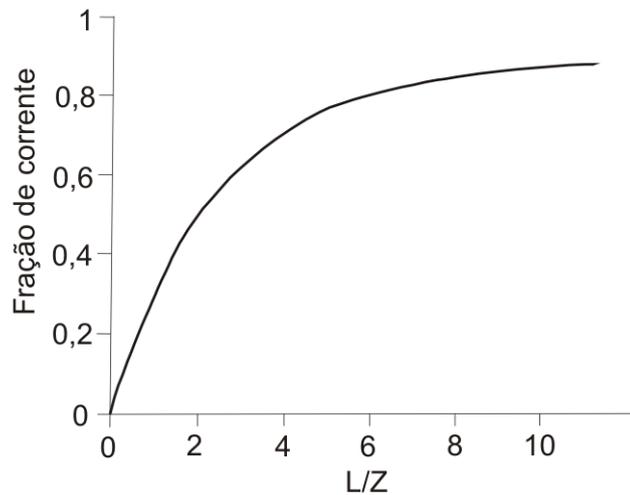


Figura 3.2: Fração da corrente penetrada abaixo da profundidade z em relação ao espaçamento dos eletrodos (Fonte: modificado Telford *et al.*, 1990).

Nos levantamentos o que interessa normalmente são os valores anômalos de diferença de potencial, que fornecem informações a respeito da forma e das propriedades das heterogeneidades de subsuperfície (Loke, 2000).

A propagação da corrente elétrica nos materiais pode se dar por condução eletrônica ou por condução eletrolítica e estes mecanismos estão diretamente relacionados com a resistividade elétrica. No caso da condução eletrônica os elétrons movimentam-se a partir da presença de materiais condutores, como minerais metálicos e grafita. Já no caso da condutividade eletrolítica, os íons movimentam-se em meio aquoso presente nos poros e fissuras dos solos e rochas, sendo este o mecanismo mais comum, pois a maior parte dos minerais formadores de rochas são isolantes. A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é influenciada pela porosidade, quantidade de água na rocha e teor de sais dissolvidos. O aumento no valor desses fatores leva a uma diminuição da resistividade (Lago, 2009).

Na Tabela 3.2 têm-se os valores de resistividade elétrica esperado para os tipos de rochas mais comuns, alguns solos e águas. Observa-se que a identificação de um tipo de rocha somente com base nos dados de resistividade é difícil devido à interferência das resistividades das rochas circundantes. Além disso, a resistividade de um mesmo tipo de rocha pode diversificar bastante devido a variação de alguns fatores como porosidade, teor de água, quantidade de sais (Kearey *et al.*, 2009).

Tabela 3.2: Resistividade e condutividade das rochas, solos e águas mais comuns (Fonte: modificado Loke, 2000).

Material	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (Siemens/m)
Rochas ígneas e metamórficas		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Ardósia	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2,5 \times 10^{-8} - 1,7 \times 10^{-3}$
Mármore	$10^2 - 2,5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quartzito	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Rochas sedimentares		
Arenito	$8 - 4 \times 10^3$	$2,5 \times 10^{-4} - 0,125$
Xisto	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0,05$
Calcário	$50 - 4 \times 10^2$	$2,5 \times 10^{-3} - 0,02$
Solos e águas		
Argila	1 - 100	0,01 - 1
Alúvio	10 - 800	$1,25 \times 10^{-3} - 0,1$
Água subterrânea	10 - 100	0,01 - 0,1
Água do mar	0,2	5

3.2.1 Técnicas de aquisição

Três tipos principais de procedimento são empregados em levantamentos de resistividade: SEV, caminhamento e azimutal. Será dado um maior enfoque na técnica azimutal por ser uma técnica pouco conhecida no Brasil e que foi utilizada neste trabalho.

SEV

A técnica de sondagem elétrica vertical, SEV, consiste em leituras de resistividade num determinado ponto em diferentes profundidades, simulando uma sondagem vertical. Para isso, nos arranjos mais usuais os eletrodos são progressivamente expandidos ao redor de

um ponto fixo central (Figura 3.3). O objetivo principal é o estudo das interfaces horizontais ou sub-horizontais abaixo do ponto de interesse em superfície (Kearey *et al.*, 2009).

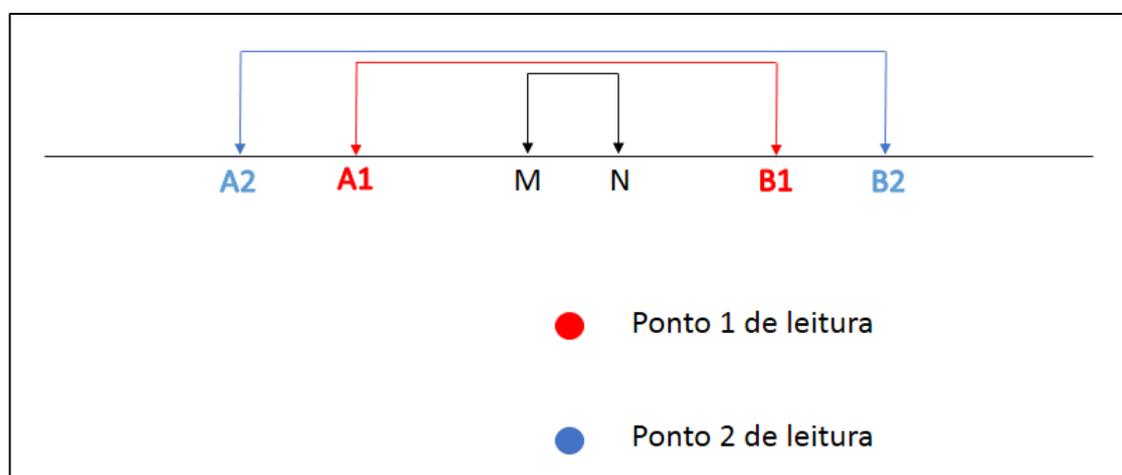


Figura 3.3: SEV utilizando o arranjo Schlumberger. Os eletrodos de corrente são representados pelas letras A e B e os eletrodos de potencial por M e N.

Depois da etapa de campo, os dados adquiridos na SEV são plotados na forma de um gráfico em que, na abscissa, tem-se a profundidade teórica, que depende do espaçamento entre os eletrodos de corrente, e, na ordenada, a resistividade aparente medida. Estes gráficos são habitualmente apresentados em escala bilogarítmica.

A técnica é extensivamente usada em levantamentos geotécnicos para determinar espessura dos estratos e também em hidrogeologia, para definir nível de água subterrânea.

Caminhamento

O caminhamento elétrico é uma técnica utilizada para investigações da distribuição da resistividade do terreno, tanto horizontal quanto verticalmente. Uma das formas de realizar o levantamento é através do arranjo dipolo-dipolo que tem como vantagem o fato de ser um arranjo simétrico, resultando assim num posicionamento mais correto das anomalias o que facilita a interpretação das seções de pseudo-profundidade (Gandolfo e Gallas, 2007).

Para realizar a aquisição dos dados em campo utilizando este arranjo dispõe-se os eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) ao longo de uma linha no terreno. O distanciamento entre os A e B é fixo assim como o distanciamento entre M e N. A primeira medida é realizada com uma distância “a” entre esse dipolos alcançando dessa forma o primeiro nível de profundidade de investigação. As próximas medições serão realizadas com aumentos na separação entre esses dipolos seguindo um fator “n.a”. Quanto maior for essa distância, maiores profundidades poderão ser alcançadas, tendo como limite de valor aceitável, as leituras de potencial superiores ao nível de ruído presente no local (Figura 3.4) (Gandolfo, 2007).

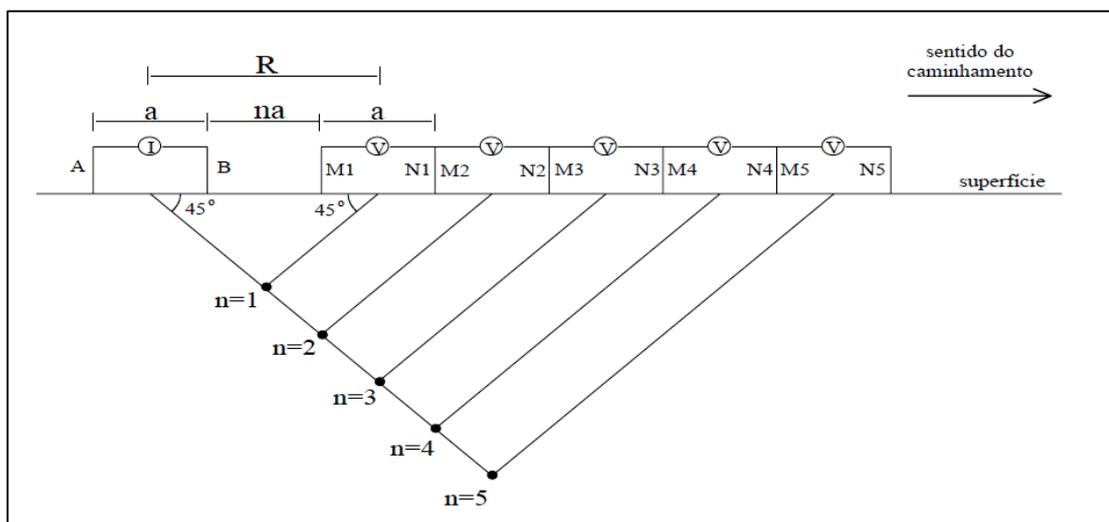


Figura 3.4: Configuração Dipolo-dipolo com o sentido do caminhamento. A e B são os eletrodos de corrente e M e N são os eletrodos de potencial (Fonte: Gandolfo, 2007).

Após essas medições, na técnica de caminhamento elétrico, todo o arranjo é deslocado de uma distância igual a “a” e novamente repete-se o procedimento anteriormente descrito. Dessa forma é possível construir uma seção de resistividade ao longo da linha de aquisição (Gandolfo, 2007).

Essa técnica é empregada para localizar zonas de cisalhamento, falhas, fraturas ou quaisquer outras características que se apresentem como heterogeneidades laterais e verticais de resistividade. Em levantamentos geotécnicos é comumente utilizado para determinar variações na profundidade do embasamento (Kearey *et al.*, 2009).

Azimutal

- Generalidades

As medidas de resistividade aparente na técnica azimutal resultam da rotação dos eletrodos ao redor de um ponto central alvo do levantamento. Esse método é utilizado principalmente para detecção de direções preferenciais de fraturas.

A lei de Ohm pode ser expandida para incluir o caso das rochas fraturadas que por definição são anisotrópicas. A explicitação da teoria apresentada aqui segue os estudos de Keller e Frischknecht (1966), Goriunov e Malotkov (1961), Taylor (1982, 1984) e Taylor e Fleming (1988). Observações adicionais e desenvolvimentos relacionando a aplicação das medidas elétricas a condições anisotrópicas são fornecidas por Schlumberger e Leonardon (1933, *apud* Taylor e Jansen 1988), Asten (1974) e Habberjam (1972).

Para o desenvolvimento da teoria considere um maciço rochoso contendo um único conjunto de fraturas verticais com direção paralela ao eixo x e mergulho positivo na direção do eixo z (Figura 3.5). Para este sistema define-se que:

ρ_y : a resistividade transversal ou a resistividade para o fluxo de corrente perpendicular à direção das fraturas,

ρ_x : a resistividade longitudinal ou a resistividade para fluxo de corrente paralelo à direção das fraturas.

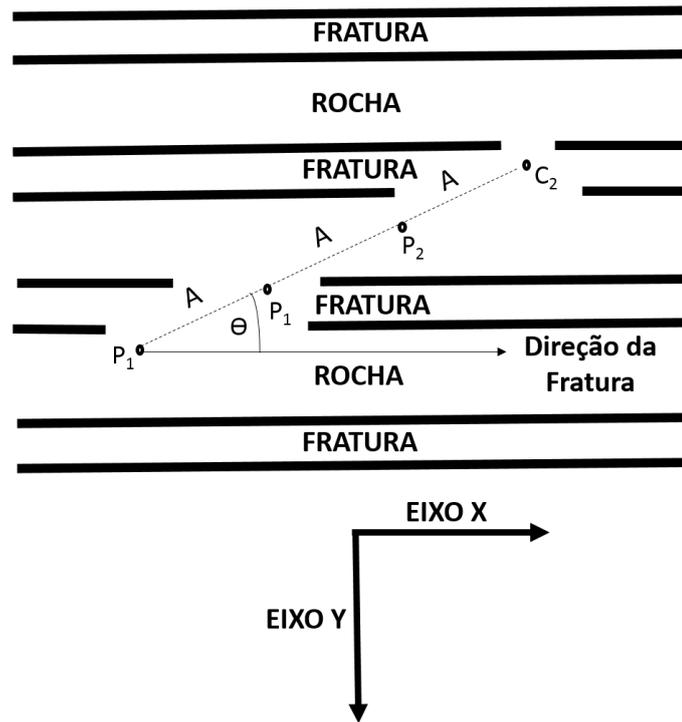


Figura 3.5: Posicionamento do sistema de fraturas e geometria dos eletrodos em um maciço hipotético. (Fonte: Taylor e Jansen, 1988).

O sistema segue a equação escalar de Laplace e considera que a densidade das fraturas é suficientemente elevada para tornar o meio anisotrópico homogêneo. A solução para essa equação produz um potencial, V , em algum ponto, x, y, z resultando em uma corrente de magnitude I (Keller e Frischknecht, 1966):

$$V = I \rho_x \lambda / \{2 \pi (x^2 + z^2 + \lambda^2 y^2)^{1/2}\}; \quad (3.2)$$

onde λ é definido como o coeficiente de anisotropia e é dado por:

$$\lambda = (\rho_y / \rho_x)^{1/2}. \quad (3.3)$$

Considerando somente medidas superficiais, $z=0$ e utilizando coordenadas polares tais que $x = r \cos \theta$ e $y = r \sin \theta$ obtêm-se:

$$U = I \rho_x r^{-1} / 2\pi(\cos^2\theta + \lambda^2 \sin^2 \theta)^{1/2}. \quad (3.4)$$

Para um arranjo Wenner tradicional, as medidas de resistividade aparente resultante da distribuição de potencial se torna uma função de θ (ângulo entre a linha de resistividade e a direção das fraturas) (Figura 3.5) dado por:

$$\rho_a(\theta) = \lambda \rho_x / (\cos^2\theta + \lambda^2 \sin^2\theta)^{1/2}. \quad (3.5)$$

Isto é equivalente aos resultados de resistividade aparente teóricos apresentados na (Figura 3.6). Assim, a resistividade aparente obtida pela rotação do arranjo Wenner é plotada num gráfico resultando em uma elipse. O eixo maior da elipse de resistividade aparente coincide com a direção das fraturas. A resistividade verdadeira paralela às juntas é lida no eixo menor da elipse de resistividade aparente.

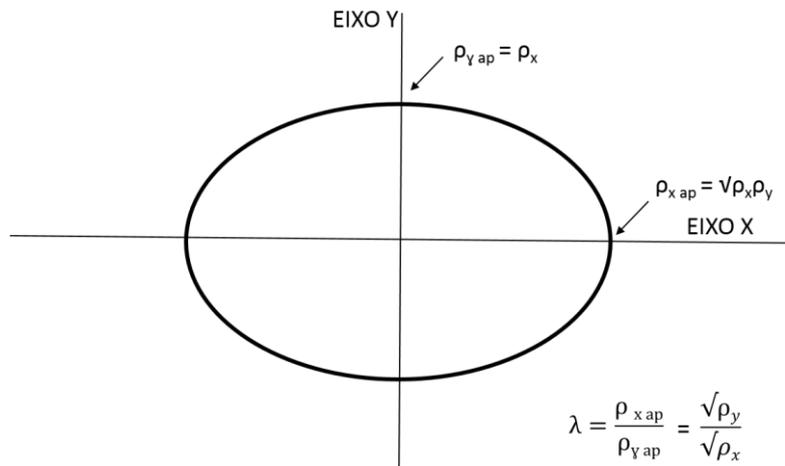


Figura 3.6: Resultado teórico do levantamento azimutal de resistividade. (Fonte: Taylor e Jansen, 1988).

O coeficiente de anisotropia, λ , para o maciço rochoso é dado pela razão entre o eixo menor e o eixo maior da elipse de resistividade. Assim a resistividade normal à direção da fratura é dada por:

$$\rho_y = \lambda^2 \rho_x. \quad (3.6)$$

- Arranjos colineares

Os arranjos colineares são os mesmos utilizados nos levantamentos convencionais, como SEV e caminhamento. A diferença está na forma de movimentação dos eletrodos. Por se tratar da técnica azimutal com foco na detecção de fraturas verticais, a distância entre os

eletrodos é mantida fixa e a cada medida há uma rotação dos eletrodos (Figura 3.7). Assim as medições de resistividade são feitas em várias direções, mantendo-se sempre a mesma distribuição dos eletrodos e, conseqüentemente, da profundidade teórica de investigação. Depois, plota-se os valores das resistividades aparentes em função dos azimutes. Quando o terreno é anisotrópico normalmente obtém-se uma elipse.

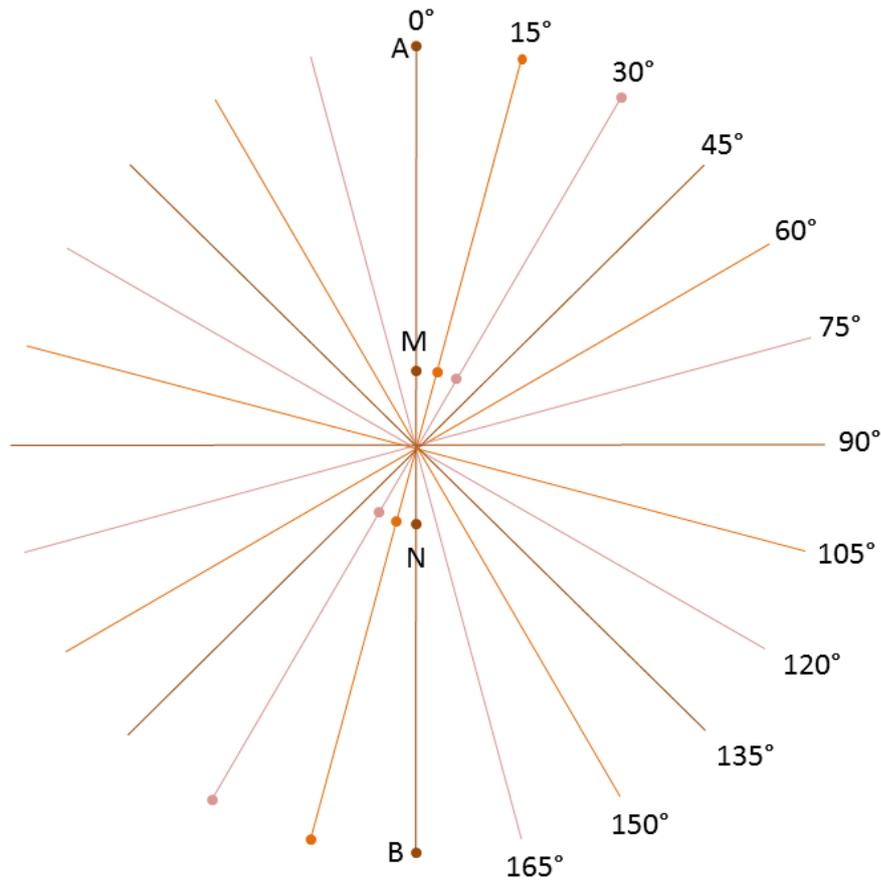


Figura 3.7: Levantamento azimutal com arranjo Wenner utilizando ângulo de rotação de 15° em que AB são os eletrodos de corrente e MN os eletrodos de potencial.

- Arranjo quadrático – Não colinear

O arranjo quadrático foi originalmente desenvolvido como uma alternativa aos arranjos tradicionais colineares em áreas com estruturas planas subverticais, como fraturas, acamamento e foliação (Habberjam e Watkins, 1967 *apud* Lane, 1995). Apesar de seu potencial para detectar resistividades direcionais, são poucos os trabalhos encontrados na literatura que utilizem especificamente o arranjo quadrático.

Em relação aos arranjos colineares azimutais, o quadrático apresenta a vantagem de ter aquisição de dados mais rápida e elevada profundidade de investigação (Szalai *et al.*, 2007).

Neste tipo de arranjo os eletrodos são locados nos vértices de um quadrado com arestas com comprimento “a”. Neste arranjo, emprega-se vários quadrados de mesmo tamanho rotacionados com incrementos angulares iguais ao redor do ponto central. Para cada posição, duas medidas de resistividade aparente (ρ_a) em direções perpendiculares (alfa, α e beta, β) são feitas trocando-se a posição de um eletrodo de corrente com um de potencial como esquematizado na Figura 3.8.

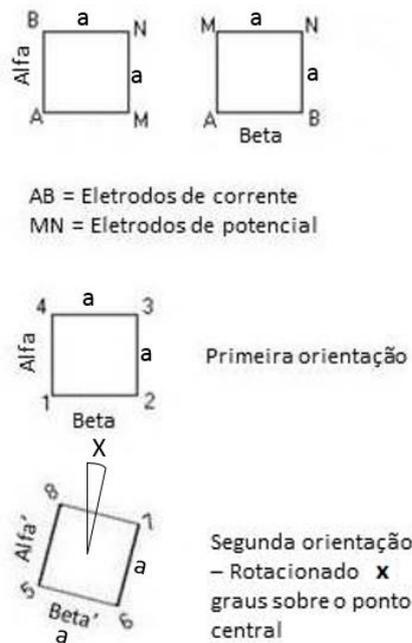


Figura 3.8: Posição dos eletrodos para medidas no arranjo quadrático (Fonte: modificado Lane *et al.*, 1995).

O fator geométrico k para esse arranjo foi definido por Habberjam e Wathkins (1967) e é dado pela seguinte equação:

$$K=2\pi a/2-2^{1/2}, \quad (3.7)$$

em que “a” é a aresta do quadrado.

- Arranjo Dipolo-equatorial – Não colinear

O arranjo Dipolo-equatorial também é o mesmo utilizado nos levantamentos convencionais (Figura 3.1). Utiliza dois eletrodos de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N) posicionados paralelamente entre si com distanciamento b dado pela equação:

$$b = na, \quad (3.8)$$

onde n é um fator multiplicador que determina a distância entre os dipolos e o tamanho do arranjo, sendo seu valor mínimo igual a 5; e “ a ” é o espaçamento ente os eletrodos (Loke, 2000).

O fator K para esse arranjo é dado pela equação:

$$K = \frac{2\pi bL}{L-b}; \quad (3.9)$$

em que

$$L = (a^2 + b^2)^{0,5}. \quad (3.10)$$

Utilizando a técnica azimutal, mantém-se a distância “ b ” fixa e a cada medida há uma rotação dos eletrodos (Figura 3.9).

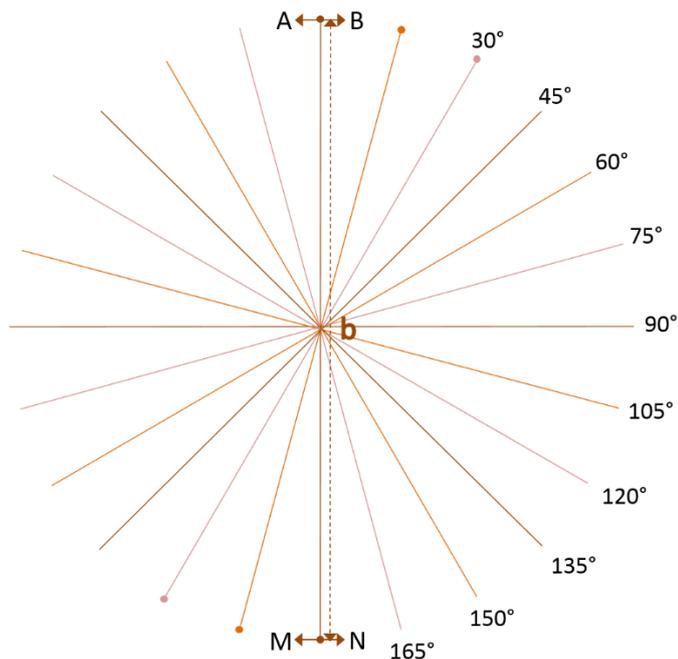


Figura 3.9: Disposição dos eletrodos do arranjo dipolo-equatorial utilizando a técnica azimutal.

3.3 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

O princípio dos métodos eletromagnéticos consiste na medida da facilidade com que a corrente elétrica induzida flui através dos materiais (solo ou rocha), ou seja, eles medem a condutividade elétrica dos terrenos. Os solos de uma maneira geral são pouco condutores, com exceção aos compostos por minerais metálicos, grafita e algumas argilas. Qualquer fluxo de corrente elétrica através destes materiais se faz principalmente pela presença de água e por seu conteúdo iônico (Kearey *et al.*, 2009).

Os métodos eletromagnéticos podem se dar pelo domínio da frequência (FEM) ou pelo domínio do tempo (TEM) (Nabighian e Macne, 1991).

O FEM é realizado por meio de corrente elétrica alternada e por uma força de magnetização, usando assim da resposta do solo à propagação de campos eletromagnéticos. Os campos primários são gerados pela passagem da corrente elétrica alternada por uma bobina transmissora. Esse campo se espalha na direção da bobina receptora com trajetória aérea e sob a superfície (Kearey *et al.*, 2009). Na presença de um corpo condutor, o campo eletromagnético primário que penetra a superfície induz

correntes alternadas, ou correntes parasitas, a fluir no condutor. Essas correntes geram outros campos eletromagnéticos, chamados de secundários, que se propagam até o receptor. O receptor, então, responde à resultante da chegada dos campos primários e secundários, de forma que a resposta difere em fase e em amplitude da resposta ao campo primário. Essas diferenças entre os campos eletromagnéticos transmitido e recebido revelam a presença do condutor e fornecem informações sobre sua geometria e suas propriedades elétricas. Corpos anômalos com alta condutividade elétrica produzem fortes campos eletromagnéticos secundários (Kearey *et al.*, 2009).

Em algumas situações ocorre um pequeno campo secundário que é difícil de ser medido na presença de um campo primário muito maior. Essa deficiência motivou o desenvolvimento de uma técnica que permite a captação somente do campo magnético secundário. O resultado foi o método eletromagnético no domínio do tempo ou transiente (TEM) que consiste numa série de pulsos de corrente elétrica contínua separadas por períodos de inatividade. Nesses períodos de inatividade ocorrem as medições do campo secundário no receptor na ausência do campo primário (Nabighian e Macne, 1991).

O método eletromagnético indutivo utilizando o aparelho EM-34 segue o domínio da frequência (FEM). Os levantamentos de campo com EM-34 podem ser realizados de duas formas: com as bobinas, transmissora e receptora, na horizontal ou com as mesmas na vertical. O campo eletromagnético alcança maior profundidade quando as bobinas estão posicionadas na horizontal, ou seja, o dipolo magnético está na vertical. Com o dipolo magnético na horizontal, isto é, bobinas posicionadas na vertical, o campo eletromagnético tem uma maior abrangência lateral (McNeill, 1980).

As principais vantagens desta técnica são as facilidades de aquisição de dados em várias profundidades, versatilidade do equipamento em campo e a possibilidade de varredura de grandes áreas num curto espaço de tempo. Estas vantagens são traduzidas em rapidez e baixo custo (McNeill, 1980). A principal desvantagem desta técnica é o produto da interação do campo eletromagnético gerado pelo equipamento, com estruturas metálicas, fios de alta tensão, tambores metálicos e outras estruturas. Esta interação resulta em valores de condutividade aparente muito superiores aos valores reais. Desta forma esta técnica pode ter seu uso limitado em centros urbanos, instalações industriais, entre outros

(McNeill, 1980). Outra desvantagem é a limitação desta técnica em terrenos com valores elevados de condutividade. Nestas situações a condutividade indicada não é linearmente proporcional a condutividade real. Esse efeito é mais acentuado quando o levantamento é feito com as bobinas na horizontal (dipolo vertical) (Figura 3.10) (McNeill, 1980).

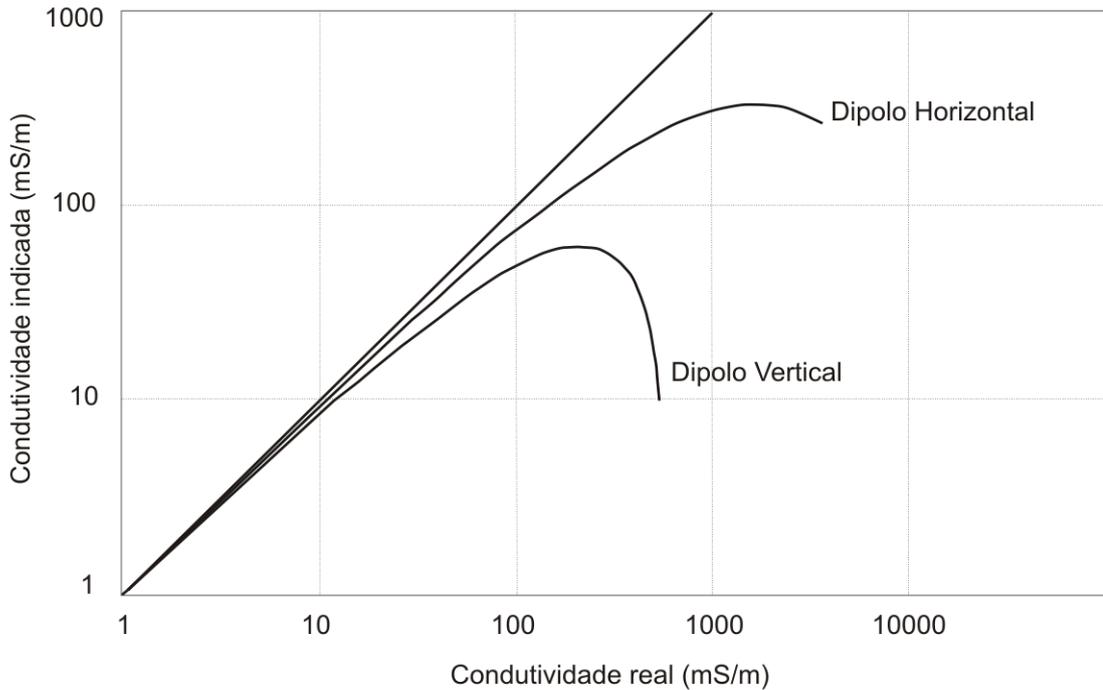


Figura 3.10: Gráfico mostrando a relação entre a condutividade indicada e a condutividade verdadeira para os levantamentos com EM-34 (Fonte: McNeill, 1980).

3.4 MÉTODO ELETROMAGNÉTICO – GPR

O Radar de Penetração em Solo, Georadar ou GPR (*Ground Penetrating Radar*), é um método geofísico de imageamento de subsuperfície de alta resolução. O processo se dá a partir da introdução no solo de um pulso curto de radar na faixa de frequência entre 10 – 3.500MHz (Kearey *et al.*, 2009). O equipamento é formado por um par de antenas, uma para transmitir o sinal eletromagnético através da subsuperfície e a outra para captar estes sinais após a sua reflexão por diferentes alvos no subsolo (Nascimento *et al.*, 1998).

A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas eletromagnéticas dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais (permissividade dielétrica, permeabilidade magnética e condutividade elétrica) (Nascimento *et al.*, 1998).

A resolução do perfil do radar varia de centímetros a vários metros dependendo da antena (frequência) utilizada. Frequências maiores (500 a 900 MHz) fornecem resoluções de alguns centímetros mas penetram pouco no terreno. Ao contrário das antenas de baixa frequência (25 a 50 MHz) que são capazes de trabalhar em maiores profundidades mas tem resolução menor, cerca de um metro de tamanho (Benson *et al.*, 1982).

A velocidade de uma onda de radar (U) é dada por:

$$U = c/\sqrt{K} \quad (3.11)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$) e k é a constante dielétrica.

A água apresenta uma alta permissividade dielétrica se comparada aos materiais geológicos assim sua presença atenua o sinal das ondas eletromagnéticas refletidas em subsuperfície.

A maneira mais comum de se trabalhar com o GPR consiste em executar perfis de reflexão. Para executar estes perfis, o que se faz é percorrer uma linha demarcada sobre o terreno, deslocando as duas antenas do GPR ao longo da mesma, e executando leituras em pontos equidistantes (Nascimento *et al.*, 1998).

Os dados adquiridos em campo são interpolados utilizando *softwares* apropriados como o *Gradix*. Nesses *softwares* também é feito o processamento dos dados que tem como intuito tornar os radargramas mais fáceis de serem interpretados. As etapas mais comumente utilizadas nesse processamento são:

- Filtragem Dewow: esse filtro é aplicado para a retirada do ruído Wow que corresponde a um componente transiente de baixa frequência que provoca uma saturação de alta amplitude em alguns comprimentos de onda da fonte. Esse ruído dificulta a visualização de eventos na frequência da antena, aparecendo no radargrama como uma zona enevoada e difusa (Neto, 2006)

- *Declipping* ou *desaturation*: em algumas situações, o sinal inicial da onda refletida pode ser “cortado”, isso ocorre porque há uma saturação no sistema de recepção do GPR devido

ao acoplamento com o solo. Portanto o traço gravado não representa a amplitude do pico verdadeiro do sinal retornado (Bostanudin, 2013).

- Marcação do tempo zero: esta correção tem como objetivo ajustar os traços do radargrama ao tempo de chegada da primeira onda (onda aérea) (Rodrigues, 2004).

- *Time windowing*: esse processo é feito através de funções de ganho que podem ser lineares, exponenciais e de AGC (ganho automático e janelado). O ganho AGC tem a finalidade de equalizar as amplitudes das ondas em uma janela temporal determinada pelo intérprete, resultando em maior quantidade de detalhes quanto menor o tamanho da janela (Rodrigues, 2004).

- Filtragem com filtro do tipo Gaussiano: esse filtro é aplicado com o intuito de reduzir os ruídos presentes no radargrama, tendo como resultado uma suavização da imagem e um enaltecimento da estrutura principal (Borges, 2002).

- *Fk*: através da aplicação da transformada dupla e inversa de Fourier é possível remover eventos inclinados no domínio espaço-tempo que aparecem nos radargramas como linhas retas no domínio frequência – número de onda (Aguiar, 2005).

- Conversão em profundidade: nesse processo é feito a conversão da escala vertical do radargrama passando de tempo (ns) para profundidade (m) (Bertolla, 2012).

- Migração: essa técnica busca recuperar as relações geométricas existentes de mergulhos ou irregularidades nas interfaces com diferentes permissividades elétricas (Rocca et al. 1989). Dessa forma ela melhora a resolução do radargrama e também o torna mais realista com relação a subsuperfície.

Após a realização do processamento de dados tem-se a etapa de interpretação dos radargramas em que procura-se visualizar a geometria, o mergulho, o posicionamento, as relações entre os refletores e várias outras características das estruturas presentes na subsuperfície (Aranha, 2003).

O método GPR tem muitas aplicações geológicas, como imageamento de solo raso e de estruturas de rocha em alta resolução, na localização de canais enterrados e no mapeamento da superfície (Kearey *et al.*, 2009). No caso específico dos terrenos cárticos este método pode ser bastante útil na localização de estruturas de dissolução que se apresentam nos radargramas como interrupções nos refletores (Neto, 2006).

CAPÍTULO 4

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas contaram com a realização de diversas etapas como mostrado no fluxograma da Figura 4.1, e posteriormente detalhado nos subitens deste capítulo.

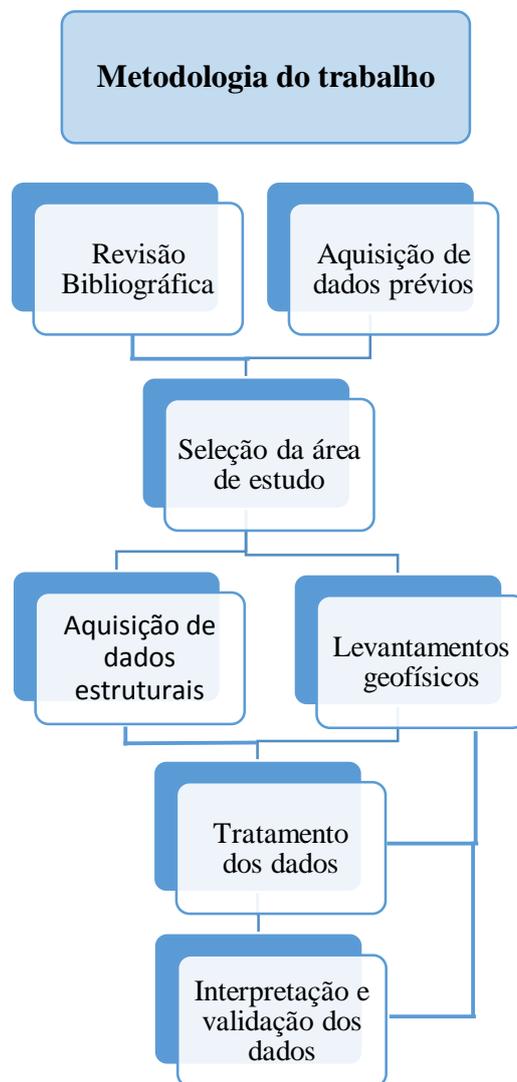


Figura 4.1: Etapas desenvolvidas neste trabalho.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E AQUISIÇÃO DE DADOS PRÉVIOS

Foi realizado o levantamento dos dados de interesse da região de Sete Lagoas - MG como imagens de RADAR (*Radio Detection And Ranging*), fotos aéreas, imagens de satélite, mapa geológico, mapa topográfico e dados bibliográficos. Nessa fase ainda não estava definida a área exata em que seria efetuada a pesquisa.

A imagem de radar utilizada foi a da missão SRTM (*SRTM – Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizadas pelo projeto denominado “Brasil em Relevo”, coordenado pela Embrapa Monitoramento por Satélite (Miranda, 2005), com escala 1:250.000.

As fotografias aéreas na escala 1:30.000 foram fornecidas pelo IGEO (Instituto Geotécnico) e são pertencentes ao projeto nº 59/89 da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

As imagens de satélite *Landsat* foram retiradas do *Google Earth* na escala de 1:10.000.

4.2 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Na região do município de Sete Lagoas/MG pesquisou-se uma área para a execução dos levantamentos geofísicos. A área escolhida deveria apresentar as seguintes características:

- distante de áreas com interferência antrópica, como tubulações enterradas e fiações elétricas;
- ser um terreno nivelado, para diminuir a influência da declividade nos levantamentos, sobretudo dos azimutais;
- ter um tamanho razoável, de preferência maior que 1000 m²;
- ter nas proximidades um poço tubular profundo de bombeamento de água subterrânea (com filtro na rocha calcária);
- nível freático raso;

- espessura pequena do manto de intemperismo, para diminuir a influência deste nos resultados, e com afloramentos nas proximidades, para permitir o levantamento estrutural (medições dos planos de acamamento e de fraturas).

Antes da pesquisa de campo foram consultados os bancos de dados do SIAGAS (CPRM) e SAEE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de Sete Lagoas para escolher quais áreas na região conteriam poços de bombeamento com as condições ideais. Com essa seleção prévia de áreas, passou-se para a etapa de campo para averiguar quais delas apresentavam as demais características citadas nos itens acima.

4.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOLÓGICOS E GEOFÍSICOS

Com as imagens dos sensores remotos foram traçados os lineamentos para uma melhor compreensão do sistema de fraturas tanto em escala regional como local. Foram escolhidos tamanhos de áreas e escalas distintos com o intuito de se fazer análises regionais e locais dos lineamentos. Como as imagens de radar SRTM apresentam baixa resolução espacial optou-se por usá-las nas análises regionais (escala 1:250.000), enquanto as fotografias aéreas (escala 1:30.000) e as imagens do satélite *Landsat* (escala 1:10.000) para análises locais. Os lineamentos de drenagem foram traçados nas fotografias aéreas por apresentarem-se mais evidentes que na imagem de satélite.

Foi realizado na área de estudo as medidas das atitudes dos acamamentos para checar se existiam estruturas que condicionavam o fraturamento da rocha como por exemplo dobras. E foram feitas em campo as medições das atitudes das descontinuidades planares rúpteis (fraturas), definindo suas orientações espaciais e mensurando com auxílio de fita métrica suas aberturas.

Para checar as informações referentes ao nível freático e também caracterizar os horizontes do terreno, identificando possíveis condutos, realizou-se uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com o arranjo Schlumberger com espaçamento inicial dos eletrodos de corrente (AB) de 5 metros e posteriores incrementos até atingir um total de 60 metros (Figura 4.2).

Depois foram executados os levantamentos azimutais de resistividade com vários espaçamentos intereletrodos (Tabela 4.1) utilizando arranjos colineares (Wenner e Schlumberger) e também não colineares (Dipolo-equatorial e Quadrático). Os espaçamentos foram definidos de acordo com o tamanho da área disponível e também com a profundidade da superfície freática. Estes arranjos foram rotacionados com incrementos de 15° ao redor de um ponto central (Figura 4.2).

Tabela 4.1: Espaçamento utilizado em cada arranjo.

Arranjo	Distância AB (m)	Distância MN (m)	Distância AN (m)
Wenner	12	4	4
Wenner	16	5,33	5,33
Quadrático	16	16	16
Schlumberger	16	3	6,5
Dipolo-equatorial	2	2	10

Por se tratar de uma área cárstica em que feições de dissolução são comuns, como condutos, foram executados outros levantamentos além dos azimutais para averiguar a situação do terreno. Foram realizados caminhamentos elétricos de resistividade, levantamentos eletromagnéticos – EM34 e GPR.

Os caminhamentos elétricos foram feitos em duas campanhas e foram posicionados de acordo com a disponibilidade de espaço e também de acordo com a orientação das fraturas e dobras. Na primeira realizou-se três linhas de levantamento de resistividade com orientação N-S (RES1, RES2 e RES3), utilizando o arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre os eletrodos e entre as linhas de 4m e n=5, totalizando 28m de aquisição. O posicionamento das linhas foi praticamente igual às linhas de GPR de direção N-S (Figura 4.2).

Na segunda campanha, posterior, foram levantadas outras três linhas de caminhada elétrica com direções SW-NE (RES3, RES4 e RES5) de cerca de 90m de comprimento com espaçamento entre eletrodos de 1,5m, n=7 e espaçadas entre si de 12m com arranjo dipolo-dipolo (Figura 4.2).

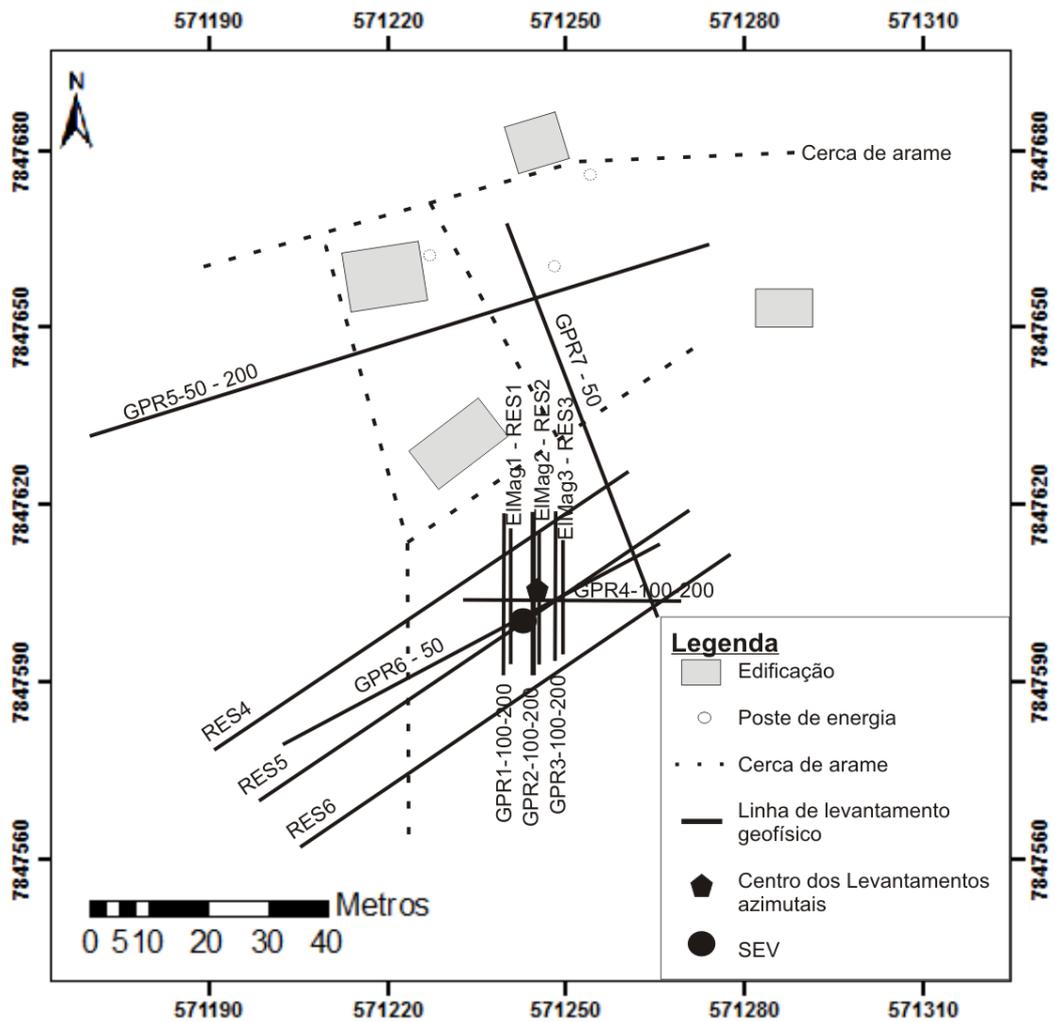


Figura 4.2: Representação esquemática da área de estudo com a localização dos levantamentos geofísicos.

Os equipamentos utilizados para os levantamentos de eletrorresistividade foram dois resistivímetros um da marca Autoenergia, modelo X5, e outro da marca ABEM, modelo SAS 1000 (Figura 4.3), com emprego de eletrodos de aço inoxidável.

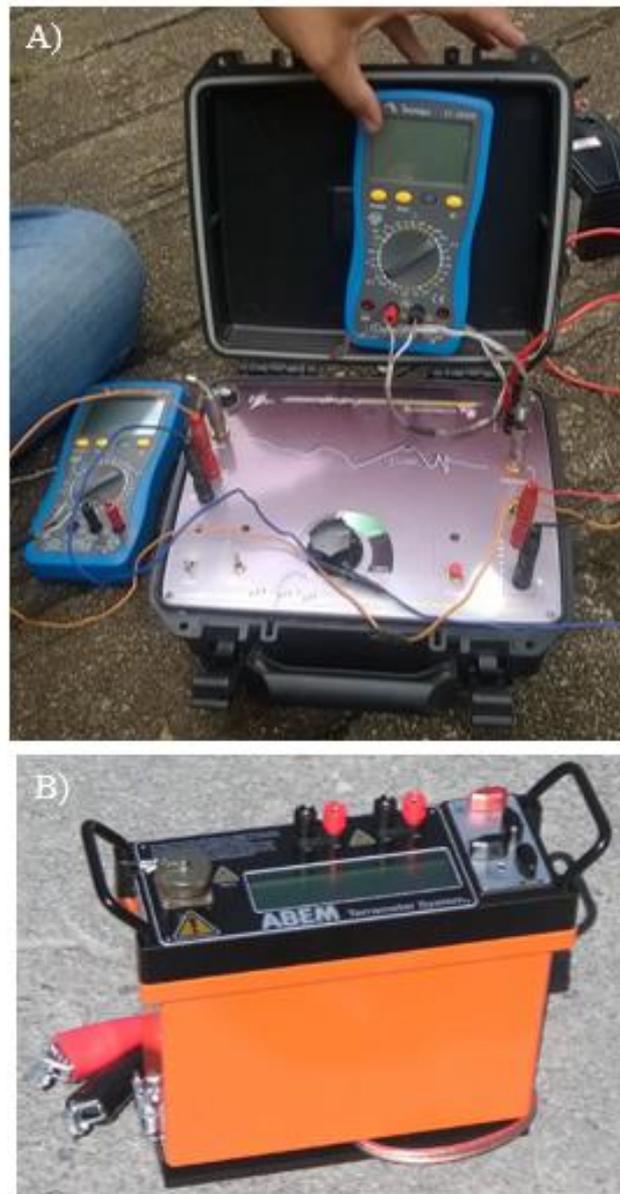


Figura 4.3: Resistivímetros: A) Autoenergia modelo X5 e B) ABEM modelo SAS 1000 (Fonte: ABEM, 2010).

Para o método eletromagnético utilizou-se o equipamento EM-34 da marca Geonics modelo 3XL, que consiste basicamente de duas bobinas (transmissora e receptora) e um processador (Figura 4.4). Foram realizadas aquisições em três linhas de direção N-S (ElMag1, ElMag2 e ElMag3), com espaçamento entre elas de 4 metros (Figura 4.2). Primeiro foram realizados os levantamentos com as bobinas nas posições horizontais (dipolo vertical - DV) e verticais (dipolo horizontal- DH), com distanciamento entre elas de 20m e frequência de 1,6KHz (Figura 4.5). Depois realizou-se mais levantamentos nas linhas ElMag1 e ElMag3 com as bobinas nas posições horizontais (DV) e verticais (DH) e, neste caso, com 10m de distanciamento entre elas e frequência de 6,4KHz (Figura 4.2).



Figura 4.4: Equipamento EM-34: A) bobinas e B) processador.

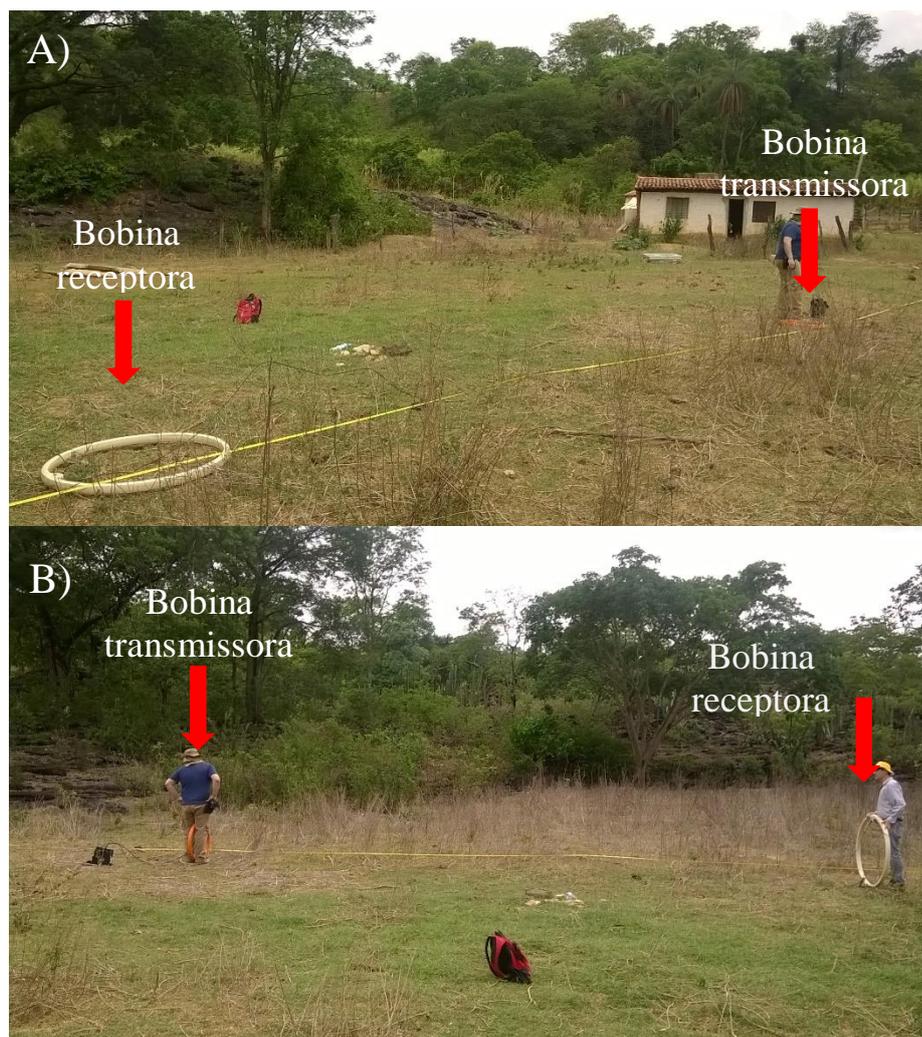


Figura 4.5: Bobinas nas duas posições A) horizontal (Dipolo Vertical –DV) e B) vertical (Dipolo Horizontal – DH).

Ressalta-se que segundo McNeill (1980) os ensaios de campo com o EM-34 possibilitam a medição das variações da condutividade elétrica nas profundidades teóricas de 7,5 metros, 15 metros e 30 metros usando-se cabos de 10 e 20 metros de comprimento, de acordo com a Tabela 4.2. Ou seja com as posições e distanciamentos entre as bobinas utilizadas nessa pesquisa será possível investigar tais profundidades.

Tabela 4.2: Relação entre distância das bobinas e profundidade teórica (Fonte: McNeill, 1980).

Posições das bobinas	Distância entre bobinas	Profundidade teórica
Verticais (DH)	10m	7,5m
Horizontais (DV)	10m	15m
Verticais (DH)	20m	15m
Horizontais (DV)	20m	30m

Para o método GPR (*Ground Penetrating Radar*) foi utilizado um equipamento Ramac, fabricado pela MalaGeoscience e três antenas de frequências 50MHz, 100MHz e 200MHz (Figura 4.6). Os levantamentos foram executados com distâncias constantes entre as antenas de 2m; 1m e 0,6m respectivamente em relação as frequências citadas. Foram duas campanhas em campo. Na primeira realizaram-se 6 levantamentos de direção N-S, sendo 3 com a antena de 100MHz (GPR1-100, GPR2-100 e GPR3-100) e, nos mesmos locais, outros 3 com a antena de 200MHz (GPR1-200, GPR2-200 e GPR3-200) (Figura 4.2). Além dessa direção também foram realizados mais 2 levantamentos de direção E-W, um com a antena de 100MHz (GPR4-100) e o outro, no mesmo local, com a antena de 200MHz (GPR4-200) (Figura 4.2). As linhas de levantamento de direção N-S foram executadas com 40m de comprimento, em média, distando 4m umas das outras. Já a de direção E-W apresentou 50m de comprimento. Na segunda campanha de campo realizaram-se outros 4 levantamentos com direções e comprimentos variados. A norte da área foram dois levantamentos de direção N60E, sobre a mesma linha, com 165m de comprimento com antenas de 50MHz (GPR5-50) e 200MHz (GPR5-200) (Figura 4.2). Na área fez-se um levantamento de 95m de comprimento na direção N45E realizado com a antena de 50MHz (GPR6-50) (Figura 4.2). Por último, na porção oeste da área levantou-se uma linha de 90m na direção N20W com a antena de 50MHz (GPR7-50) (Figura 4.2).



Figura 4.6: Equipamento de GPR, com antena de 100MHz.

4.4 TRATAMENTO DOS DADOS

O tratamento dos dados foi realizado da seguinte forma:

- os lineamentos foram traçados no Arcgis versão 9.3, plotados em gráficos do tipo roseta no programa Georient (Holcombe, 2015);
- os acamamentos foram plotados em estereograma do Openstereo (Grohmann *et al.*, 2011);
- as fraturas foram plotadas em diagrama de rosetas do Georient (Holcombe, 2015) e os dados de abertura no Excel;
- os dados de resistividade aparente referente aos levantamentos azimutais foram plotados em gráficos polares com o programa Grapher (Golden Software, 2015);
- a SEV foi invertida matematicamente com o Software IP2WIN (Bobachev, 1990 – 2003);

- os dados de resistividade aparente dos caminhamentos elétricos foram invertidos matematicamente com o *Software* RES2D-INV (Geotomo *Software*, 1995 - 2011) e plotados no *Software* SURFER (Golden *Software*, 2002), usando a interpolação vizinhos próximos;
- os dados do levantamento eletromagnético foram plotados no programa SURFER (Golden *Software*, 2002), utilizando interpolação dos vizinhos próximos, resultando em mapas e perfis;
- os dados de GPR foram interpolados no *Software* *Gradix* e o processamento de dados consistiu em: *dewow*, *declipping*, marcação do tempo zero, *time windowing*, filtragem – filtro do tipo *gaussiano*, *Fk*, migração, conversão em profundidade e em alguns radargramas, a correção de topografia.

4.5 INTERPRETAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Os diagramas polares de resistividade aparente foram correlacionados com os diagramas de rosetas dos lineamentos e das fraturas e com os gráficos de comprimento dos lineamentos e de abertura de fraturas. Objetivou-se checar se existia alguma relação entre as direções de menor resistividade com atributos estruturais.

Os dados de resistividade por caminhada elétrica, levantamento eletromagnético e GPR também foram correlacionados para estabelecer um melhor modelo para o terreno.

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo apresenta relevo plano e está limitada a leste e oeste por porções mais elevadas. Nessas porções observam-se afloramentos de rocha calcária escura pertencente à formação Sete Lagoas. Na porção sul, a um desnível de 1,5m, aproximadamente, tem-se uma lagoa que indica um possível nível freático próximo da superfície na área de levantamento. Esta lagoa possivelmente representa uma dolina e tem forte controle estrutural (Figura 5.1). Na porção norte da área de pesquisa, a aproximadamente 10m do ponto central dos levantamentos azimutais, existe uma cerca de arame, algumas edificações e três postes com fiações elétricas.

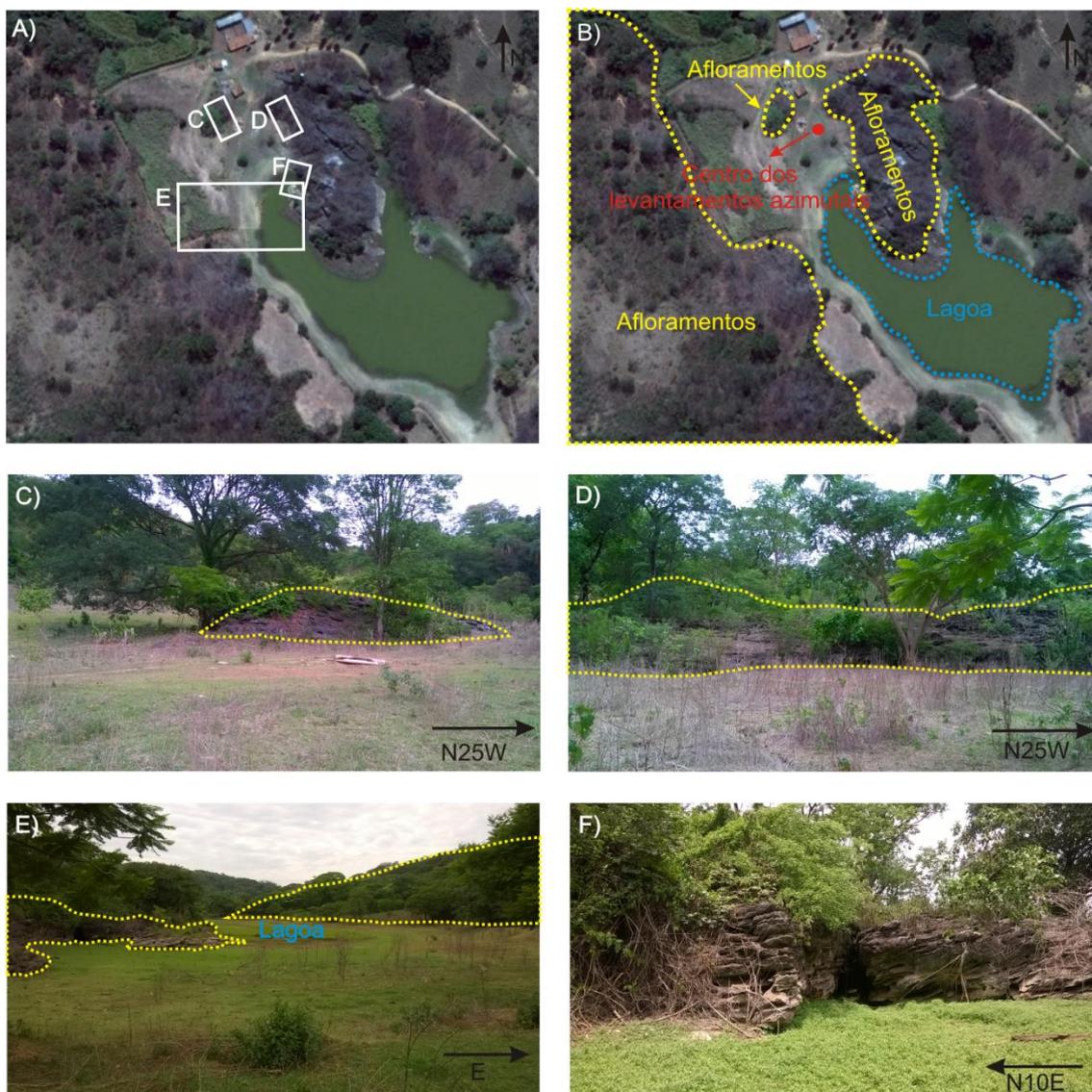


Figura 5.1: Caracterização física da área de estudo: A) Imagem Landsat da área com localização das fotografias C, D, E e F em branco; B) Áreas delimitadas pela linha tracejada em amarelo são afloramentos de calcário, área delimitada pela linha tracejada azul indica a lagoa e em vermelho a localização do centro dos levantamentos azimutais; C) Fotografia da porção leste da área mostrando os afloramentos de calcário (área delimitada pela linha tracejada amarela); D) Fotografia da porção oeste da área mostrando os afloramentos de calcário (área delimitada pela linha tracejada amarela); E) Fotografia da porção sul da área mostrando a lagoa e porções que apresentam afloramento de calcário (realçadas pela linha tracejada amarela) e F) Fotografia realçando o calcário negro com fratura subvertical de direção N35W com abertura métrica ao centro.

5.2 ANÁLISE DOS SENSORES REMOTOS

Este item apresenta o resultado das análises estatísticas às quais foram submetidos os dados de lineamentos gerados para cada tipo de imagem de sensores remotos como citado no capítulo de Materiais e métodos.

5.2.1 Imagem radar (SRTM)

Com a imagem de SRTM é possível notar que próximo à área de aquisições geofísicas existem lineamentos de direção NW bastante evidentes e secundariamente tem-se alguns de direção NE. Além desses, há um lineamento expressivo a, aproximadamente, 2km a norte da área de direção E-W (Figura 5.2).

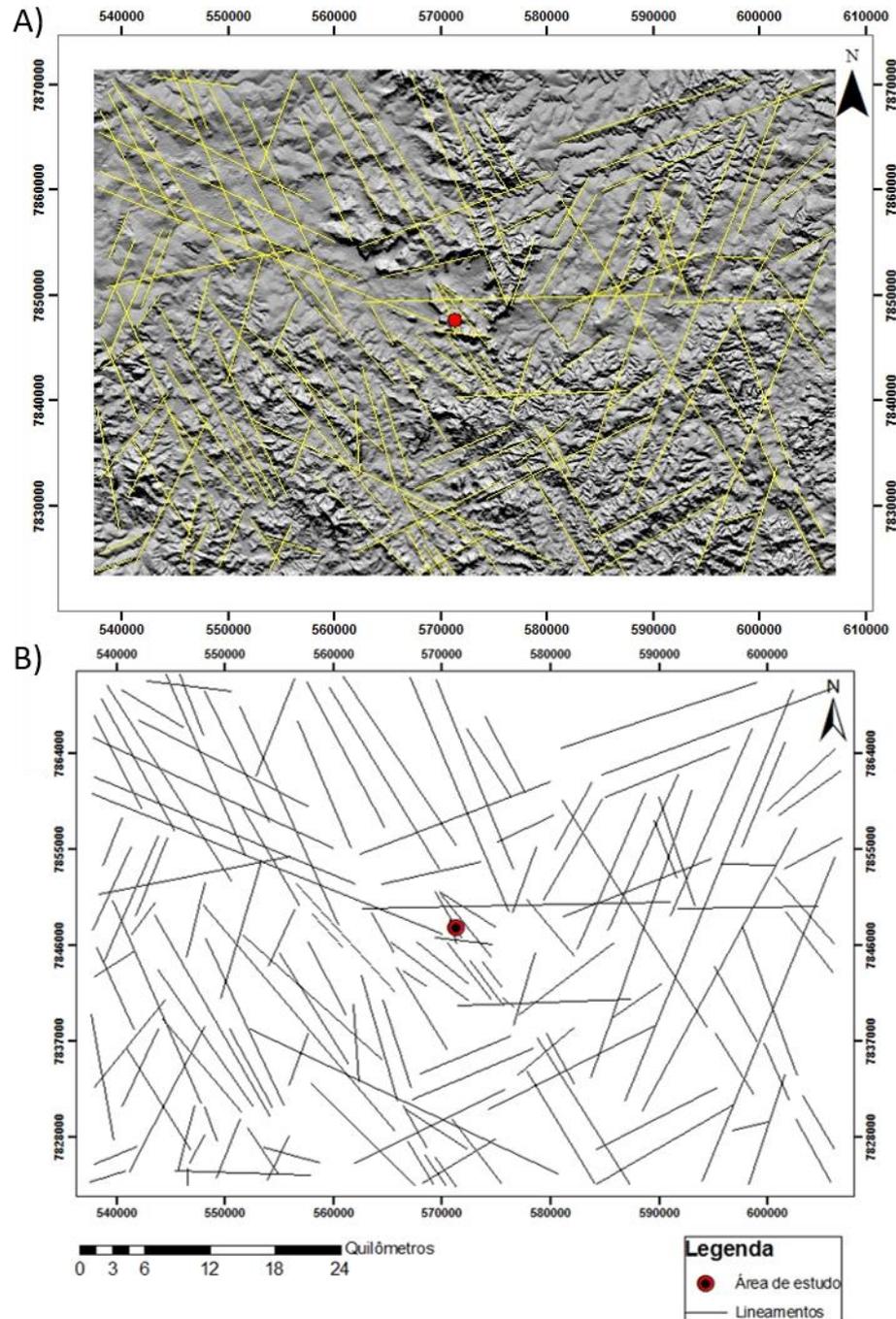


Figura 5.2: Lineamentos traçados na imagem de radar A) com a imagem ao fundo e B) sem a imagem.

No diagrama de rosetas foram identificados três grupos preferenciais (N30W, N30E e N70E) (Figura 5.3A). O grupo N30W apresentou maior número de medidas, com 35% do total de lineamentos, enquanto os grupos N30E e N70E constituíram 17% e 13% do total, respectivamente (Figura 5.3B). Analisando os lineamentos com relação aos comprimentos percebe-se que não existe uma grande variação entre dos valores de acordo com o azimuth, ou seja estatisticamente os valores são similares. O maior dos lineamentos apresenta direção N23E e tem comprimento de 42.500m. (mostrado por uma seta vermelha na Figura 5.3C).

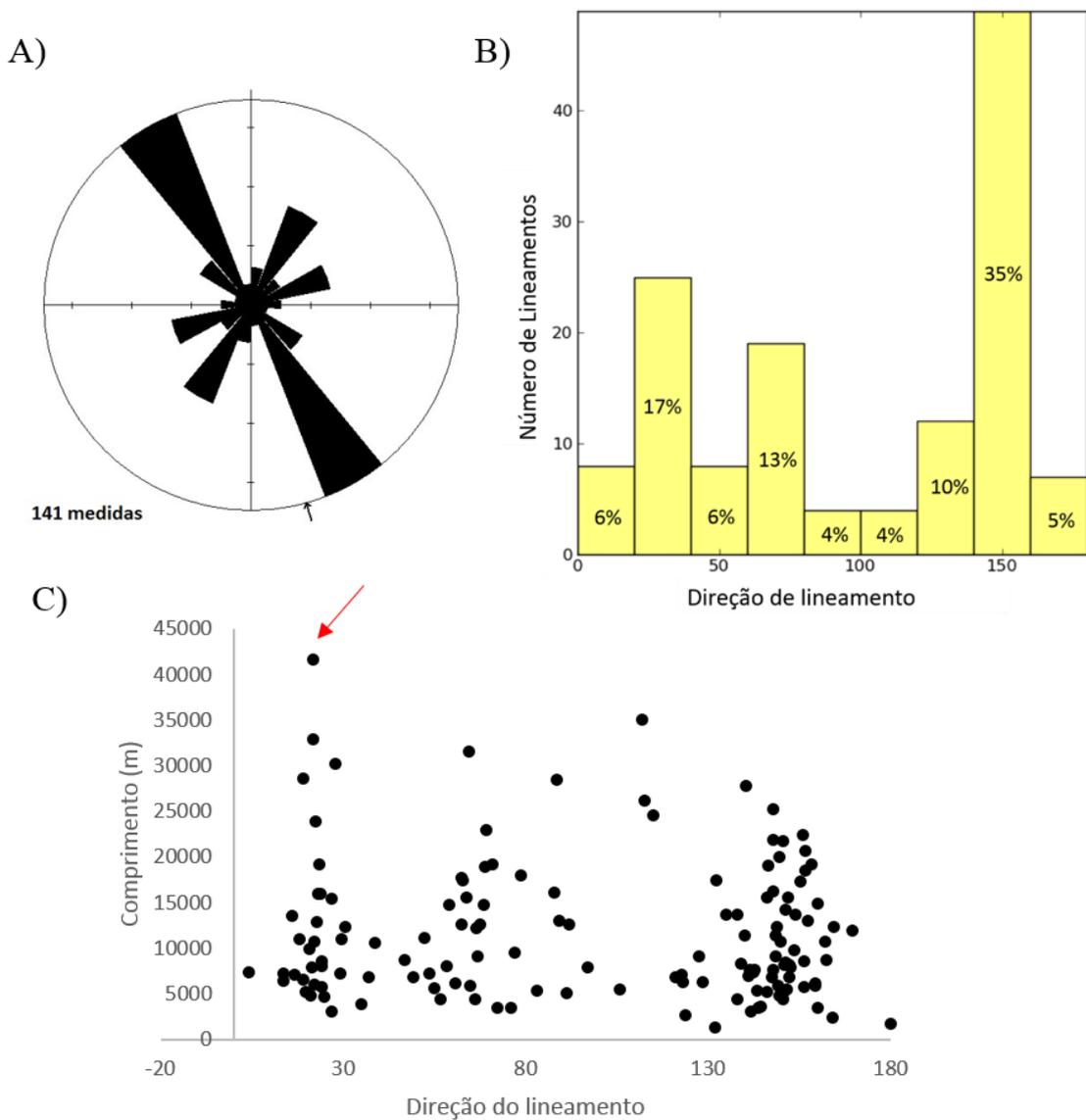


Figura 5.3: Análise dos lineamentos traçados a partir de imagem de radar: A) Diagrama de roseta com os azimuths dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada azimuth e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimuth.

5.2.2 Fotos aéreas

Os lineamentos traçados a partir das fotografias aéreas foram divididos em duas partes, uma referente às drenagens e outra referente aos lineamentos morfoestruturais. Como a escala das fotos aéreas é maior que a da imagem de radar as análises dos lineamentos apresentam maior detalhe em relação à análise anterior.

Os lineamentos de drenagem mais próximos a área apresentam direção NW predominantemente, mas também se observam lineamentos menos expressivos, na direção NE (Figura 5.4).

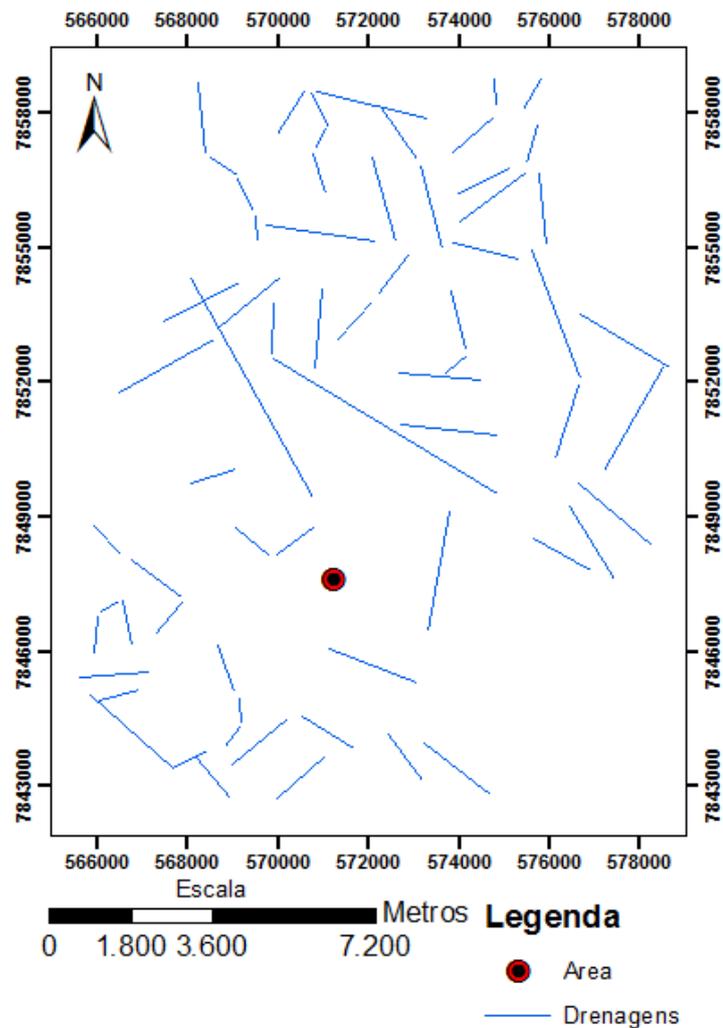
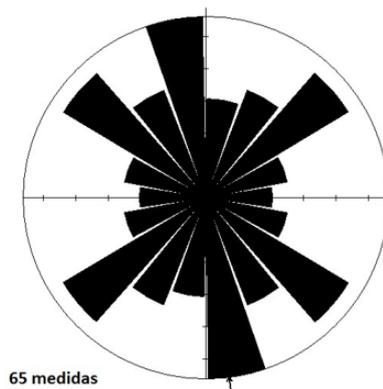


Figura 5.4: Lineamentos de drenagem.

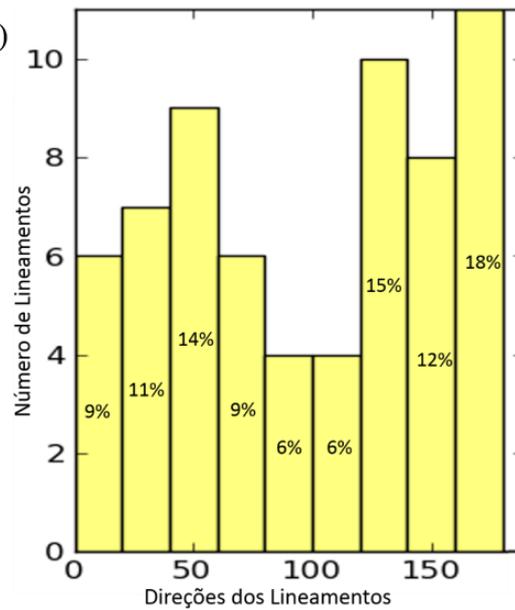
Plotando-se os lineamentos de drenagem no diagrama de rosetas percebe-se que de uma forma geral predominam lineamentos no quadrante noroeste, com bastante dispersão. A direção N10W predomina em relação as demais (Figura 5.5A), representando 18% das medidas totais (Figura 5.5B). Logo após tem-se as direções N50W e N50E, constituindo, respectivamente, 15% e 14% do total de medidas (Figura 5.5B).

Analisando o gráfico da Figura 5.5C, observa-se que existem dois lineamentos que se destacam dos demais por terem comprimentos bem maiores, o da direção N60W, com 5.783m, mostrado pela seta vermelha, e o outro de direção N30W, com 5613m, mostrado pela seta azul. Mas por serem apenas dois lineamentos, não há indicação de uma tendência.

A)



B)



C)

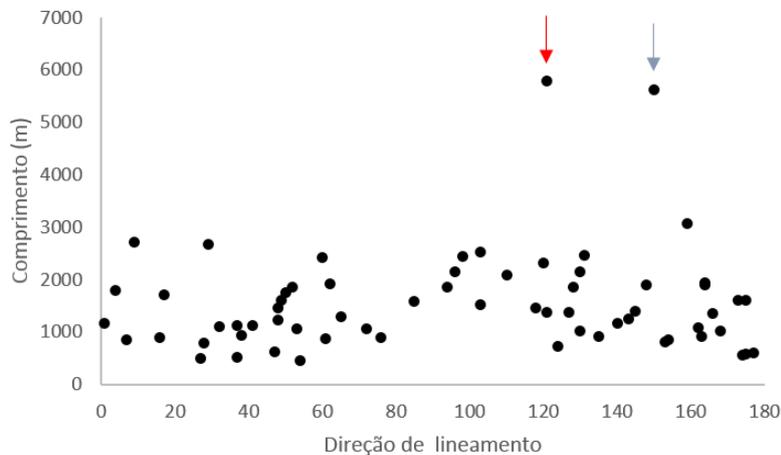


Figura 5.5: Análise dos lineamentos de drenagens traçados a partir de fotos aéreas: A) Diagrama de roseta com as direções dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada direção e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.

Analisando-se os lineamentos morfoestruturais a partir das fotos aéreas observa-se um lineamento cortando a área de levantamento com direção NNW e ao redor da área outros lineamentos NW e NE (Figura 5.6).

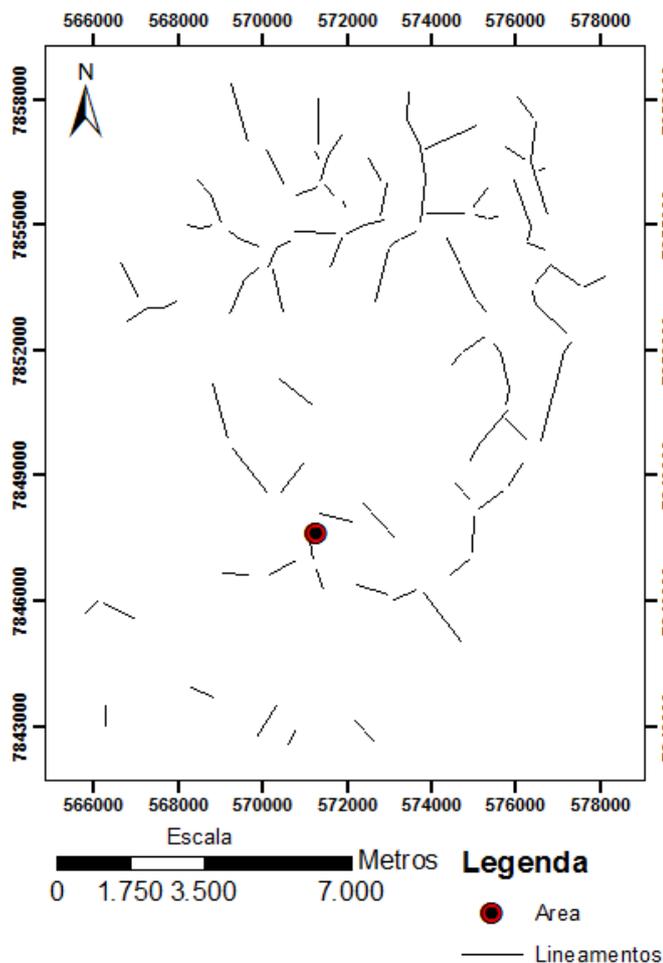


Figura 5.6: Lineamentos morfoestruturais

Com base no diagrama de rosetas observa-se uma maior tendência dos lineamentos de direção N30W (Figura 5.7A) e em segundo lugar os de direções N35E e N65E. Essa tendência N30W é reafirmada no gráfico da Figura 5.7B que mostra um maior número de medidas em tal direção representando 16% do total. Porém, ressalta-se que tanto no diagrama de rosetas como no gráfico mencionado há uma grande dispersão dos dados.

Observando o gráfico da Figura 5.7C nota-se que a distribuição dos lineamentos quanto ao comprimento é similar nos vários azimutes, não tendo, desta forma, significado

estatístico. Os maiores valores de comprimento dos lineamentos estão em torno de 1.500m.

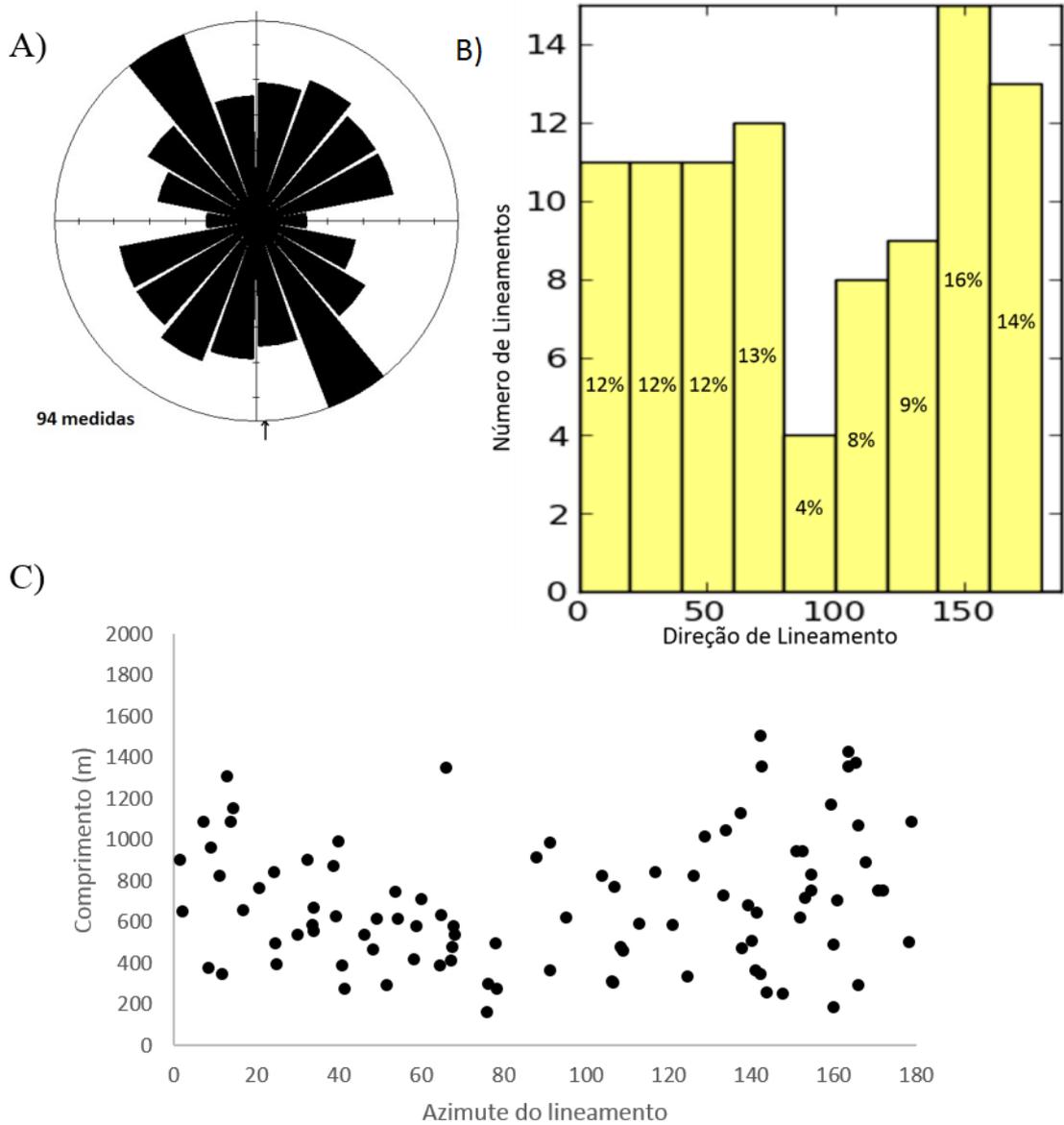


Figura 5.7: Análise dos lineamentos morfoestruturais traçados a partir de fotos aéreas: A) Diagrama de roseta com as direções dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada direção e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.

5.2.3 Imagem de Satélite (*Landsat*)

As imagens foram retiradas do sítio do *GOOGLE EARTH* que foram capturadas pelo satélite *Landsat 8*, da *NASA*. A escala espacial da imagem de satélite escolhida (1:10.000) foi maior que as demais objetivando uma análise mais local. Observa-se que na área de levantamento existem lineamentos de direção NW e alguns NE (Figura 5.8 e Figura 5.9).

Inclusive dois desses lineamentos NW controlam o direcionamento da dolina presente na porção meridional da área de estudo (Figura 5.9). Na Figura 5.9 é possível observar outros lineamentos, traçados em amarelo, de direção NW que não foram vistos na Figura 5.8 devido à escala de trabalho.

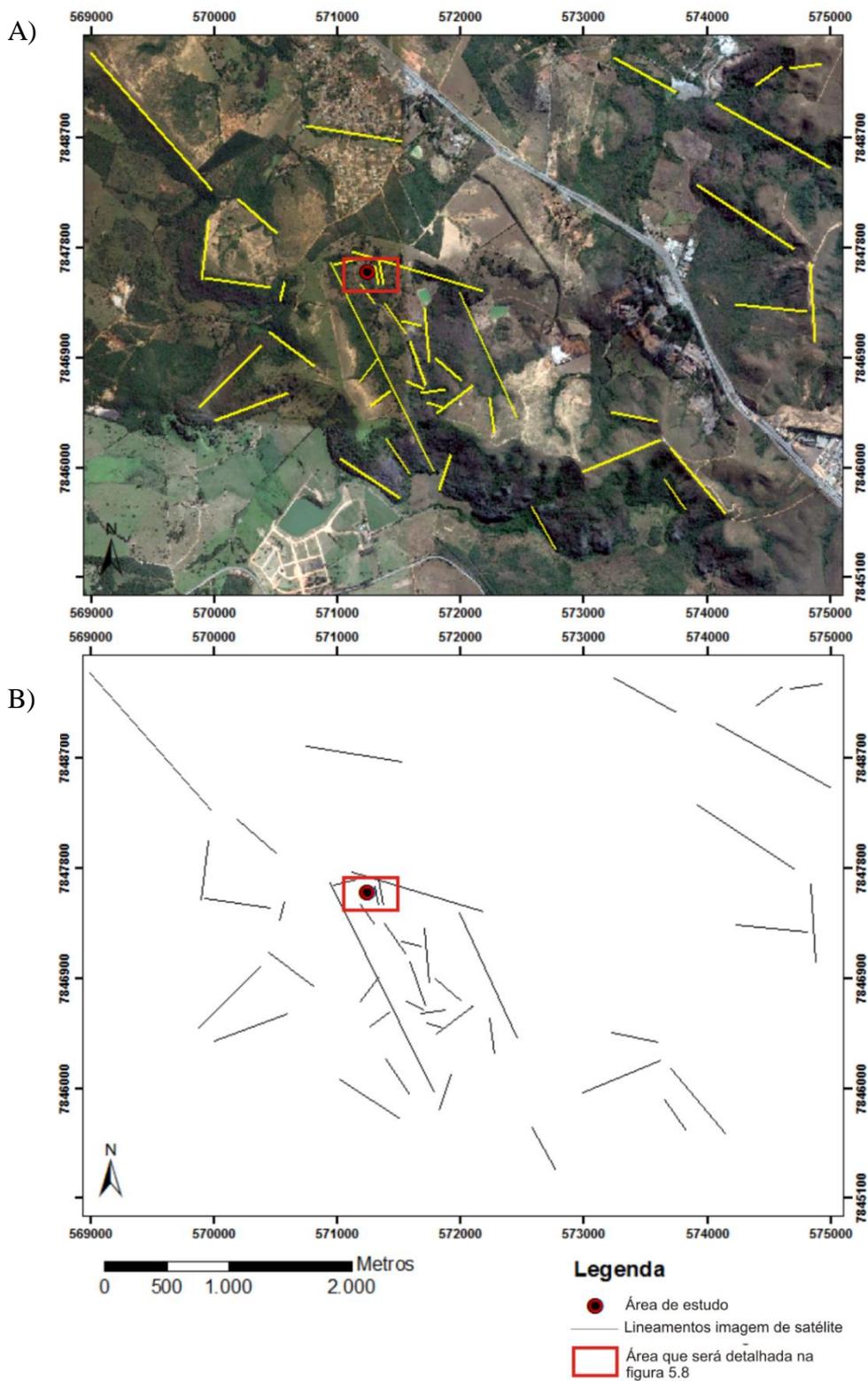


Figura 5.8: Lineamentos traçados na imagem de satélite: A) ao fundo a imagem utilizada e B) sem a imagem.

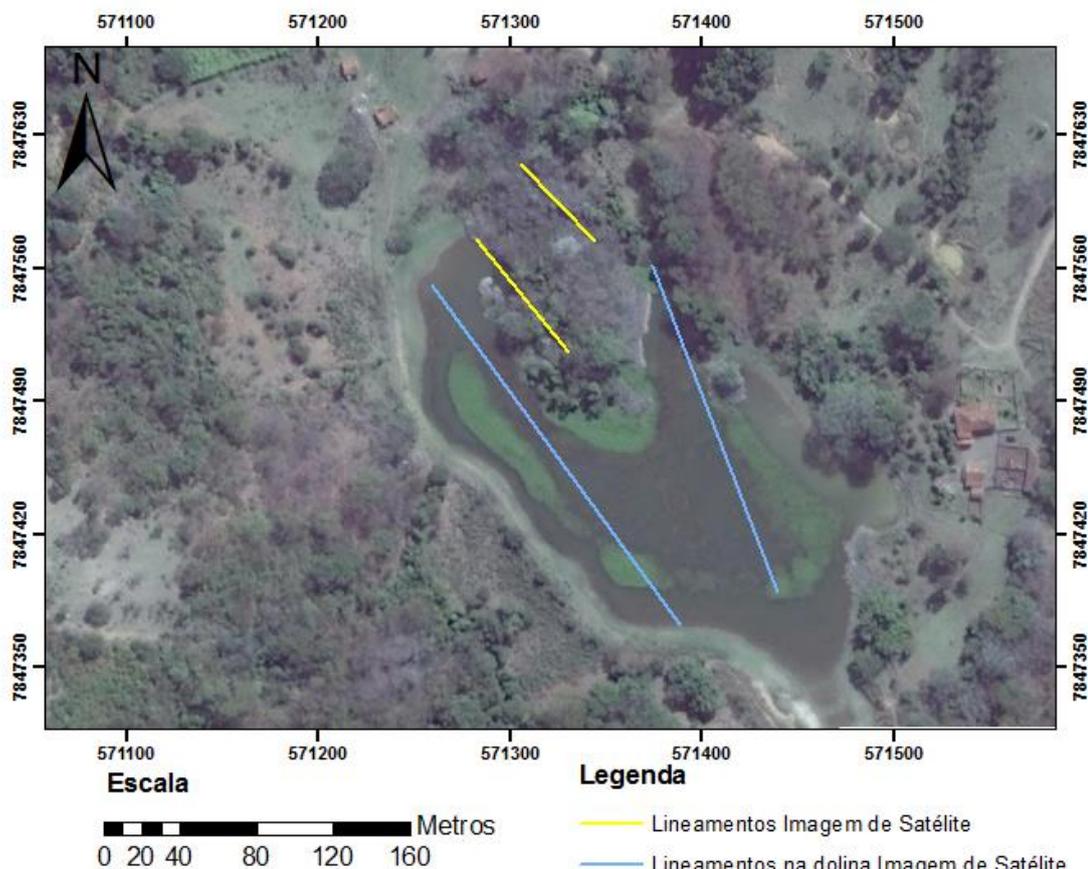


Figura 5.9: Imagem Landsat ressaltando dois lineamentos identificados na figura 5.8 relacionados ao direcionamento das ramificações da dolina.

Pelo diagrama de rosetas nota-se que as principais direções de lineamentos são N30W e N50W (Figura 5.10A) correspondendo a 19% e 16%, respectivamente das medidas totais (Figura 5.10B). Mas também nota-se que há uma grande dispersão dos dados no quadrante NW.

De forma geral os lineamentos com azimute entre 90° e 180° apresentam valores de comprimento maiores que os demais (lineamentos delimitados pelo retângulo azul na Figura 5.10C). O lineamento com maior valor de comprimento está na direção N30W alcançando 1.905m (ressaltado por uma seta vermelha na Figura 5.10C).

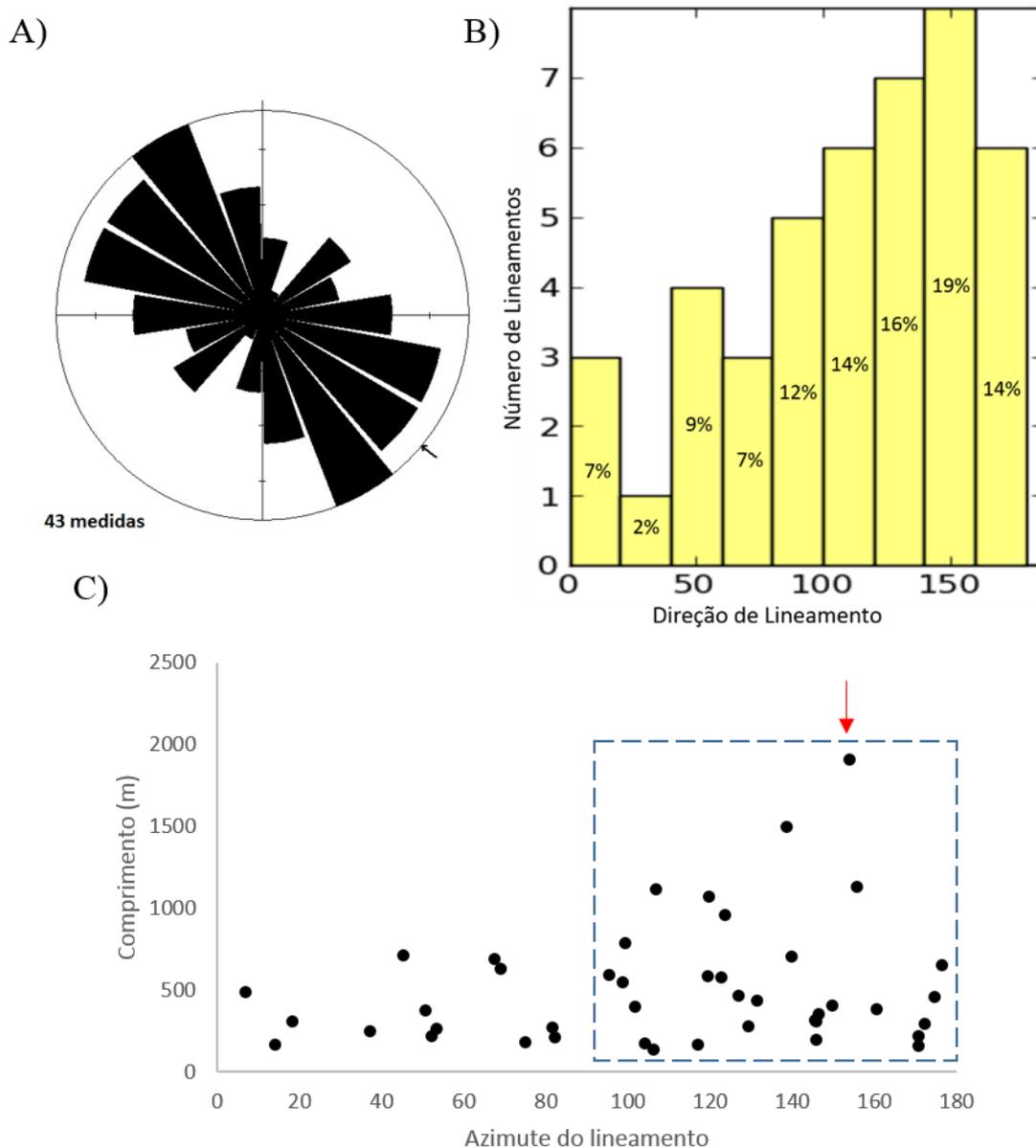


Figura 5.10: Análise dos lineamentos traçados a partir de imagem de satélite: A) Diagrama de roseta com as direções dos lineamentos, B) Gráfico mostrando o número de lineamentos em cada direção e C) Gráfico mostrando a distribuição dos lineamentos em relação ao comprimento e azimute.

5.3 LEVANTAMENTO ESTRUTURAL DE CAMPO

5.3.1 Acamamentos

O acamamento dos calcários aflorantes, próximos à área de levantamento, é sub-horizontal e afetado por suave dobramento que pode ser visto tanto em escala de afloramento (Figura 5.11), como em uma escala maior mostrada no estereograma (Figura 5.12).

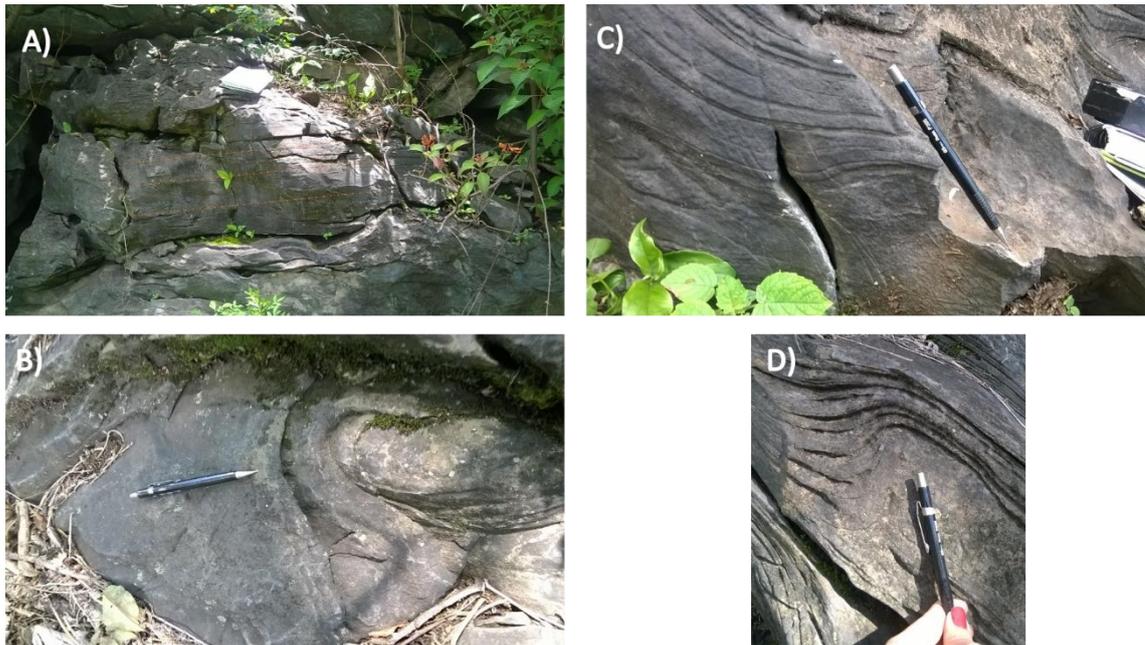


Figura 5.11: Fotos dos afloramentos de calcário presentes na área: A) Acamamento subhorizontalizado, B) Acamamento dobrado com lapiseira na zona de charmeira, C) Dobra suave e D) Acamamento dobrado.

Com a interpretação do estereograma observa-se que o eixo desta dobra suave tem direção N28W e ângulo de mergulho de 2° (representado por uma estrela na Figura 5.12). Os flancos apresentam atitudes médias de 33/10 e 230/16.

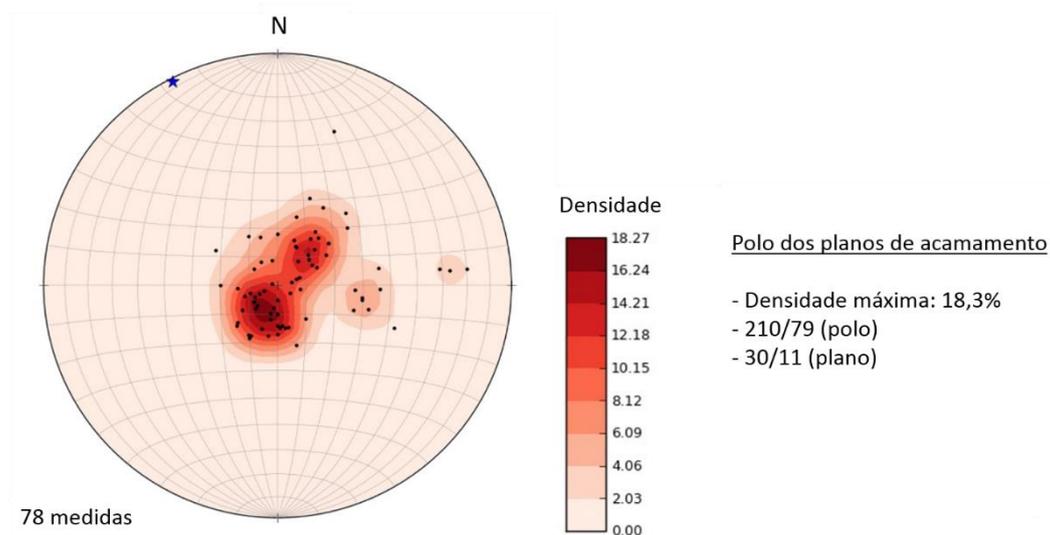


Figura 5.12: Estereograma com as medidas de acamamentos mostrando um dobramento suave com eixo sub-horizontal na direção NW representado por uma estrela.

5.3.2 Fraturas

As fraturas são estruturas rúpteis que facilitam a passagem de água no maciço rochoso e, no caso dos calcários, facilitam as dissoluções e consequente formação de condutos.

No total foram realizadas em campo, num raio de aproximadamente 100m dos levantamentos geofísicos, 114 medidas de fraturas (Figura 5.13). A maioria destas são subverticais (com mergulhos maiores que 70°) (Figura 5.14) e apenas 4 subhorizontais (paralelas ao acamamento).

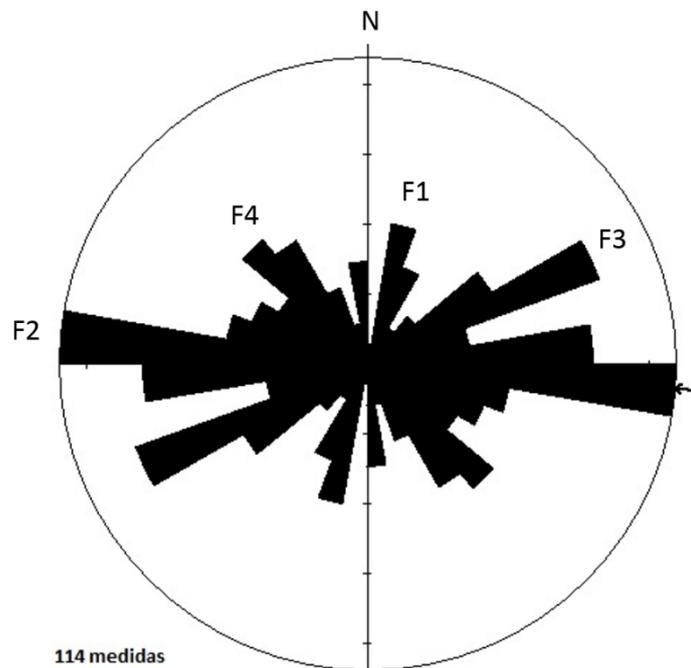


Figura 5.13: Diagrama de roseta com as medidas das fraturas.



Figura 5.14: Fotos de afloramentos de calcário na área de estudo mostrando: A) fratura sub-vertical, B e C) fraturas sub-verticais com aberturas acima de 0,5m.

Embora haja grande dispersão nas medidas das fraturas, nota-se 4 direções preferenciais: N15E, N85W, N65E e N45W, denominadas, respectivamente, F1, F2, F3 e F4. Fazendo uma análise conjunta do diagrama de rosetas (Figura 5.13) e do histograma representado na Figura 5.15 é possível perceber que:

- A família F1 representa 17% do total de fraturas (19 medidas), a menor concentração.
- Já a família F2 tem a maior concentração de fraturas, apresentando 42 medidas, 37% do total.
- As fraturas pertencentes a família F3 totalizam 29 medidas, 25 % do total.
- E por último tem-se a família F4, com número de fraturas próxima ao da família F3, totalizando 24 medidas, 21% do total.

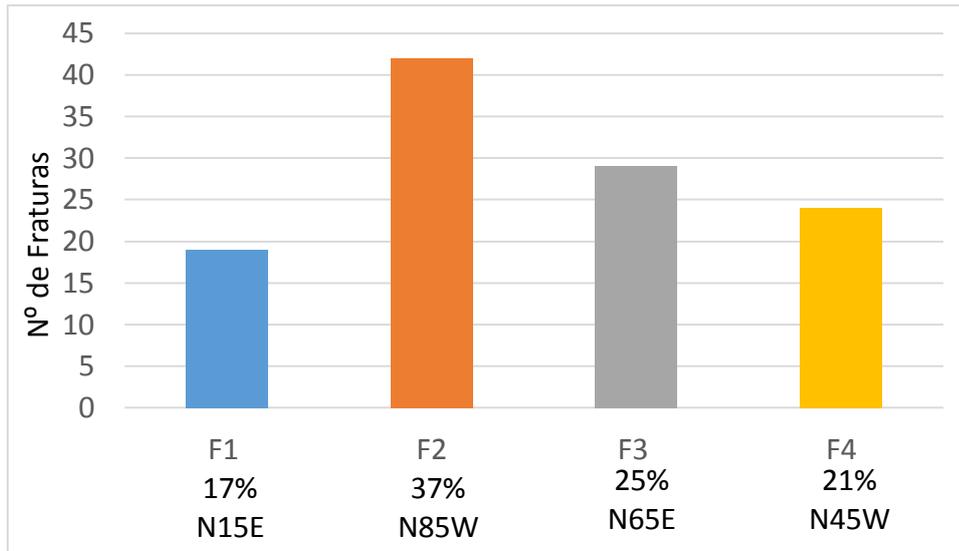


Figura 5.15: Histograma de representação das direções das famílias de fraturas e suas respectivas porcentagens.

Para uma análise da distribuição das aberturas das quatro famílias de fraturas foi feito um histograma (Figura 5.16).

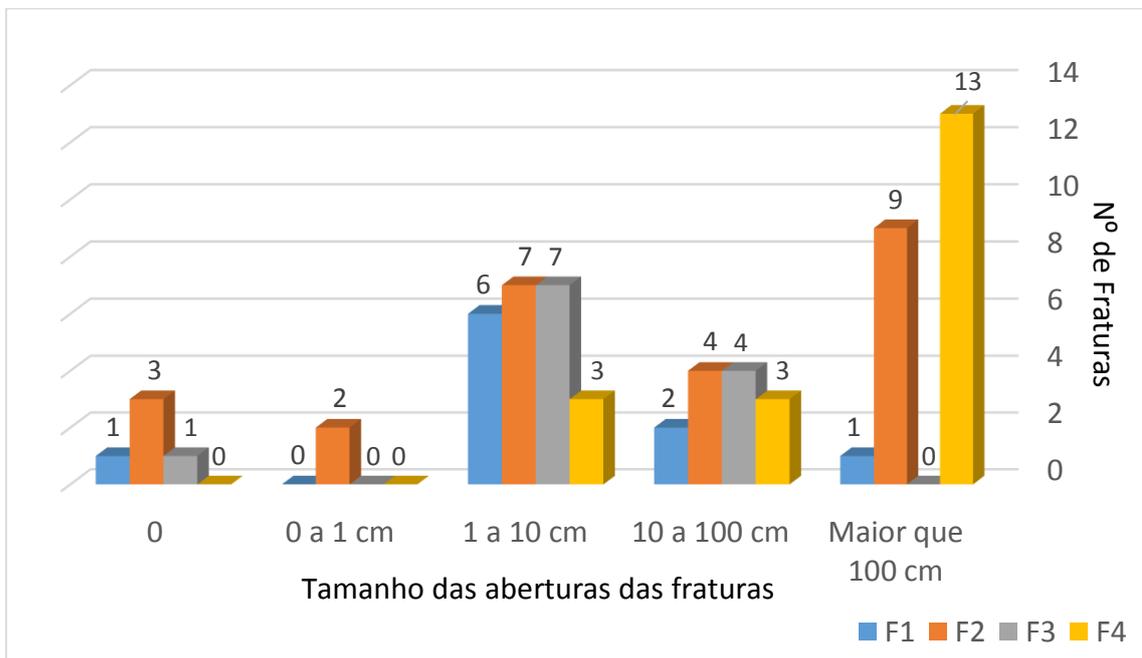


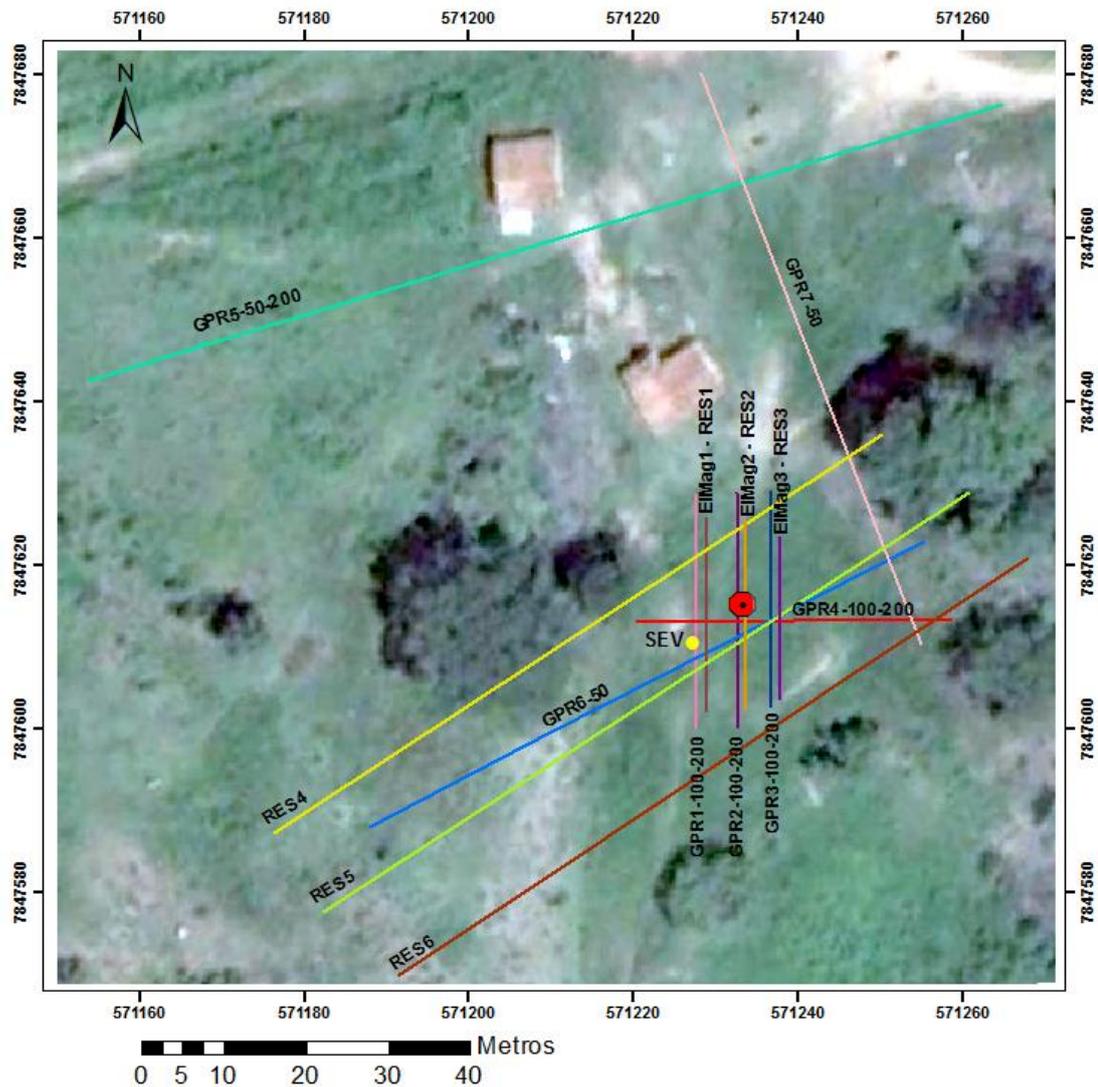
Figura 5.16: Histograma mostrando as classes de abertura para as famílias de fraturas encontradas na área.

De uma forma geral, a maioria das fraturas da área mostra-se como cavernosas (>100cm), extremamente largas (10 a 100cm) ou muito largas (1 a 10cm) (Tabela 3.1). A família F4 (N45W) é a que se apresenta mais aberta, com predomínio de fraturas cavernosas, secundada pela família F2 (N85W).

Esses dados de caracterização das fraturas serão correlacionados mais a frente com os dados de lineamentos e com os dados geofísicos.

5.4 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

Os levantamentos geofísicos foram dispostos de tal forma que abrangessem a área como um todo (Figura 5.17), procurando-se evitar feições naturais e antrópicas, como cercas e construções.



Legenda

- Centro: Centro dos levantamentos azimutais
- SEV
- EIMag1 - RES1: Linha 1 dos levantamentos com os métodos eletromagnético e resistividade
- EIMag2 - RES2: Linha 2 dos levantamentos com os métodos eletromagnético e resistividade
- EIMag3 - RES3: Linha 3 dos levantamentos com os métodos eletromagnético e resistividade
- RES4: Linha 4 do levantamento com método de resistividade
- RES5: Linha 5 do levantamento com método de resistividade
- RES6: Linha 6 do levantamento com método de resistividade
- GPR1-100-200: Linha 1 do levantamento com GPR com as antenas de 100 e 200MHz
- GPR2-100-200: Linha 2 do levantamento com GPR com as antenas de 100 e 200 MHz
- GPR3-100-200: Linha 3 do levantamento com GPR com as antenas de 100 e 200 MHz
- GPR4-100-200: Linha 4 do levantamento com GPR com as antenas de 100 e 200 MHz
- GPR5-50-200: Linha 5 do levantamento com GPR com as antenas de 50 e 200 MHz
- GPR6-50: Linha 6 do levantamento com GPR com a antena de 50 MHz
- GPR7-50: Linha 7 do levantamento com a antena de 50 MHz

Figura 5.17: Orientação das linhas de levantamento geofísico.

5.4.1 Método de Eletrorresistividade

SEV

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) objetivou caracterizar as unidades da área de pesquisa com relação a resistividade e a profundidade da zona saturada (Figura 5.18).

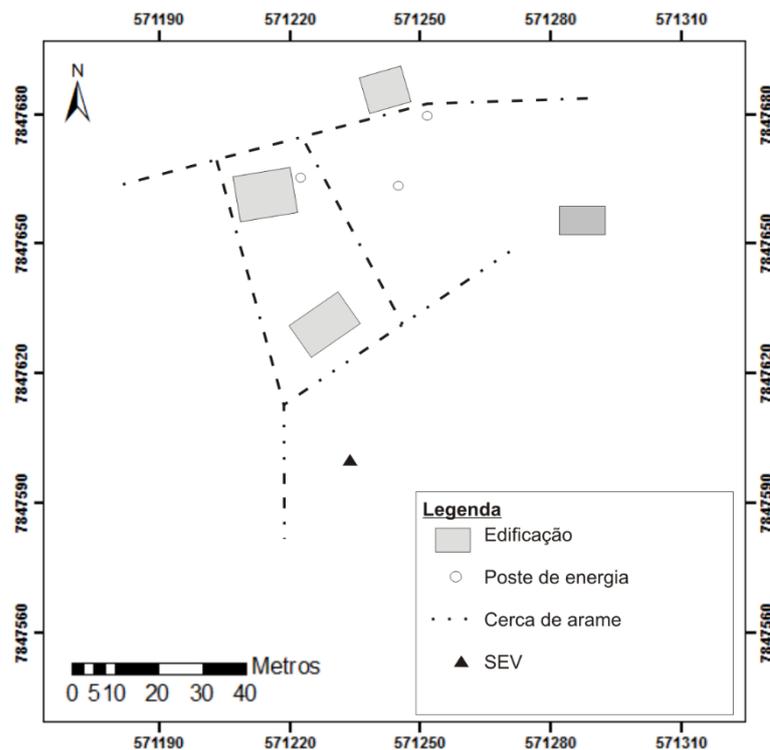


Figura 5.18: Representação esquemática da área de estudo com a localização da SEV.

A Figura 5.19 apresenta o resultado da inversão dos dados da SEV obtidos com o programa IPI2win (Bobachev, 1990 -2003). O gráfico (resistividade aparente versus $AB/2$) apresenta os dados de campo (pontos) sobrepostos pela linha contínua vermelha que equivale à resposta do modelo geológico teórico (em termos de resistividade aparente) e a linha azul representa o modelo de resistividade das camadas.

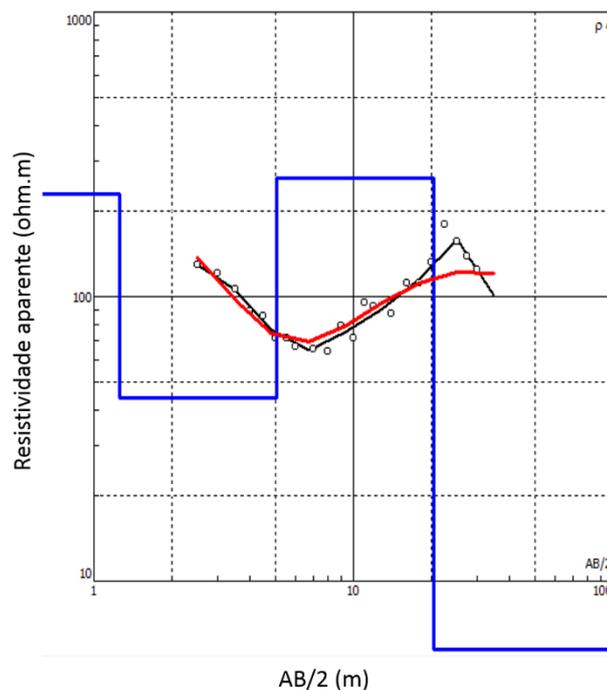


Figura 5.19: Modelo geoeétrico para a SEV realizada.

Com a inversão da SEV foram identificadas quatro unidades com as respectivas resistividades aparentes, espessuras e profundidades (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Parâmetros das camadas do modelo invertido da SEV.

Camada	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade (m)
1	230	1,3	0 - 1,3
2	44,2	3,8	1,3 - 5,1
3	261	15,4	5,1 - 20,5
4	5,1	?	20,5 - ?

Caminhamentos Elétricos

Optou-se por apresentar os dados de acordo com a ordem das campanhas de campo, ou seja, primeiramente os levantamentos de direção N-S (RES1, RES2 e RES3) e secundariamente os de direção SW-NE (RES4, RES5 e RES6).

Os dados de resistividade aparente adquiridos com a técnica de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo, foram invertidos com o programa RES2DInv (Geotomo Software,

1995 – 2011) e plotados na forma de perfis e mapas para se ter um melhor entendimento das anomalias tanto em profundidade como em área. Na inversão dos dados provenientes das linhas de aquisição de direção NS obteve-se um erro relativamente alto (Figura 5.21). Isso deve-se ao fato de ter poucos dados de resistividade para a confecção dos perfis, ou seja, os pontos de leitura de resistividade coletados em campo ficaram espaçados resultando em uma maior imprecisão na interpolação entre esses pontos.

A Figura 5.20 mostra a disposição das linhas de levantamento RES1, RES2 e RES3 na área de estudo.

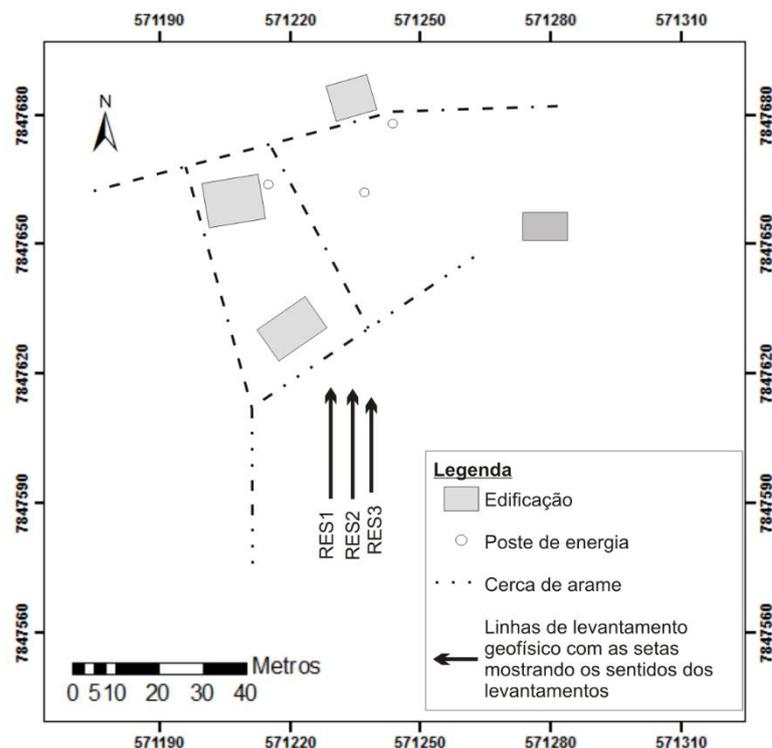


Figura 5.20: Representação esquemática da área de estudo com a localização das linhas de levantamento RES1, RES2 e RES3.

Os perfis de direção N-S, de uma forma geral, mostram valores de baixa resistividade próximo a superfície e alta resistividade em profundidades, entre 2,7 a 4,7m (Figura 5.21). No perfil mais a oeste, RES1 (Figura 5.21A), nota-se que a anomalia de mais alta resistividade situa-se na parte central (entre 2,7 e 5,88m de profundidade). Já no perfil central, RES2 (Figura 5.21B), esta anomalia fica mais profunda dando espaço para uma parte pouco resistiva concentrada na parte central, entre a distância 8 e 21m. Por último,

no perfil mais a leste, RES3 (Figura 5.21C), a anomalia de alta resistividade já quase não aparece, ficando restrita a uma porção mais profunda na direção norte, distância 24m, enquanto as anomalias de mais baixa resistividade apresentam-se rasas nas porções sul e norte, distâncias de 8 e 26m, respectivamente.

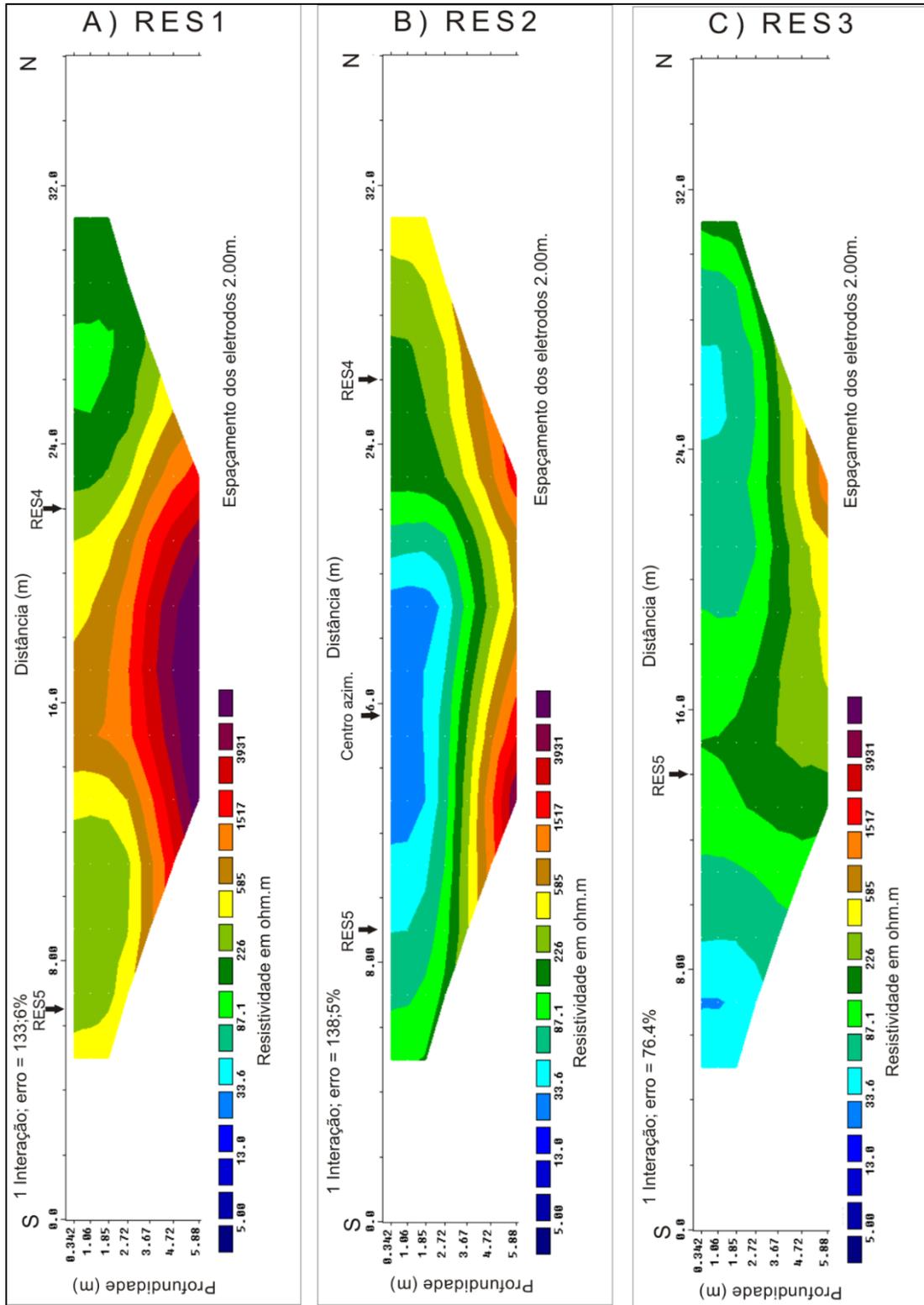


Figura 5.21: Perfis de eletrorresistividade de direção N-S: A) RES1, B) RES2 e C) RES3.

Os mapas de eletrorresistividade subparalelos à superfície foram obtidos por interpolação pelo método vizinho natural a partir dos dados de resistividade gerados pelo programa RES2DInv (Geotomo *Software*, 1995 – 2011). Foram obtidos desta forma mapas nas profundidades 0,3; 1,1; 1,9; 2,7; 3,7; 4,7 e 5,9m. Os mapas mostram uma anomalia resistiva (valores maiores que 585 ohm.m) na porção oeste da área (posição $y = 14$ até 22m e $x = 0$ até 4m) em todas as profundidades e outra um pouco menos resistiva na porção norte (Figura 5.22). A anomalia da porção oeste cresce em área com o aumento da profundidade e muda sua forma tendendo a se alongar segundo a direção NW na profundidade de 5,9m. Uma anomalia de baixa resistividade (aproximadamente 50 ohm.m) está presente na porção central com direção N-S, aproximadamente, tendendo a NW na parte sul da área. Tal anomalia está presente até a profundidade de 2,7m, e a partir deste nível a área torna-se mais resistiva.

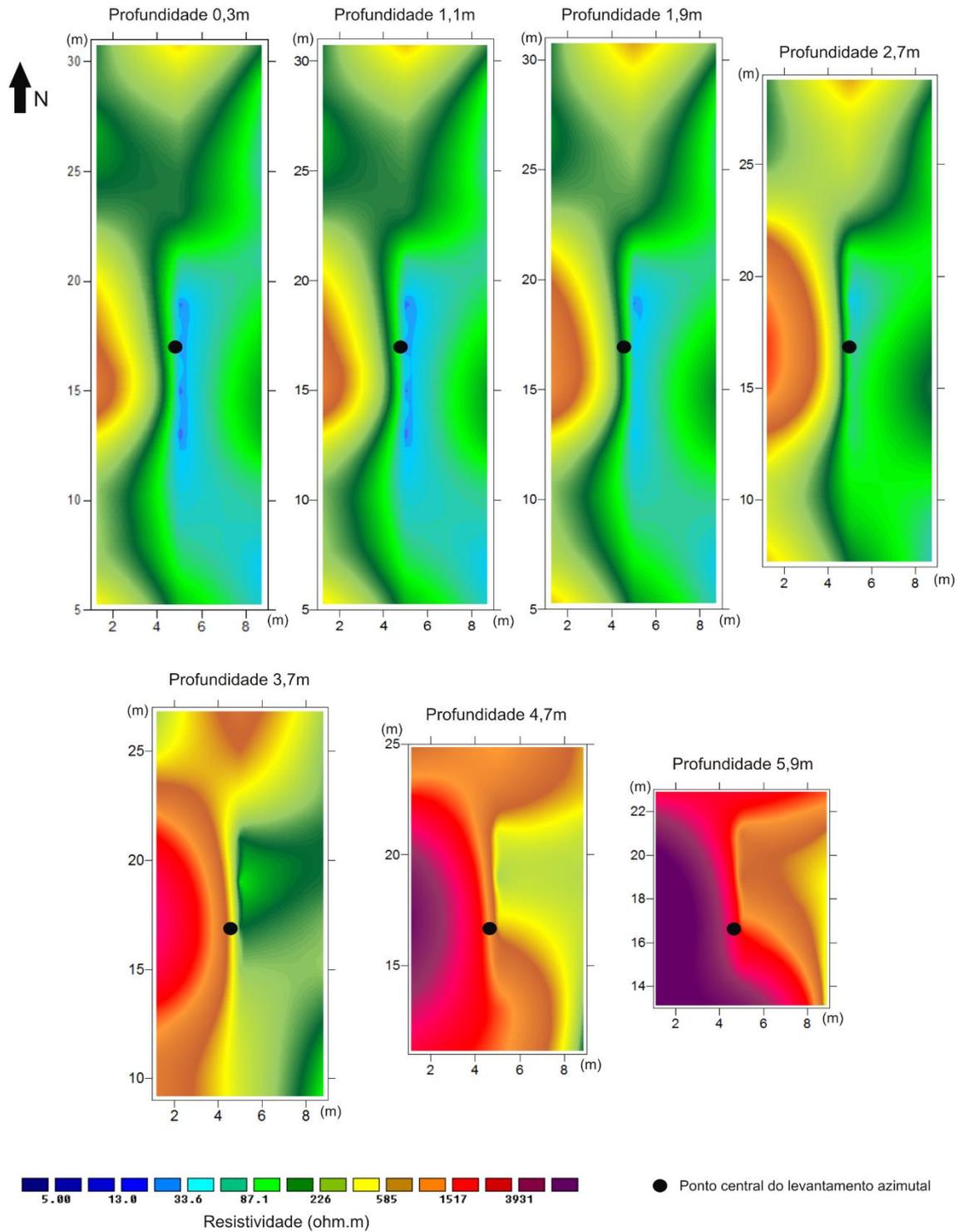


Figura 5.22: Mapas de eletrorresistividade gerados a partir dos caminhamentos de direção N-S.

A distribuição das linhas de levantamento da segunda campanha de campo (RES4, RES5 e RES6) é apresentada na Figura 5.23.

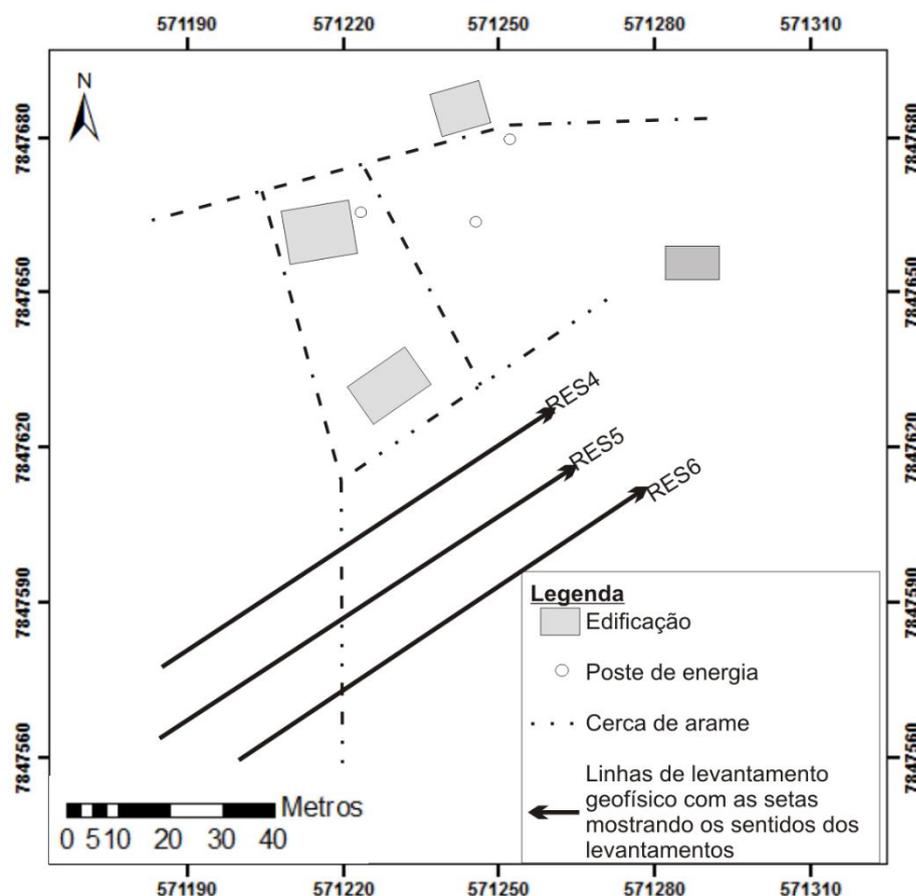


Figura 5.23: Representação esquemática da área de estudo com a localização das linhas de levantamento RES4, RES5 e RES6.

Os perfis de eletrorresistividade com direção SW-NE, de forma geral, apresentam baixa resistividade (<50 ohm.m). No perfil mais a norte, RES4 (Figura 5.24A), notam-se duas anomalias de alta resistividade (>585 ohm.m): uma entre as distâncias 5,3 e 12,1m e a outra na extremidade NE do perfil, sendo que esta primeira anomalia é descontínua em maiores profundidades. No perfil intermediário, RES5 (Figura 5.24B), a anomalia de alta resistividade central praticamente desaparece, restando apenas a outra anomalia da extremidade NE apresentando-se em maior profundidade. Por último, no perfil mais a sul, RES6 (Figura 5.24C), nota-se que a anomalia de alta resistividade da extremidade NE fica mais rasa se comparada aos demais perfis. Além disso, a anomalia de baixa resistividade, citada anteriormente, nesse perfil apresenta-se bem maior.

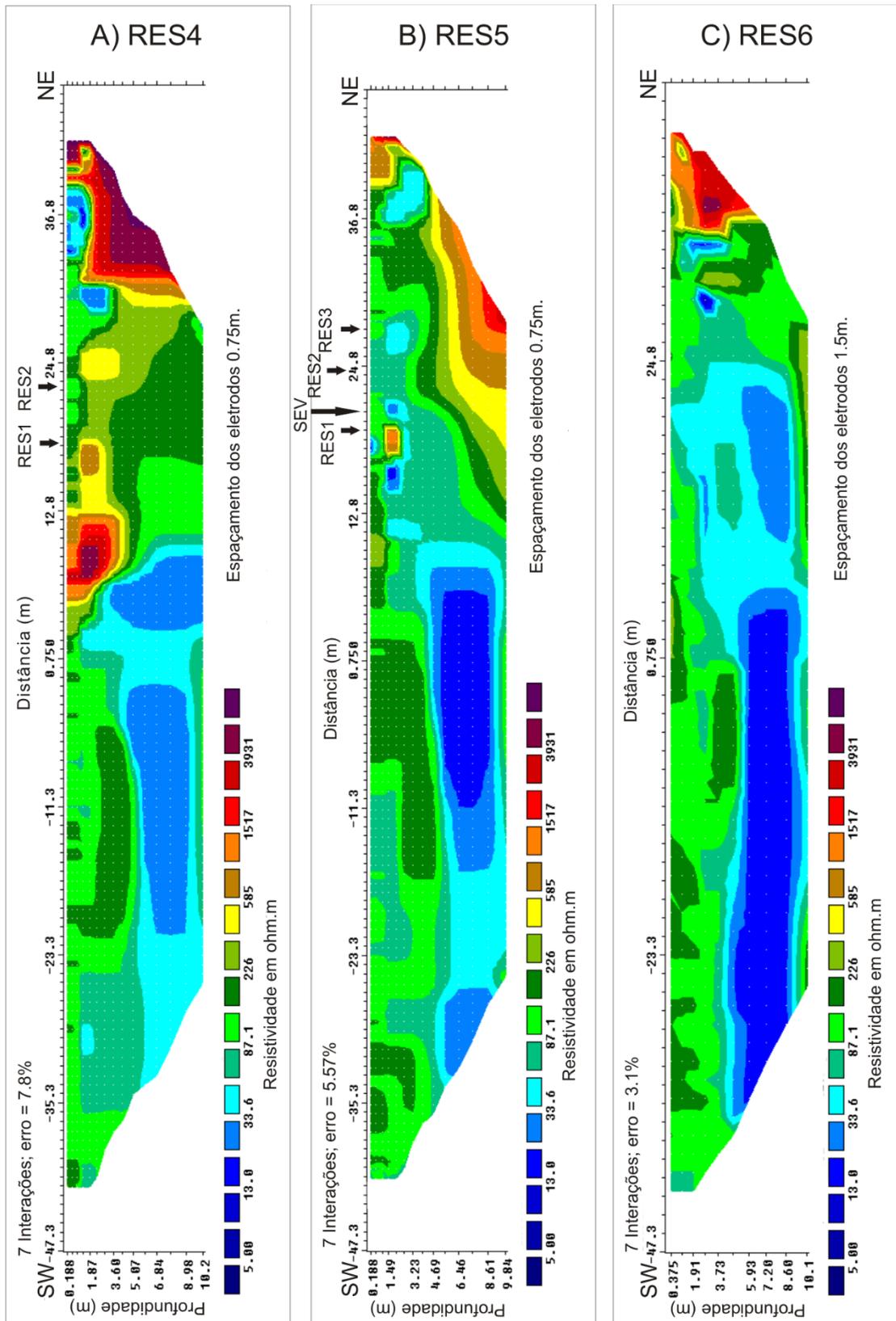


Figura 5.24: Perfis de eletrorresistividade de direção SW-NE: A)RES4, B)RES5 e C)RES6.

A partir das inversões matemáticas com o *Software* RES2DInv (Geotomo Software, 1995 – 2011) dos dados de resistividade obtidos nos caminhamentos elétricos de direção SW-NE foram obtidos 14 mapas de profundidades que variam entre 0,2 e 9,8m. Os mapas, de forma geral, mostram duas anomalias de alta resistividade ($> 585\text{ohm.m}$), uma na porção central e a outra na porção NE. Essas anomalias estão alinhadas segundo a direção NW e as formas variam pouco em profundidades menores que 2,6m (Figura 5.25 e Figura 5.26).

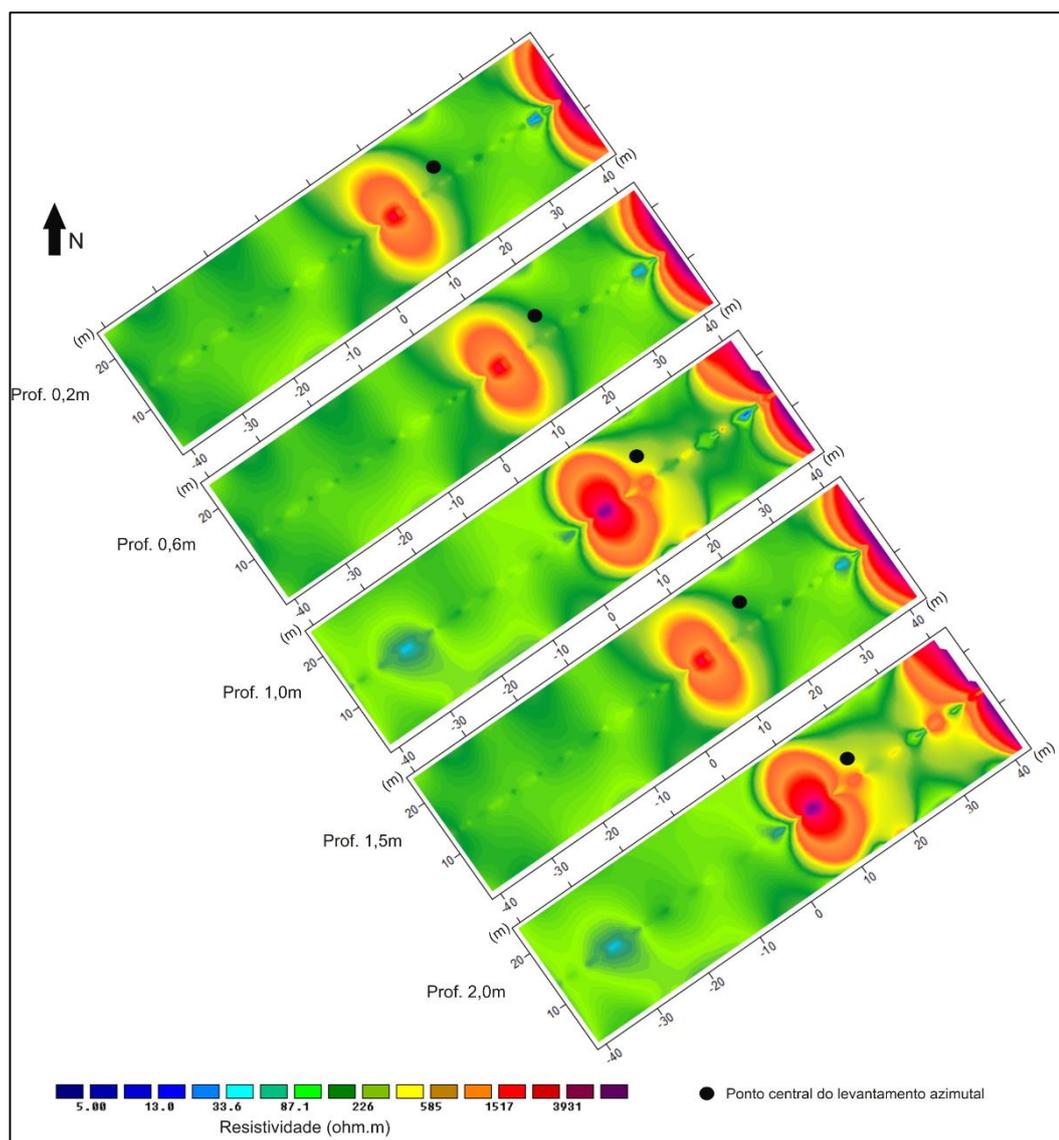


Figura 5.25: Mapas de resistividade gerados a partir dos levantamentos de direção SW-NE até a profundidade 2,0m.

No mapa de profundidade 3,2m, a anomalia da porção NE torna-se maior em área quando se compara com os mapas mais rasos.

O mapa de 3,9m de profundidade mostra uma mudança no padrão das anomalias. Tal mudança se deve a uma anomalia de baixa resistividade de direção NW que ocupa grande parte da área, e também pela ausência da anomalia de alta resistividade central vista nos mapas de profundidades menores.

No mapa de 4,7m, a anomalia de baixa resistividade fica menor em área restando uma faixa estreita na parte central e uma outra na porção NW disposta na direção NE.

Nos mapas de profundidade 5,5m; 6,5m e 7,5m, a anomalia de baixa resistividade volta a ocupar grande parte da área (Figura 5.26 e Figura 5.27). A partir da profundidade 6,5m a anomalia de alta resistividade da porção NE muda de formato, alongando-se segundo a direção NE e tendendo a se concentrar mais na porção sul (Figura 5.27).

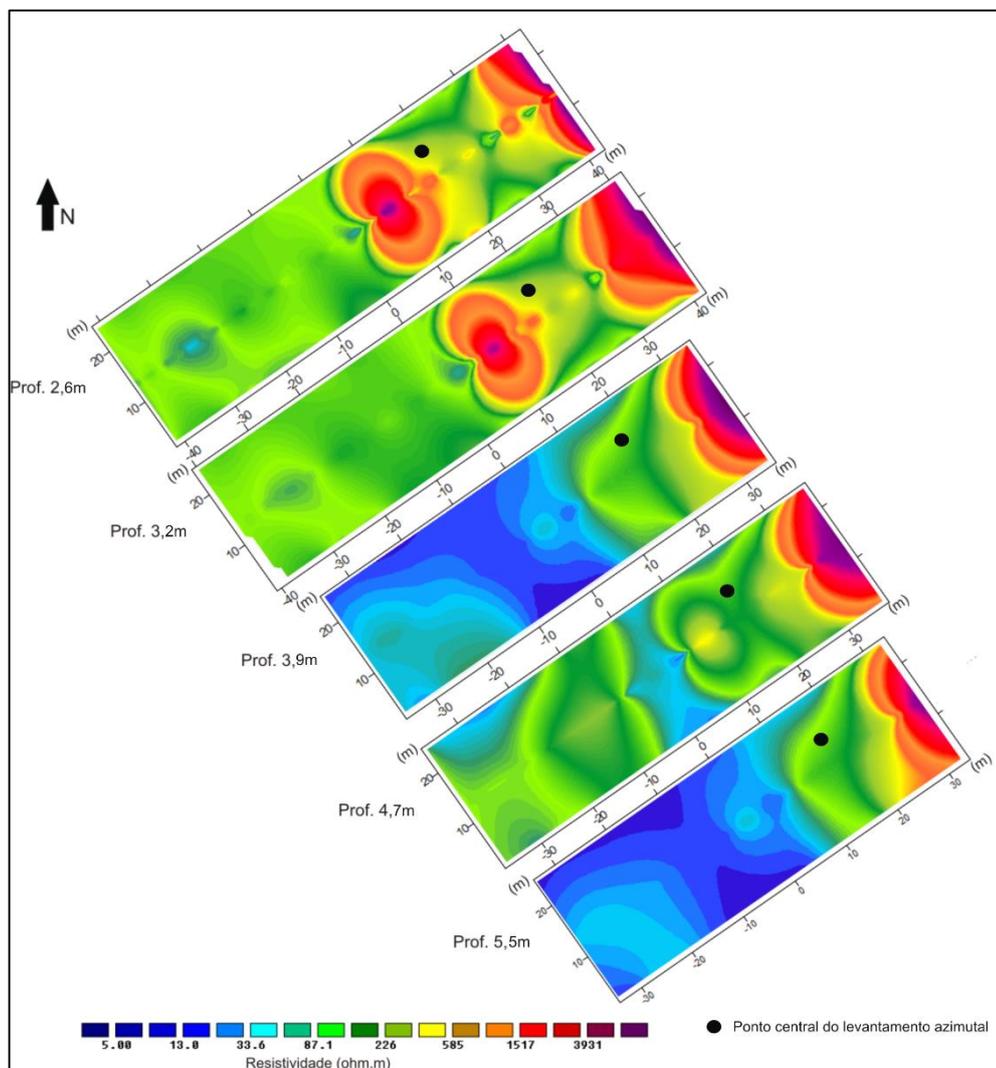


Figura 5.26: Mapas de resistividade gerados a partir dos levantamentos de direção SW-NE até a profundidade 5,5m.

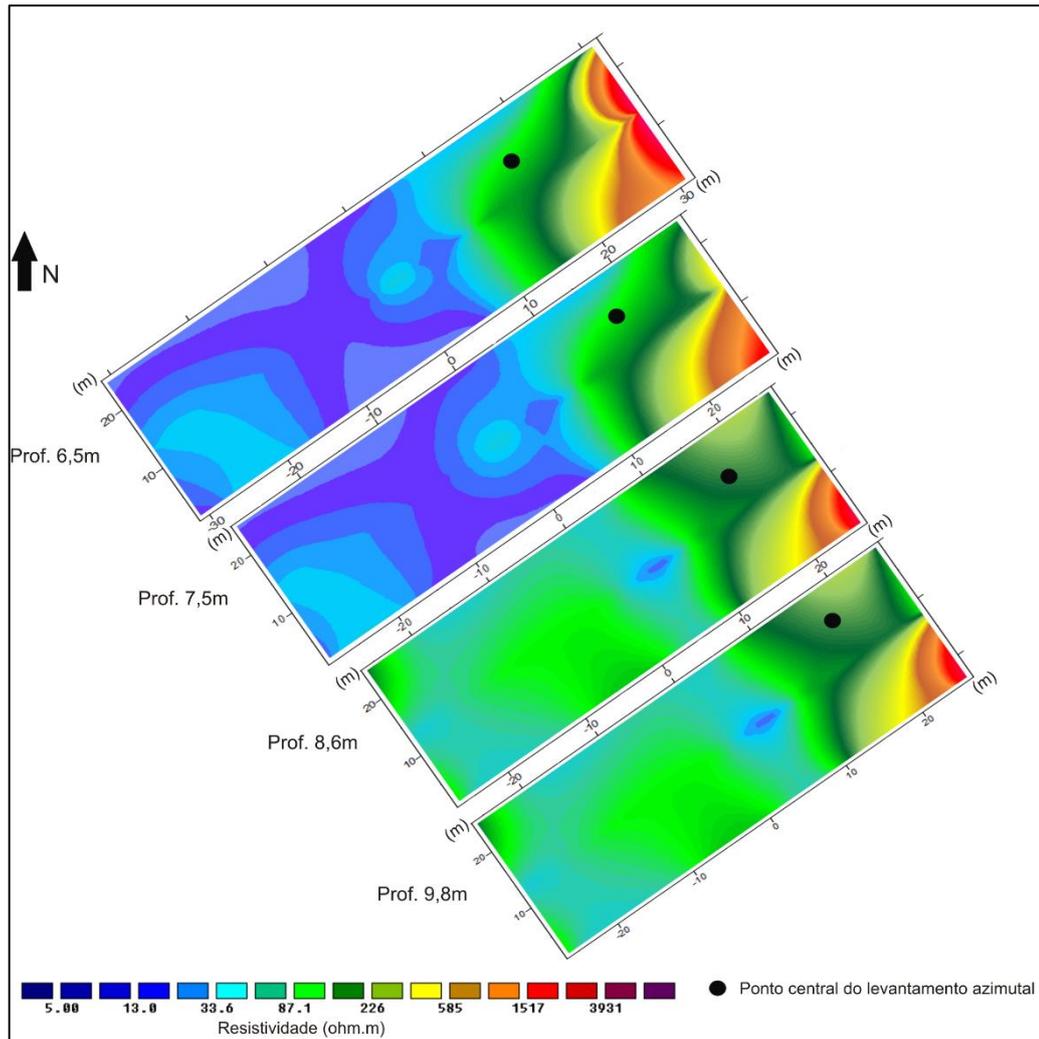


Figura 5.27: Mapas de resistividade gerados a partir dos levantamentos de direção SW-NE até a profundidade 9,8m.

Azimutal

Os levantamentos azimutais foram obtidos com um mesmo ponto central de rotação (Figura 5.28) no interior da área de levantamento por caminhamento.

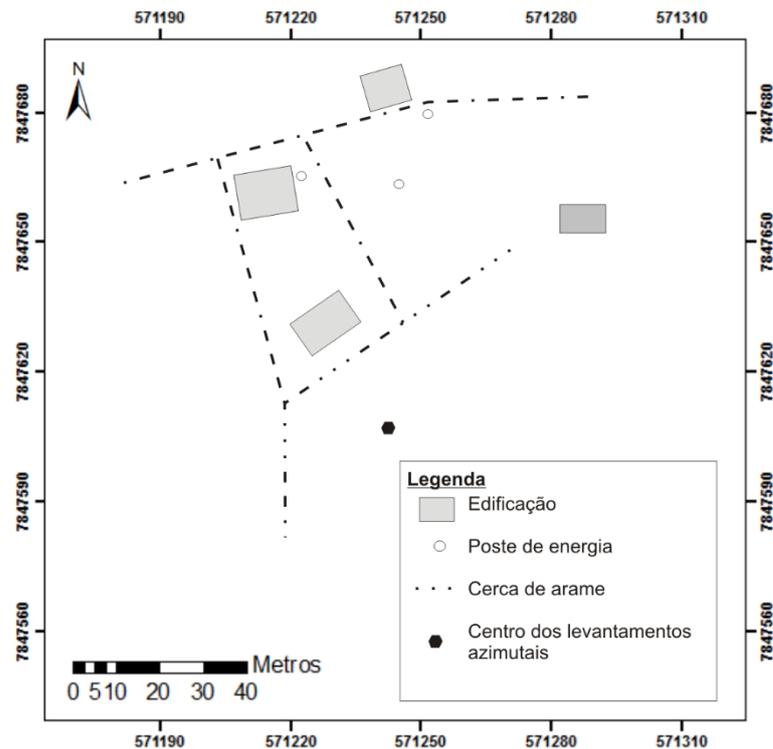


Figura 5.28: Representação esquemática da área de estudo com a localização do ponto central dos levantamentos azimutais.

Os dados de resistividade levantados com esta técnica foram plotados na forma de diagramas polares para melhor visualização das resistividades de acordo com a direção. Na área foram obtidos 5 levantamentos com arranjos e espaçamentos entre os eletrodos indicados nos diagramas da Figura 5.29. Também estão indicadas as profundidades teóricas de cada levantamento, calculadas segundo a base de cálculo de Loke (2000). No caso do arranjo quadrático, foi utilizada a expressão fornecida por Habberjam e Watkins (1967).

Os resultados com arranjo Wenner, com $AB=12m$, apresentam maior resistividade, bem definida na direção N45E e a menor na direção N30W (Figura 5.29A).

Nos diagramas dos arranjos Wenner com $AB=16m$ e Schlumberger nota-se que a resistividade maior está na direção N-S (Figura 5.29 B e C). Secundariamente, no arranjo Schlumberger tem-se um pequeno pico de resistividade na direção N75W e no arranjo Wenner ($AB=16m$) tem-se pequenos picos nas direções N45E e N30W. As resistividades

menores no arranjo Wenner (AB=16m) estão nas direções E-W, N30E e N15W. Já no arranjo Schlumberger estão nas direções N30W e E-W.

No diagrama do arranjo Dipolo-equatorial observa-se um pico maior de resistividade na direção N60W e secundariamente nas direções N15E e N60E (Figura 5.29D). Já as resistividades menores são encontradas nas direções NS, N75E e N30E (Figura 5.29D).

De forma geral, o diagrama do arranjo Quadrático é bastante parecido com o do arranjo Dipolo-equatorial (Figura 5.29 D e E). Ele apresenta maior resistividade nas direções N60W e N45E e resistividades menores nas direções NS e N75E (Figura 5.29E).

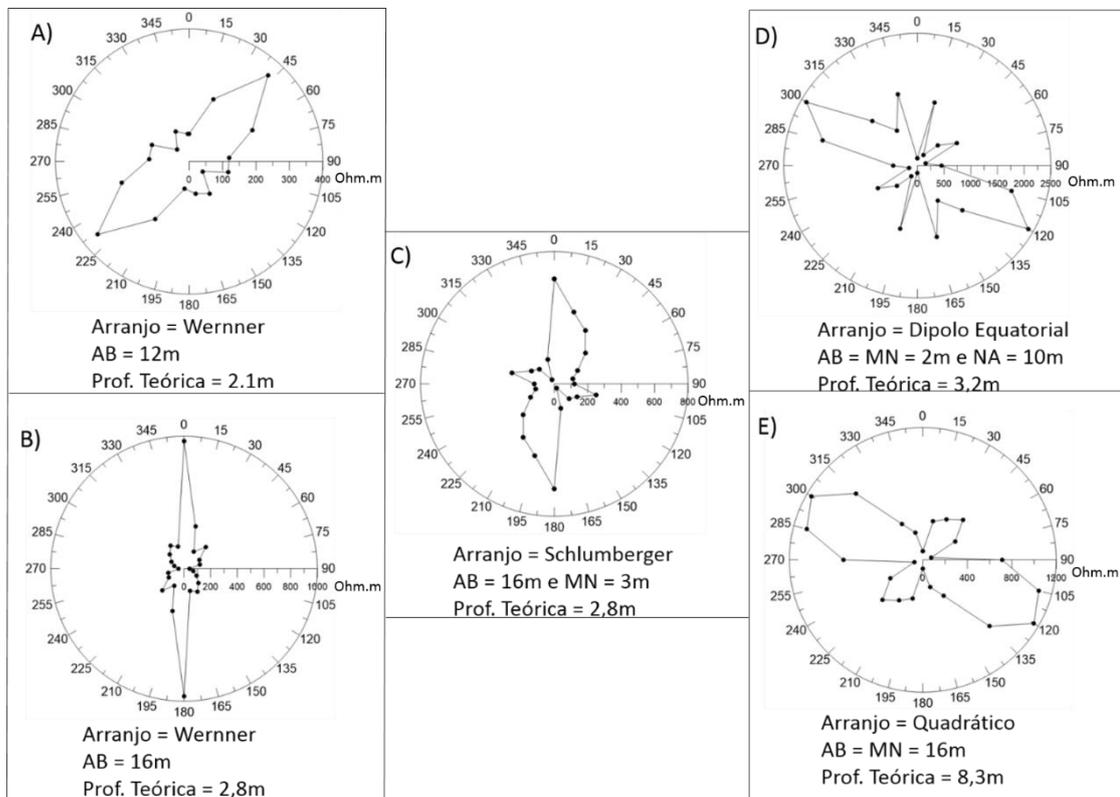


Figura 5.29: Diagramas polares plotados a partir dos dados gerados nos levantamentos azimutais.

Cabe ressaltar a semelhança entre as direções de maior e menor resistividades nos levantamentos Wenner com AB=16m e Schlumberger (Figura 5.30A) e entre os arranjos Dipolo-equatorial e Quadrático (Figura 5.30B).

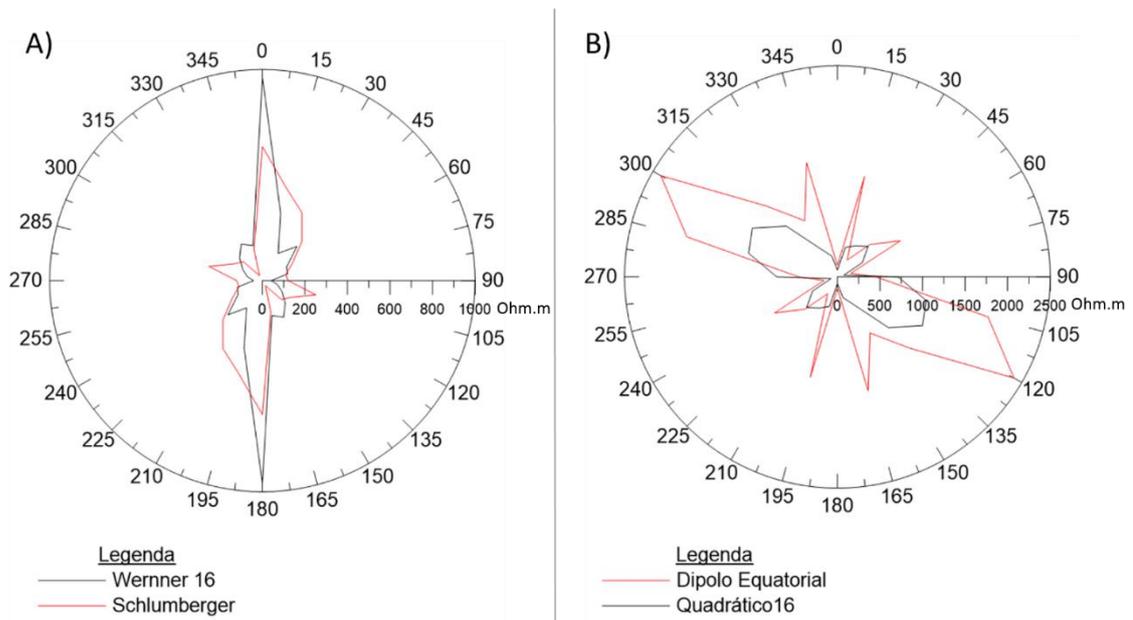


Figura 5.30: Diagramas polares mostrando o paralelismo entre os levantamentos com arranjos: A) Wenner $AB=16m$ e Schlumberger e B) Dipolo-equatorial e Quadrático.

Na Figura 5.31 observa-se que os maiores valores de resistividade foram obtidos nos levantamentos com arranjo Dipolo-equatorial e Quadrático. Os outros levantamentos apresentaram resistividades inferiores.

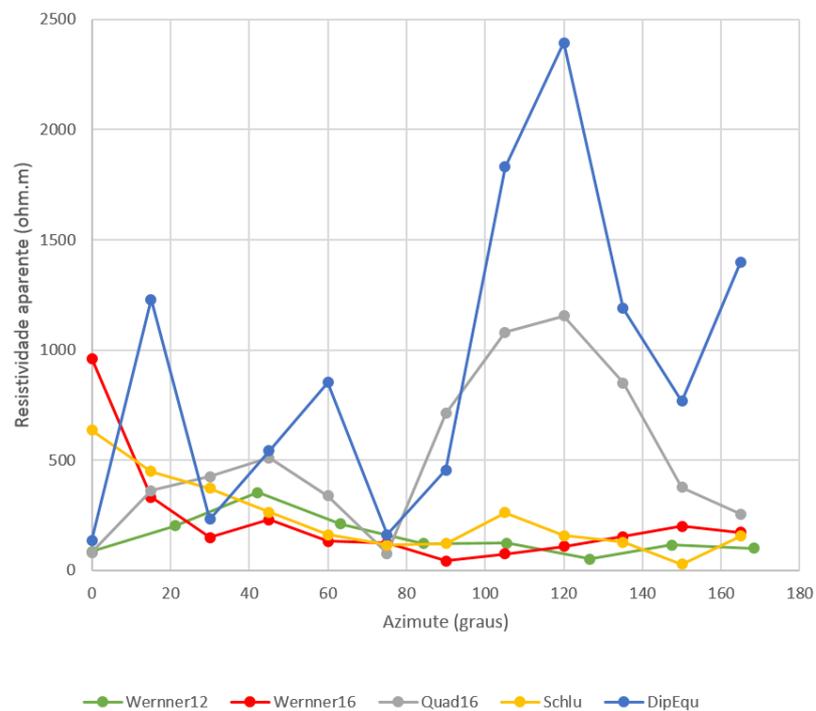


Figura 5.31: Gráficos dos levantamentos azimutais mostrando a relação dos valores de resistividade de cada arranjo.

5.4.2 Métodos Eletromagnéticos

Neste item será apresentado primeiramente os dados obtidos com o aparelho EM-34 e posteriormente serão apresentados os radargramas obtidos com GPR.

Caminhamento – EM-34

Os dados de condutividade elétrica levantados com o equipamento EM-34 foram plotados na forma de quatro perfis:

- perfis oeste com dipolo horizontal (DH) e vertical (DV), ambos correspondentes a linha EIMag1 (Figura 5.32)
- perfis leste com dipolo horizontal (DH) e vertical (DV), ambos correspondentes a linha EIMag3 (Figura 5.32).

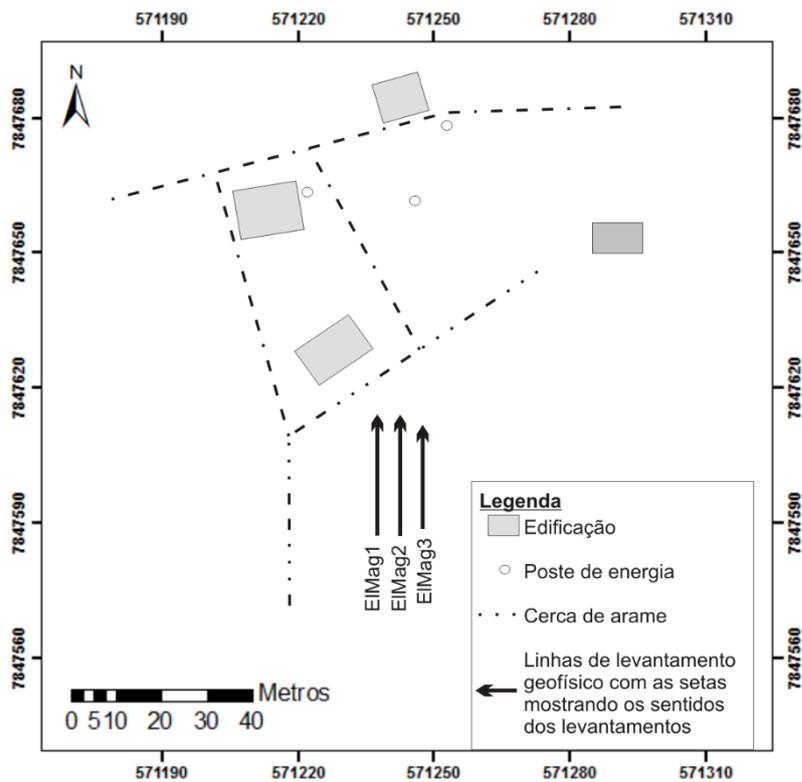


Figura 5.32: Representação esquemática da área de estudo com a localização das linhas de levantamentos EIMag1, EIMag2 e EIMag3.

Analisando-se o perfil oeste de condutividade com o dipolo horizontal (Linha EIMag1 - Figura 5.32) observa-se uma anomalia de média condutividade na porção sul próximo a

superfície (Figura 5.33A). Na porção norte, em profundidade teórica próxima a 12m, tem-se uma anomalia de baixa condutividade.

O perfil oeste de condutividade com dipolo vertical (Linha EIMag1 -Figura 5.32) apresenta uma anomalia de baixa condutividade sub-horizontal entre 15 e 19m de profundidade teórica (Figura 5.33A). Na porção Norte, em profundidade teórica em torno de 28m, tem-se uma anomalia de maior condutividade.

No perfil leste de condutividade com dipolo horizontal (Linha EIMag3 -Figura 5.32) observam-se duas anomalias de baixa condutividade próximas à superfície, uma central e outra maior na porção norte (Figura 5.33B). A partir da profundidade teórica de 12m, tem-se uma anomalia de baixa condutividade sub-horizontal.

O perfil leste com dipolo vertical (Linha EIMag3 -Figura 5.32) apresenta uma anomalia de baixa condutividade entre 16 e 18m de profundidade (Figura 5.33B). Uma anomalia de baixa condutividade é notada na porção norte do perfil entre as profundidades teóricas de 26 e 30m.

Analisando os perfis conjuntamente, observa-se que a anomalia de baixa condutividade se situa entre as profundidades teóricas de 12 e 20m (Figura 5.33).

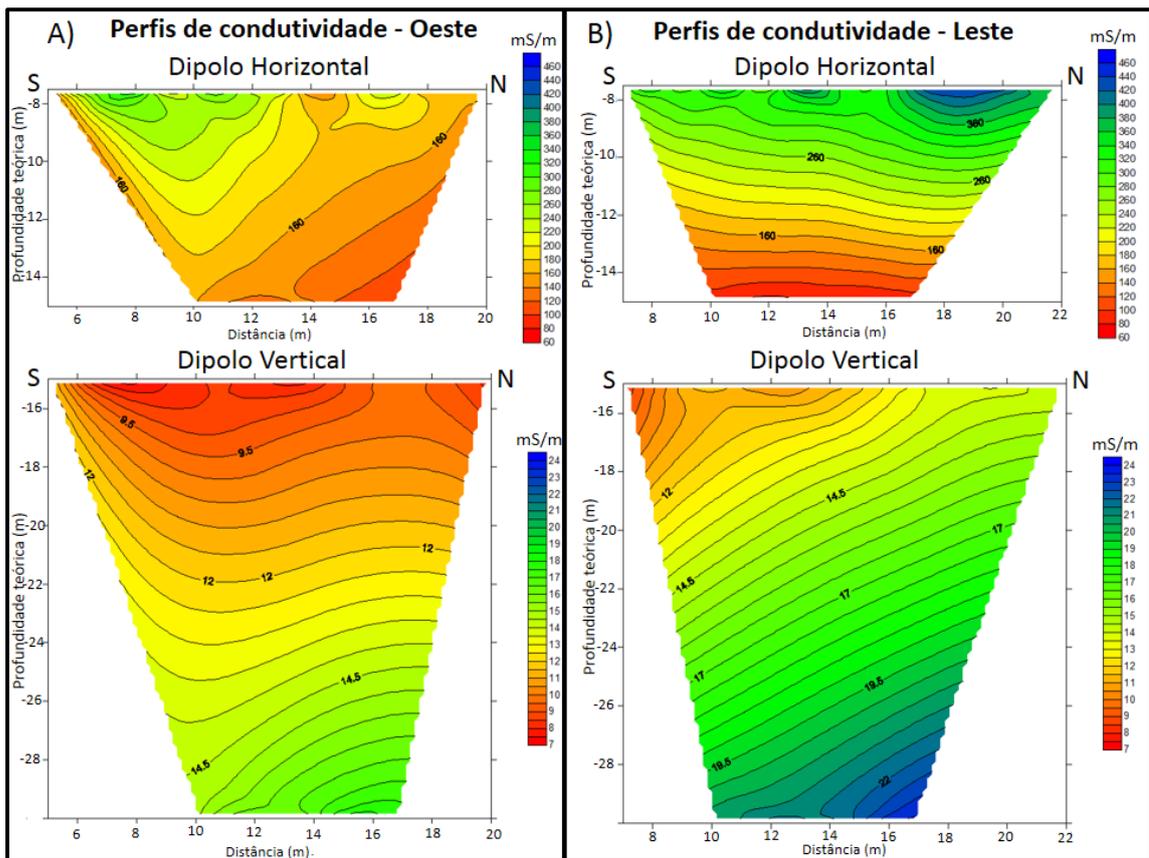


Figura 5.33: Perfis de condutividade elétrica aparente A) Perfil Oeste e B) Perfil Leste.

Depois os dados de condutividade elétrica das linhas de levantamento ElMag1, ElMag2 e ElMag3 foram plotados na forma de 4 mapas, com profundidades teóricas 7,5m (DH), 15m (DH), 15m (DV) e 30m (DV) (Figura 5.34). Em todos eles observam-se lineamentos de direção N-S e N30W na área do ponto central dos levantamentos azimutais.

Analisando-se o mapa de condutividade aparente na profundidade teórica de 7,5m (Figura 5.34A), referente ao levantamento com dipolo horizontal com espaçamento de 10m, percebe-se uma alta condutividade na porção NE da área e condutividades menores nas regiões NW e S. Na área central tem-se uma condutividade intermediária.

Já o mapa na profundidade teórica de 15m (Figura 5.34B), também referente ao dipolo horizontal com espaçamento de 20m, apresenta de forma geral baixa condutividade com uma região, a SW do ponto central, de maior condutividade.

O mapa na profundidade teórica 15m (Figura 5.34C), referente ao levantamento com o dipolo vertical com espaçamento de 10m, apresenta maior condutividade na porção NE e baixos valores na porção SW.

O mapa na profundidade teórica de 30m, levantado com dipolo vertical com espaçamento de 20m, apresenta uma anomalia de maior condutividade na parte NE (Figura 5.34D).

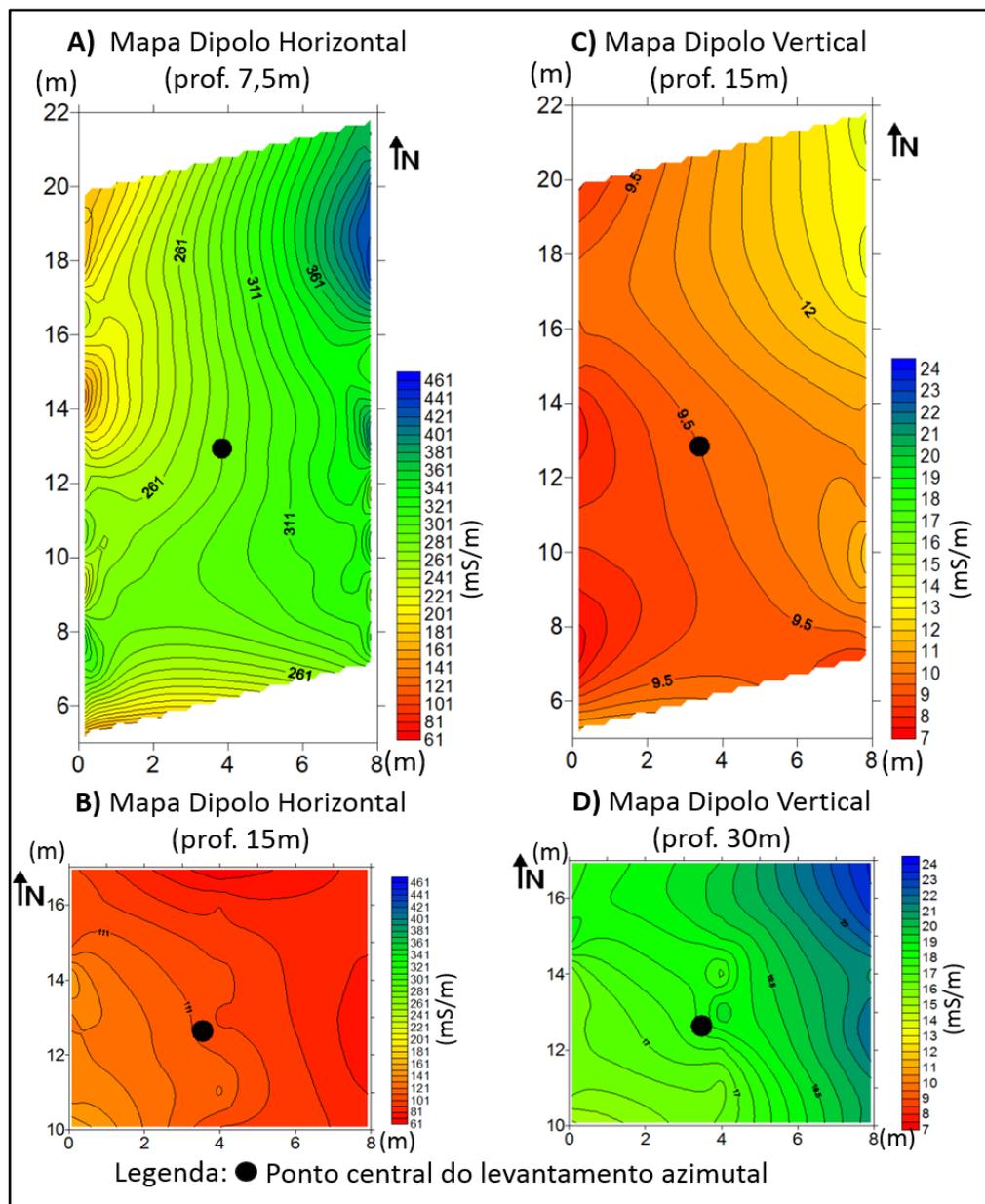


Figura 5.34: Mapas de condutividade elétrica: A) Mapa com dipolo horizontal e profundidade teórica 7,5m; B) Mapa com dipolo horizontal e profundidade teórica 15m, C) Mapa com dipolo vertical e profundidade teórica 15m e D) Mapa com dipolo vertical e profundidade teórica de 30m.

Georadar (Ground Penetrating Radar - GPR)

Os levantamentos com GPR foram executados em duas campanhas. Na primeira fez-se as linhas GPR1, GPR2, GPR3 e GPR4 com as antenas de 100 e 200MHz, totalizando 8 radargramas (Figura 5.35). E na segunda campanha foram levantadas as linhas GPR5, com as antenas de 50 e 200MHz, GPR6 e GPR7, estas com antenas de 50MHz, totalizando 4 radargramas (Figura 5.35).

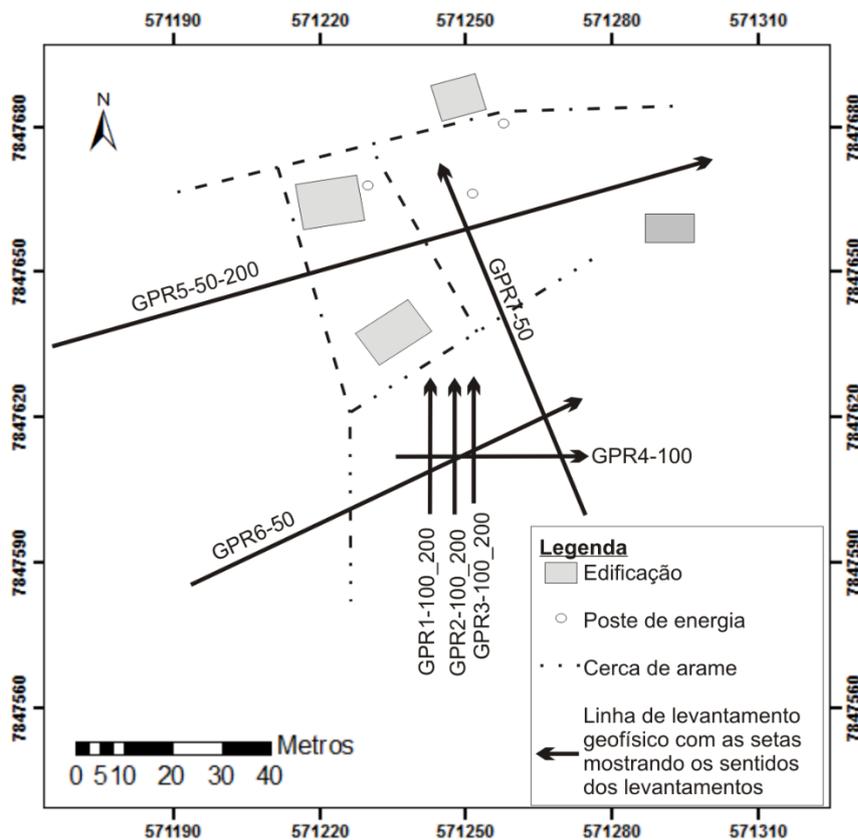


Figura 5.35: Representação esquemática da área de pesquisa com a disposição das linhas de levantamento realizadas com GPR.

De uma forma geral nota-se nos radargramas da primeira campanha (Figura 5.36 e Figura 5.37) uma atenuação do sinal a uma profundidade média de 1,25m (ressaltada por uma linha preta). Nos radargramas GPR4-100 (Figura 5.36) e GPR4-200 (Figura 5.37) nota-se um “alto” nessa linha de atenuação de sinal entre as distâncias 30 e 40m. Também observa-se essa feição no radargrama GPR3-200 entre as distâncias 13 e 19m.

No radargrama GPR4-100 (Figura 5.36D) é notado uma diferença de textura na porção leste em uma profundidade aproximada de 2,5m (demarcadas por uma linha branca tracejada).

A segunda campanha objetivou caracterizar melhor o terreno, já que no local onde foram feitos os levantamentos anteriores o sinal apresentou forte atenuação próximo a superfície. Procurou-se fazer esta campanha numa área mais topograficamente mais elevada, mais distante da lagoa, onde imaginava-se que se encontrariam solos menos argilosos, menos orgânicos e menos saturados. No entanto, o sinal também foi atenuado nesses últimos levantamentos, também a uma profundidade teórica próxima de 1,25m (Figura 5.38 e Figura 5.39). Mas ainda assim foi possível constatar a presença de algumas feições lineares nesses radargramas (ressaltadas por linhas brancas tracejadas).

No radargrama GPR6-50 (Figura 5.39A), entre as profundidades de 5 e 15m, nota-se um contraste entre as texturas da porção mais rasa em relação a porção mais profunda (demarcada pela linha branca tracejada).

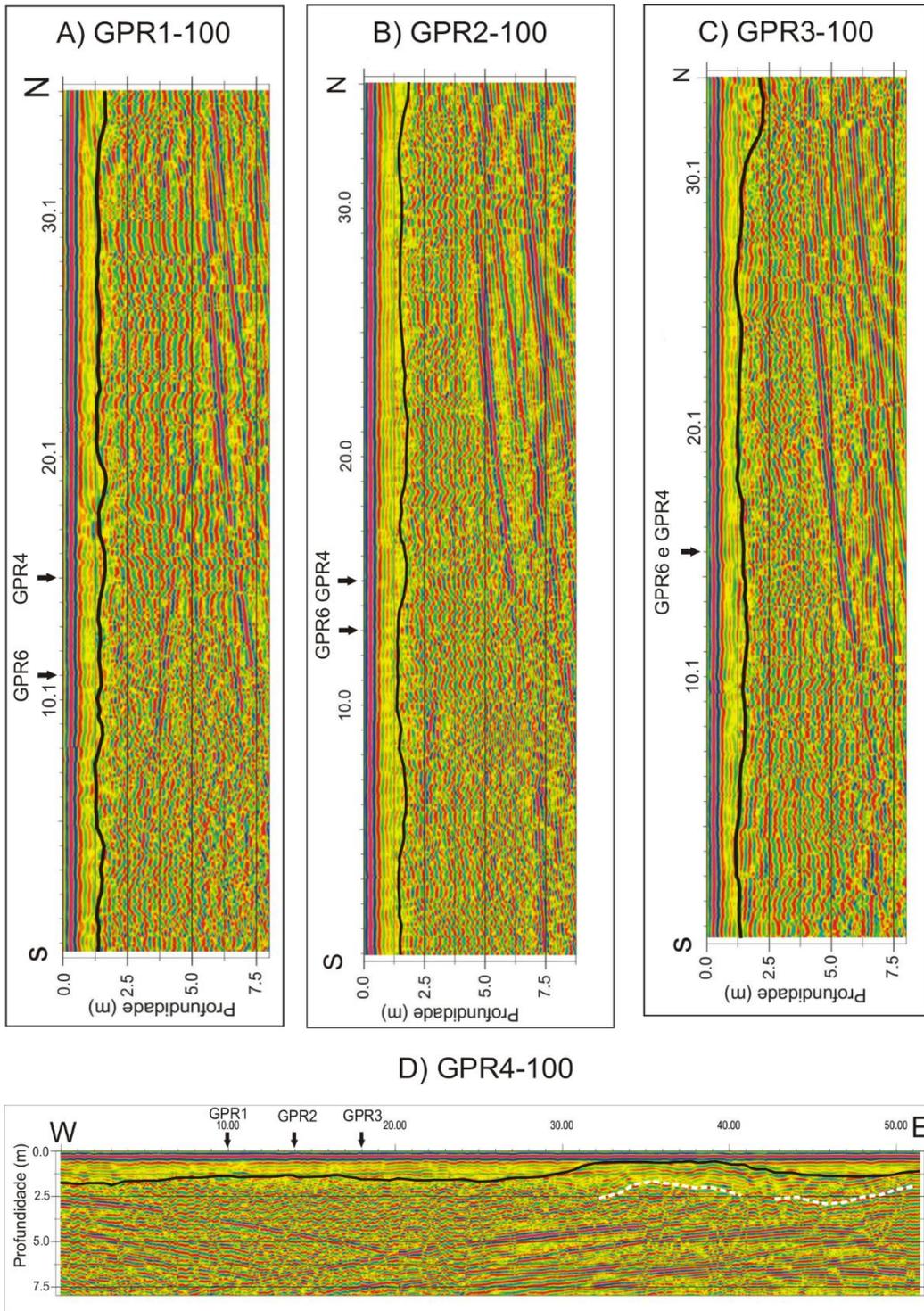


Figura 5.36: Radargramas levantados com antena de 100MHz. A) Linha 1 (GPR1-100); B) Linha 2 (GPR2-100); C) Linha3 (GPR3-100) e; D) Linha 4 (GPR4-100).

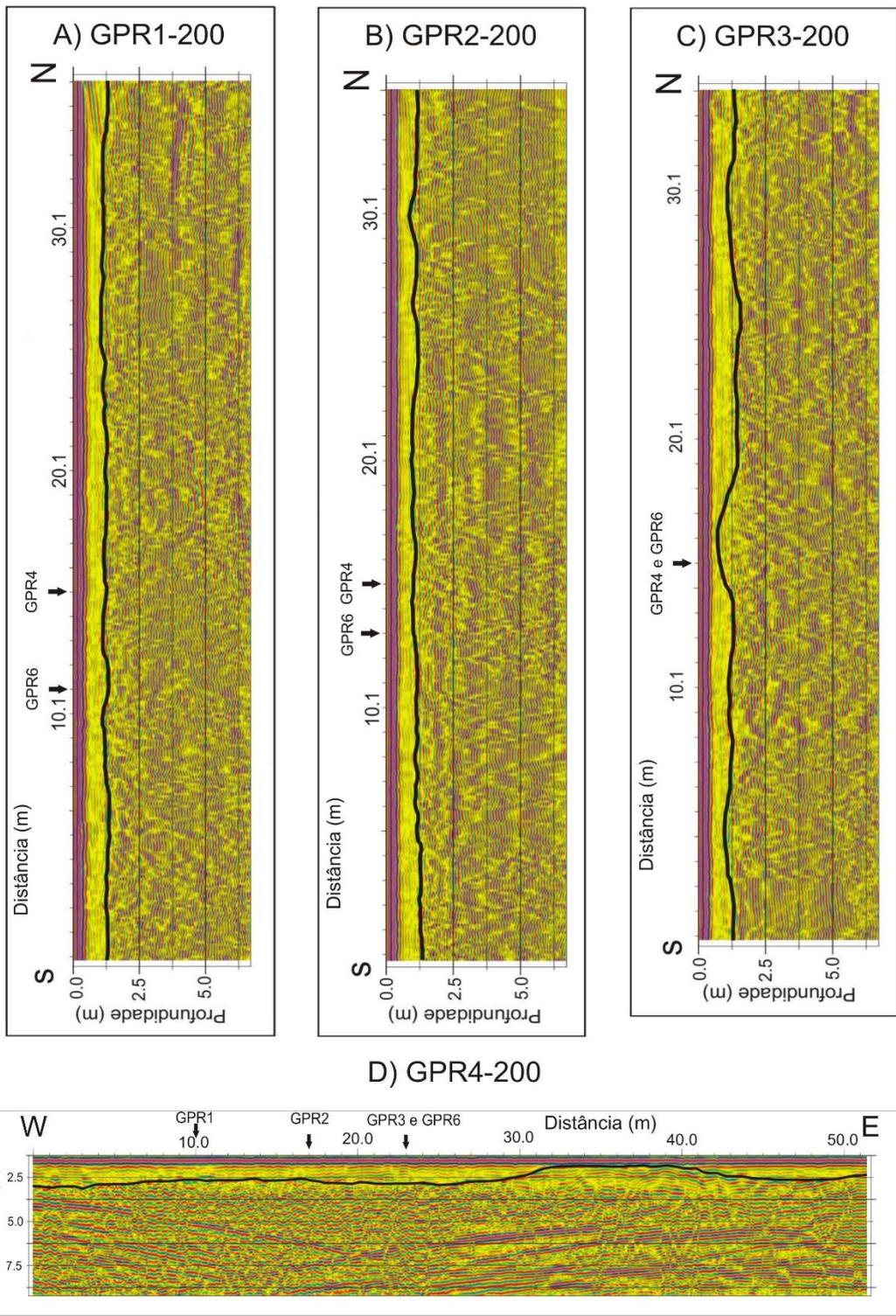


Figura 5.37: Radargramas levantados com antena de 200MHz. A) Linha 1 (GPR1-200); B) Linha 2 (GPR2-200); C) Linha3 (GPR3-200) e; D) Linha 4 (GPR4-200).

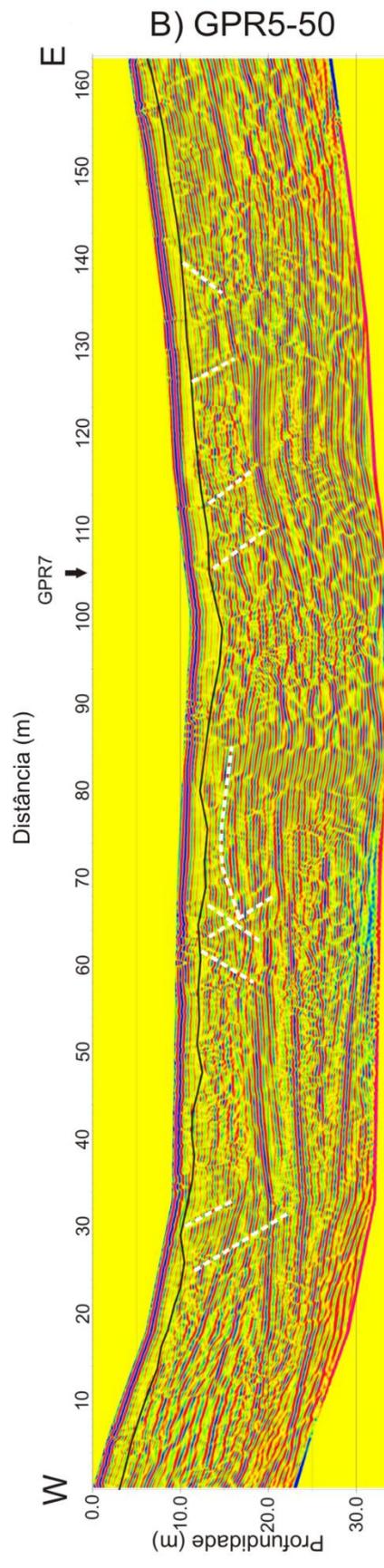
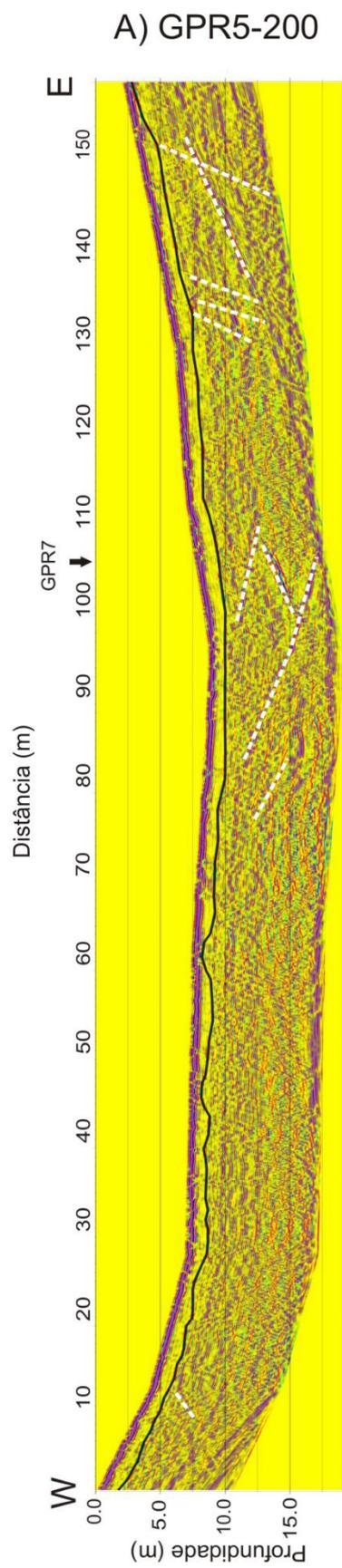


Figura 5.38: Radargramas referentes a linha 5 levantados com antenas de A) 200MHz (GPR5-200) e B) 50MHz (GPR5-50).

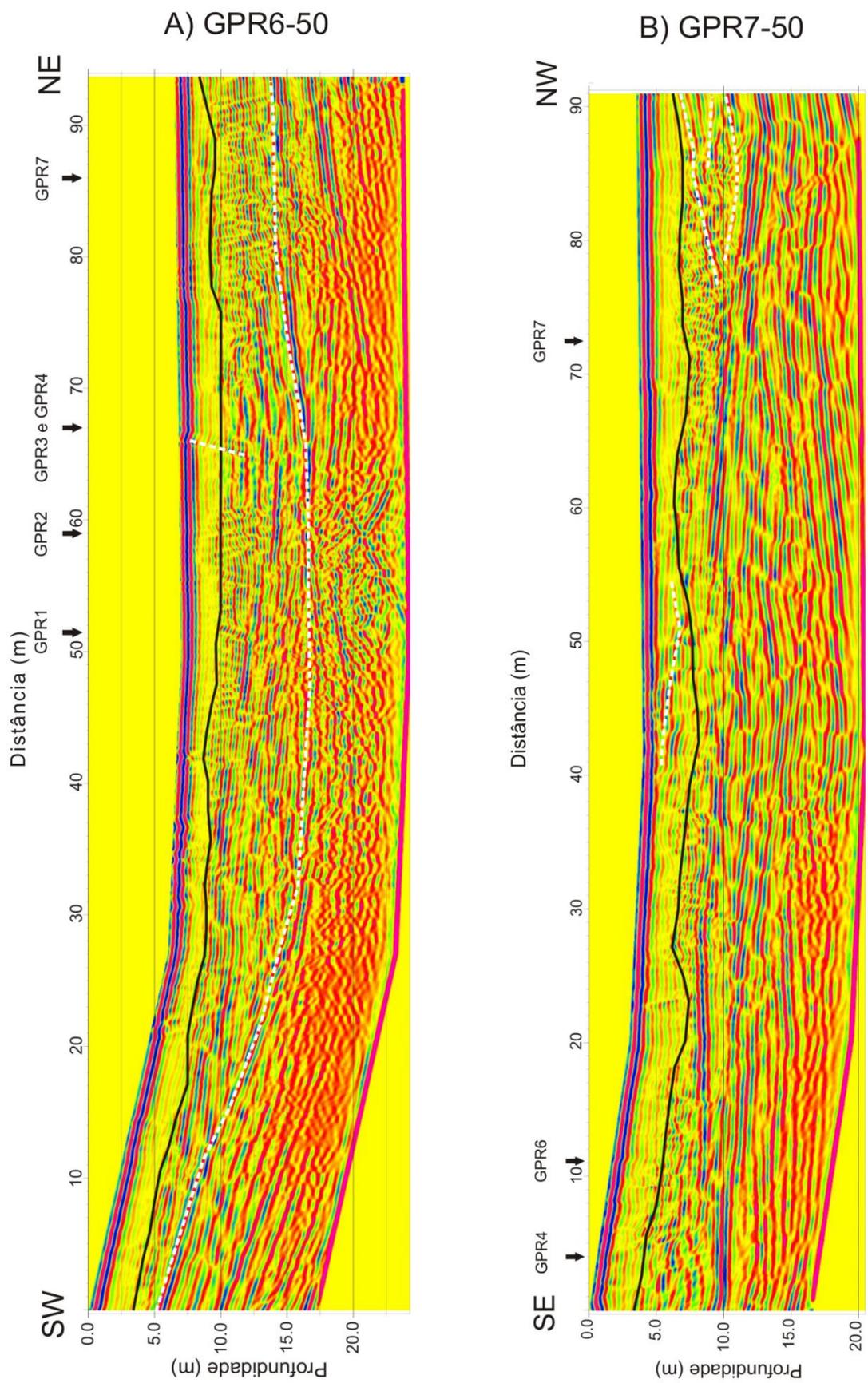


Figura 5.39: Radargramas levantados com antena de 50MHz. A) Linha 6 (GPR6-50) e B) Linha 7 (GPR7-50).

CAPÍTULO 6

6 DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentada a interpretação dos resultados obtidos, assim como uma comparação entre estes e os dados bibliográficos.

Caracterização estrutural por sensores remotos – Lineamentos

Analisando-se os lineamentos (Figura 5.2, Figura 5.4, Figura 5.6e Figura 5.8) observa-se que em todas as escalas, de forma geral, a direção predominante é N30W. Somente os lineamentos de drenagem (Figura 5.4) é que apresentam predominância na direção N10W, mas com grande dispersão. Em menor quantidade, mas ainda em número expressivo, têm-se os lineamentos de direções N30E e N65E, observados nas imagens de escalas média e pequena (Figura 5.2, Figura 5.4 e Figura 5.6). Observa-se também, na imagem *Landsat*, que a dolina presente na porção sul da área tem seu direcionamento controlado por lineamentos de direção NW (Figura 5.9).

Na imagem SRTM, a aproximadamente 2Km a norte da área de estudo, tem-se um lineamento expressivo de direção E-W (Figura 5.2) que também é visto no mapa magnetométrico (Figura 2.2A). Neste mapa observa-se que as direções predominantes de lineamentos são N65W, N70E e EW. Apenas o segundo grupo foi observado como predominante nos lineamentos traçados neste trabalho.

Em relação aos comprimentos não se observou uma variação estatisticamente significativa. Há apenas alguns *outliers* em algumas direções.

Caracterização estrutural dos dados de campo

No estereograma com as medidas de acamamento (Figura 5.12) observa-se um dobramento suave com eixo sub-horizontal e direção N28W. Estes dados são similares aos mensurados por Salgado (2016), que encontrou eixos de dobra com direção N10-20W

na região do município de Sete Lagoas -MG. Na direção do eixo da dobra tem-se a família de fraturas F4 que é a que apresenta o maior número de fraturas cavernosas. Provavelmente se tratam de fraturas de tração devido a flexão das dobras.

O modelo apresentado na Figura 6.1 mostra de forma esquemática a posição dessa dobra na área de estudo, sendo que os levantamentos foram realizados preferencialmente na zona da charneira desse anticlinal vazado, com exceção dos radargramas da segunda campanha.

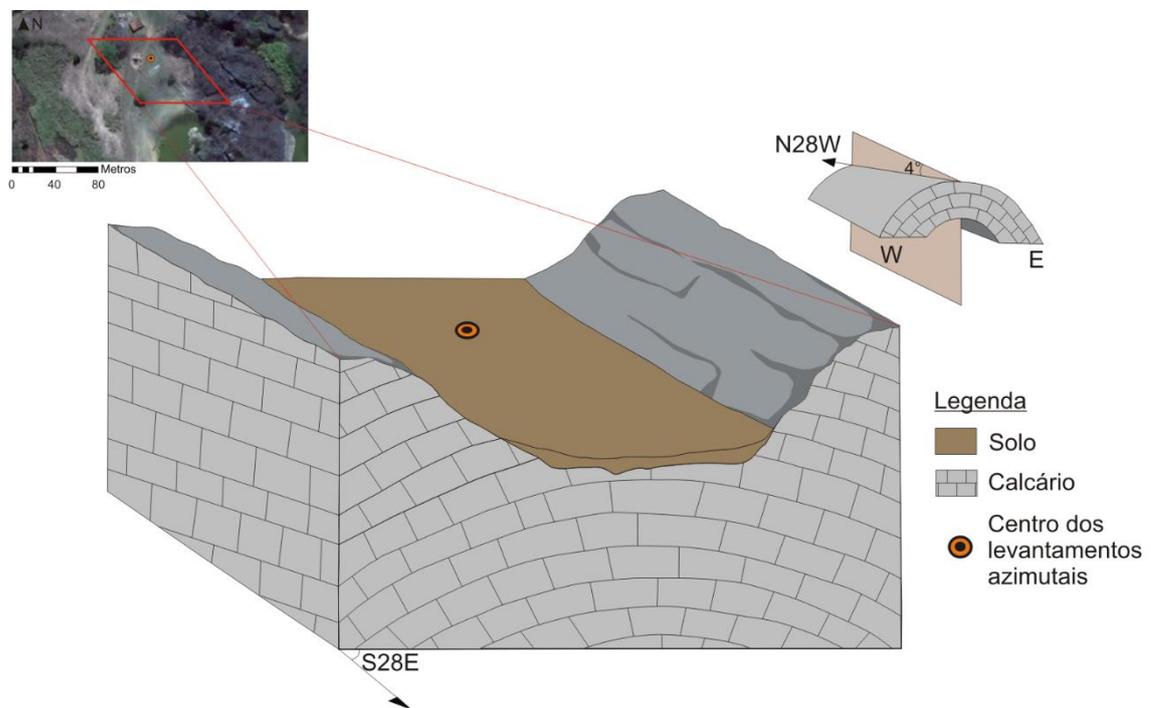


Figura 6.1: Bloco diagrama esquemático da dobra presente na área de estudo.

O diagrama de roseta das fraturas (Figura 5.13) mostra que a direção mais frequente é N85W (família F2), coincidente com a direção principal encontrada por outros autores na região (Daniel e Teodoro, 1992; Salgado, 2016). Do mesmo modo, Magalhães (1988) e Lima *et al.*(2017) encontraram fraturas na direção N85W, porém constituindo família menos frequente. Magalhães (1988) além dessa direção, encontrou um par conjugado de fraturas de direções N40-50E e N50-70W assim como Lima *et al.*(2017) encontraram direções próximas à essas. A primeira direção coincide com a família F3 (N65E) encontrada nesta pesquisa. Ressalta-se que essa se constitui na família de fraturas secundariamente mais frequente na área (Figura 5.16). A segunda direção é próxima da

família F4 (N45W) que apresenta as fraturas mais abertas da área. A família F1 (N15E), com 17% das medidas totais, também foi encontrada por Salgado (2016).

Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A partir da Tabela 3.2 pode-se interpretar os resultados encontrados na inversão da SEV (Figura 5.19) como:

- Camada 1 = com espessura de 1,3 m e resistividade 230 ohm.m interpretada como solo não saturado;
- Camada 2 = com espessura de 3,6 m com resistividade 44 ohm.m interpretada como calcário carstificado, com cavidades preenchidas por água;
- Camada 3 = com 13,4 de espessura com resistividade 261 ohm.m interpretada como calcário pouco carstificado;
- Camada 4 = camada com resistividade baixíssima (5,1 ohm.m) = cavidade preenchida por água.

Portanto o solo e a primeira porção carstificada apresentam espessura estimada de aproximadamente 5 m. O calcário menos carstificado estaria a 5 metros de profundidade, camada esta que se sobrepõe a uma outra possível zona carstificada com profundidade, aproximada, de 20 m.

Essa interpretação de duas cavidades, um na base do solo e outro em zonas carstificadas paralelas ao acamamento a uma profundidade aproximada de 20 m, corrobora os resultados obtidos na região do município de Sete Lagoas – MG de Galvão *et al.* (2015).

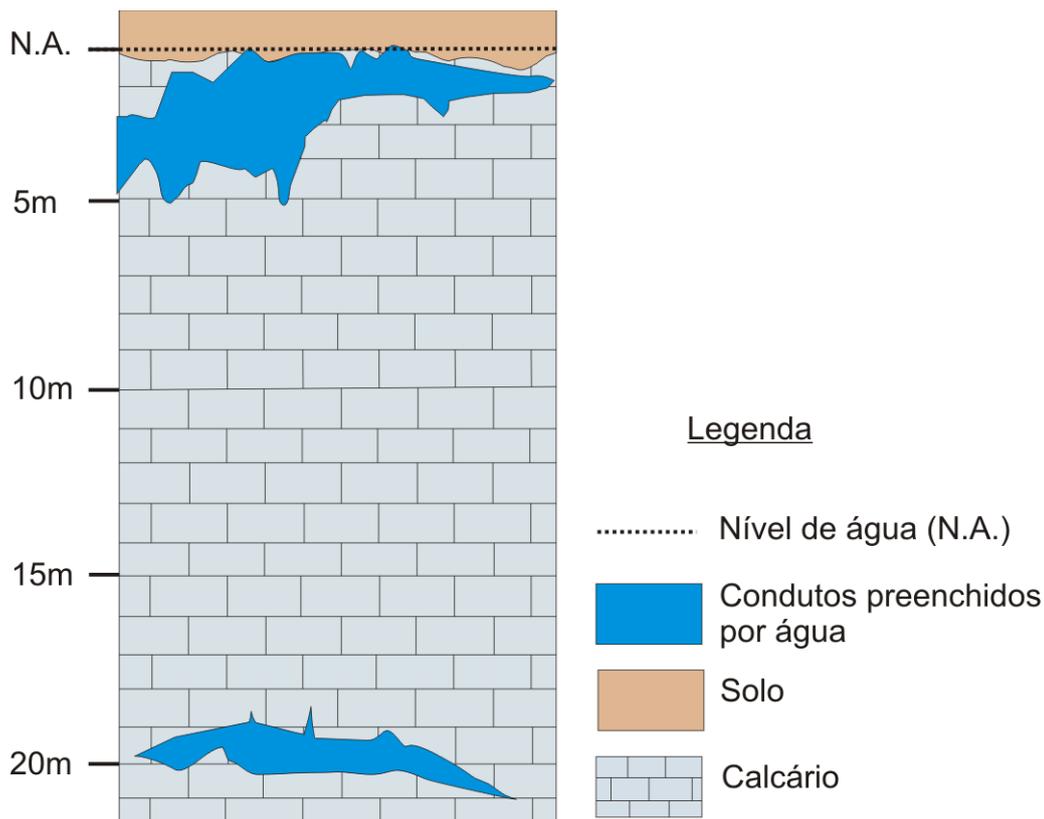


Figura 6.2: Modelo esquemático do subsolo com base na interpretação da SEV.

Caminhamentos elétricos

Quanto aos caminhamentos elétricos, nota-se nos perfis de direção N-S (Figura 5.21) que a resistividade cresce com o aumento da profundidade. Essa variação na resistividade pode ser interpretada como uma mudança de um horizonte mais carstificado para outro com rocha menos carstificada (Figura 6.3). Nota-se que este “contato” (ressaltado na Figura 6.3 por uma linha branca tracejada) fica mais profundo no sentido leste, perfil RES3 (Figura 6.3C), ou seja, a zona mais carstificada aumenta em tal sentido. Outro ponto a ser considerado é a porção com baixa resistividade (valores menores que 33ohm.m) encontrada na região central dos perfis, entre as profundidades 0,3 e 2,7m do perfil RES2 (Figura 6.3B) e com a possível bifurcação dessa porção no perfil RES3 (Figura 6.3C). Provavelmente essa zona condutiva seja um duto subhorizontalizado que se bifurco para leste, preenchido por água.

Os valores de alta resistividade, encontrados nesse levantamento (>400ohm.m), são maiores do aqueles encontrados na literatura para rocha calcária. Analisando a Tabela 3.2

percebe-se que esses valores de alta resistividade estariam dentro do intervalo definido para mármore. No entanto pelo contexto da geologia regional sabe-se que não existe um metamorfismo significativo na região. Portanto supõem-se que tais rochas poderiam ser no máximo um metacalcário. Diante do exposto, a partir deste ponto esta rocha será tratada como um metacalcário no texto subsequente.

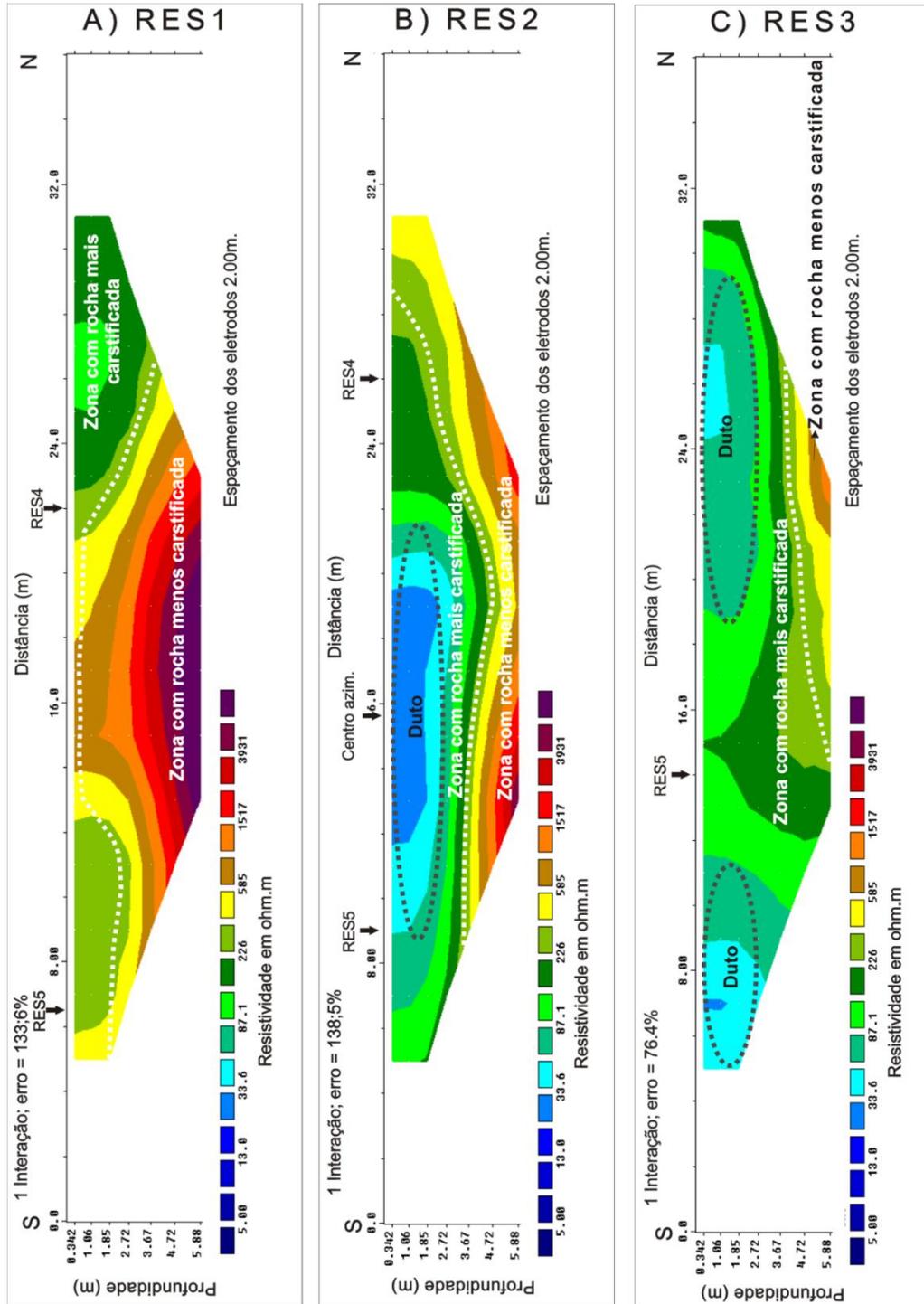


Figura 6.3: Perfis de resistividade de direção N-S interpretados: A)RES1; B)RES2 e; C)RES3.

Observando-se os mapas de resistividade (Figura 6.4) percebe-se que os lineamentos elétricos na área central dos levantamentos azimutais apresentam, predominantemente, direção N-S até a profundidade de 5,9m, quando muda a direção para NNW (ressaltados por linhas contínuas brancas).

Na porção nordeste dos mapas as anomalias apresentam a direção NE-SW em todas as profundidades, tendendo a E-W na profundidade de 5,9m (ressaltadas pelas linhas pontilhadas brancas). E na porção noroeste do mapa tem-se um lineamento de direção NW-SE até a profundidade de 3,7m (ressaltado por linha contínua preta). Na parte meridional dos mapas são observados dois lineamentos também de direção NW-SE na profundidade de 1,8m (ressaltados por linhas pontilhadas pretas).

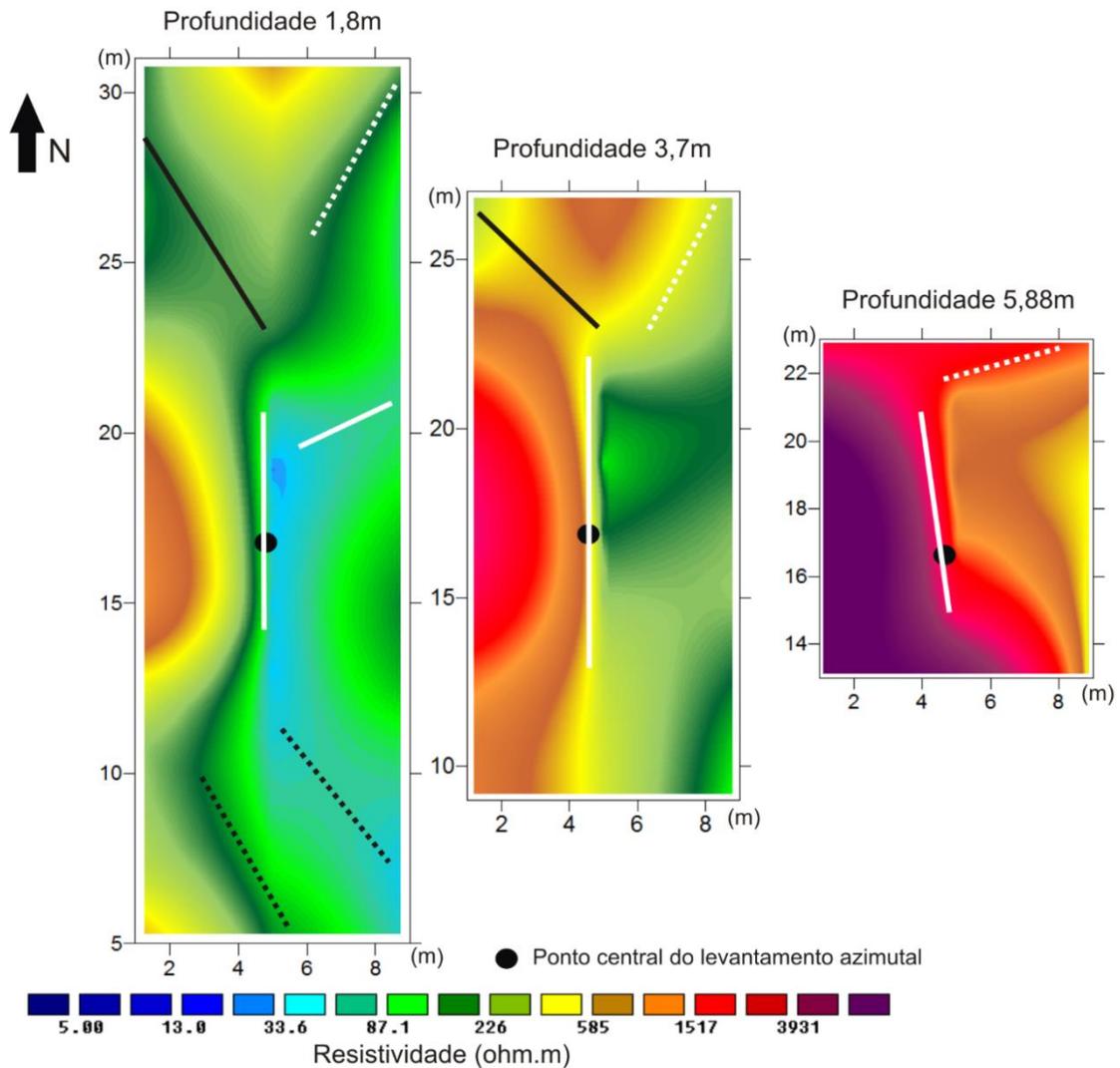


Figura 6.4: Mapas gerados a partir dos levantamentos de direção N-S com as interpretações das direções das anomalias ressaltadas pelas linhas.

Com a análise dos perfis de eletrorresistividade direção SW-NE (perfis RES4 a RES6) percebe-se uma área com baixa resistividade em todos eles (área demarcada por linha preta tracejada na Figura 6.5). Tal zona pode ser interpretada como uma grande cavidade sub-horizontal, paralela ao acamamento, preenchida por água. Ela está localizado a oeste dos condutos menores observados nos perfis N-S (perfis RES1 a RES3) (área circundada por linha branca na Figura 6.5) e está na profundidade entre 2 e 10m.

Além disso, constata-se que tal cavidade aumenta seu tamanho em comprimento no sentido sul (Figura 6.5).

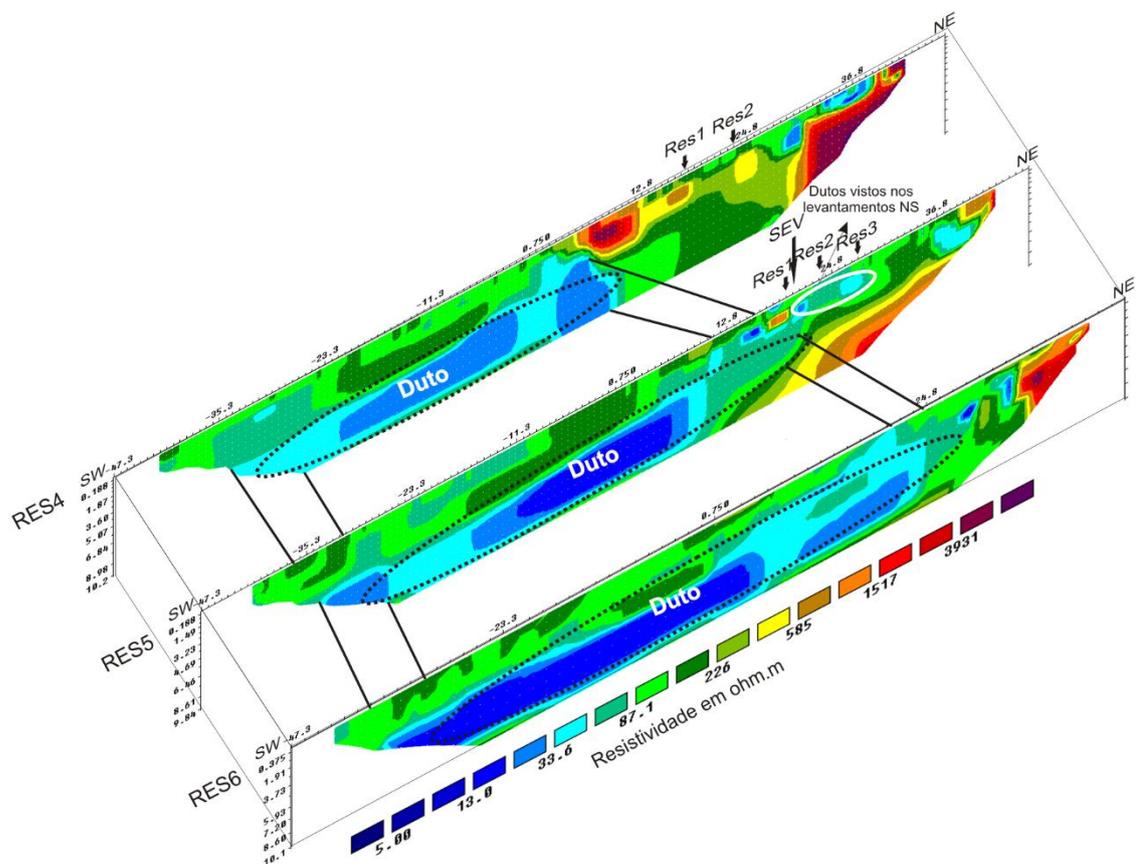


Figura 6.5: Perfis de resistividade direção SW-NE interpretados mostrando um possível duto sub-horizontal paralelo ao acamamento.

As anomalias de alta resistividade encontradas na porção central e nordeste dos mapas obtidos pelos levantamentos SW-NE podem ser interpretadas como porções rochosas, o que é bastante coerente com o constatado em campo. Nestas áreas encontram-se vários afloramentos de metacalcário com paredões verticalizados de direção NW-SE, a mesma direção das anomalias resistivas (Figura 6.6). Como discutido previamente, a distribuição

dos mergulhos do acamamento em campo indica tratar-se de anticlinal com charneira erodida. As anomalias de alta resistividade representariam os flancos desta dobra.

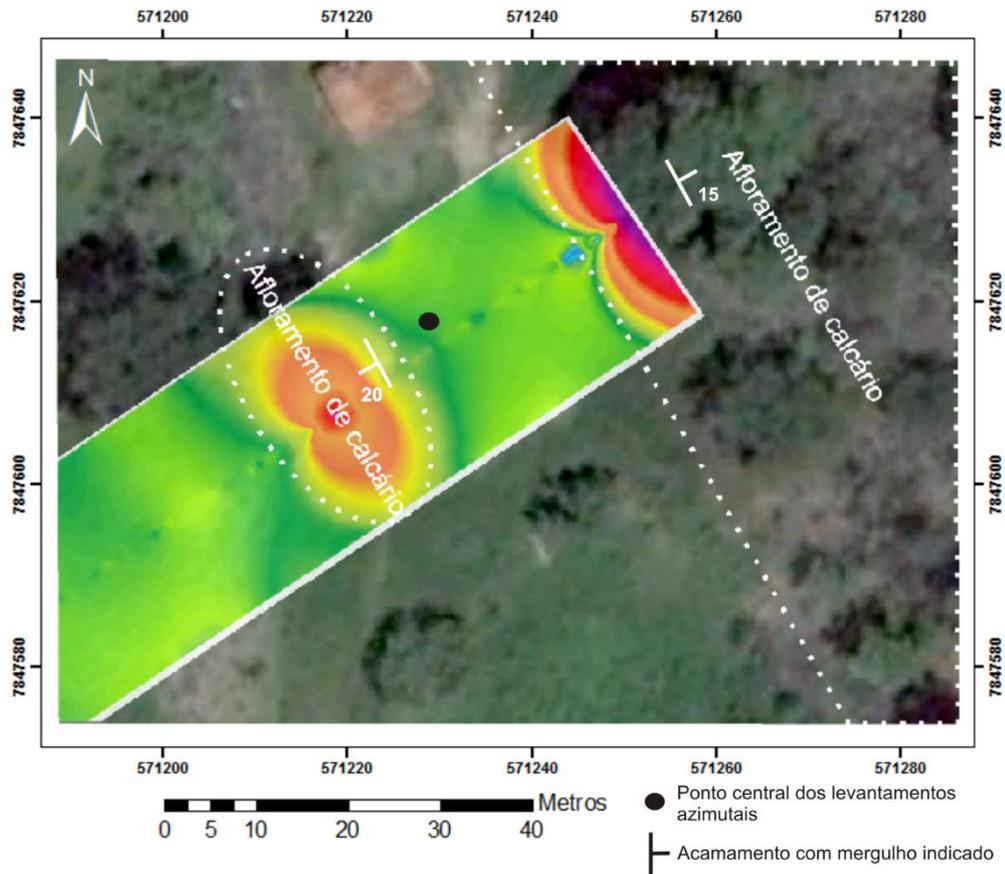


Figura 6.6: Mapa de eletrorresistividade na profundidade de 0,6m sobreposto a imagem de Landsat mostrando, nas áreas delimitadas por pontilhado, os locais onde afloram metacalcário.

A partir da profundidade de 2m observa-se que a área entre essas anomalias de alta resistividade (ressaltada na Figura 6.7 pela letra A) torna-se mais resistiva, podendo se tratar do começo da porção não erodida no eixo do anticlinal, mas que se encontra muito fraturada, de tal forma que a resposta elétrica seja uma resistividade menor que aquela quando se trata de um metacalcário menos fraturado.

A começar da profundidade de 3,9m ausenta-se a anomalia de alta resistividade presente nos mapas mais rasos na porção central (ressaltada pela linha preta contínua na Figura 6.7) e passa a existir uma anomalia de baixa resistividade (representada pela letra B) que tem continuidade na porção sudoeste do mapa. Tal anomalia pode ser interpretada como uma cavidade preenchida por água e apresenta direção principal N48W (ressaltada na

Figura 6.7 pela linha laranja). Nesta profundidade também se observa uma mudança na direção da anomalia situada no ponto central do levantamento azimutal (ressaltada pelas linhas pretas pontilhadas na Figura 6.7), nos mapas mais rasos a direção é NW e nesta profundidade é NE. Estes padrões das anomalias são vistos em todos os mapas até a profundidade de 8,6m.

A cavidade citada acima, evidenciada pela letra B na Figura 6.7, passa a ter tamanho reduzido em profundidades maiores que 8,6m, uma vez que o valor da resistividade no local aumenta para aproximadamente 100 ohm.m, sugerindo assim a existência de rocha alterada. Outra diferença notada a partir da profundidade 8,6m é a mudança na direção da anomalia do ponto central de levantamento azimutal (linha preta pontilhada) que volta a ser NW, além disso a sul desse ponto central passa a existir uma anomalia de alta resistividade de direção NE (ressaltada pela linha contínua roxa na Figura 6.7).

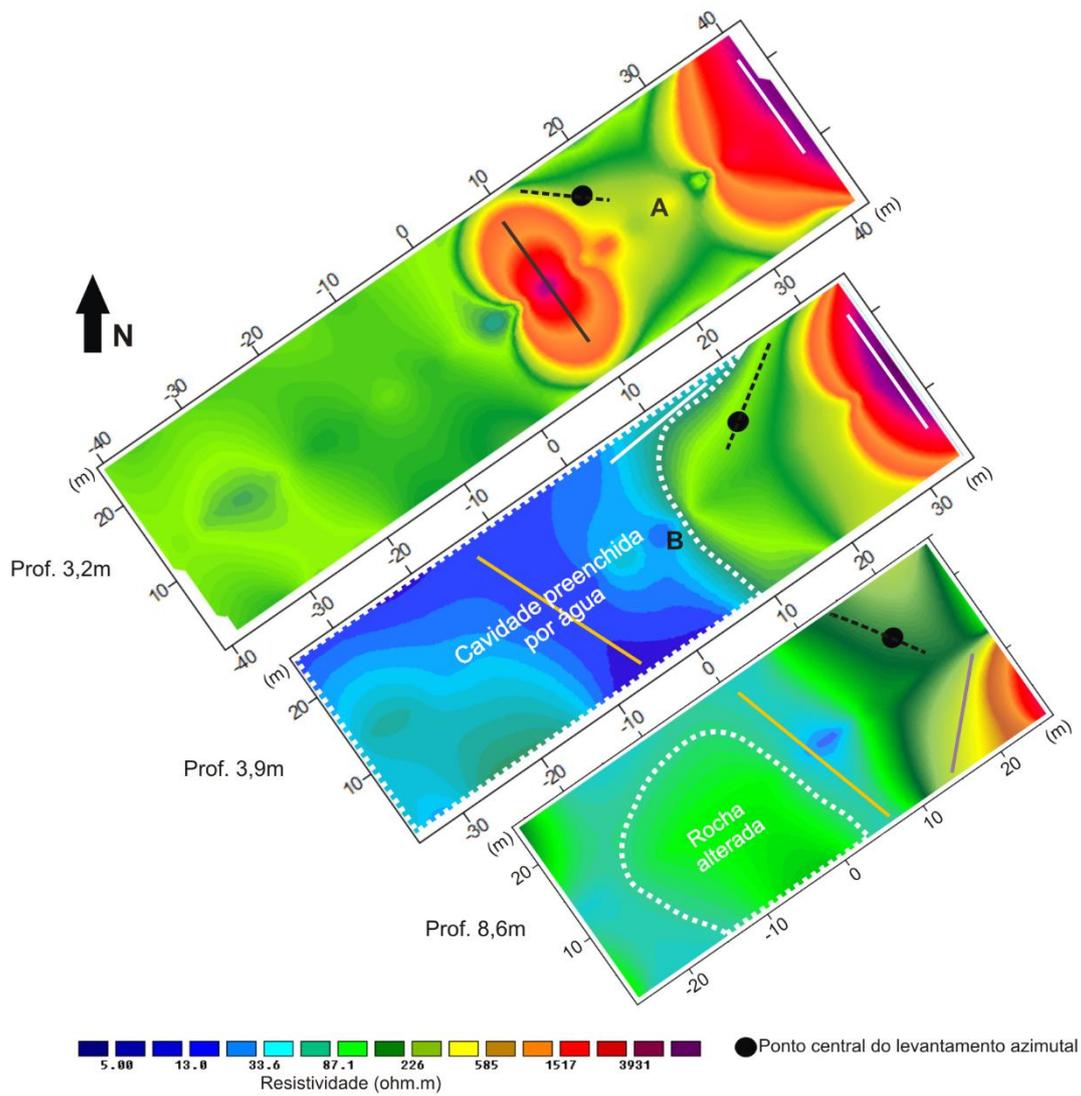


Figura 6.7: Interpretação dos mapas de resistividade levantados com linhas de direção SW-NE. As linhas brancas ressaltam os lineamentos de resistividade.

A Figura 6.8 mostra de forma mais clara como seriam essas variações da resistividade no espaço 3D.

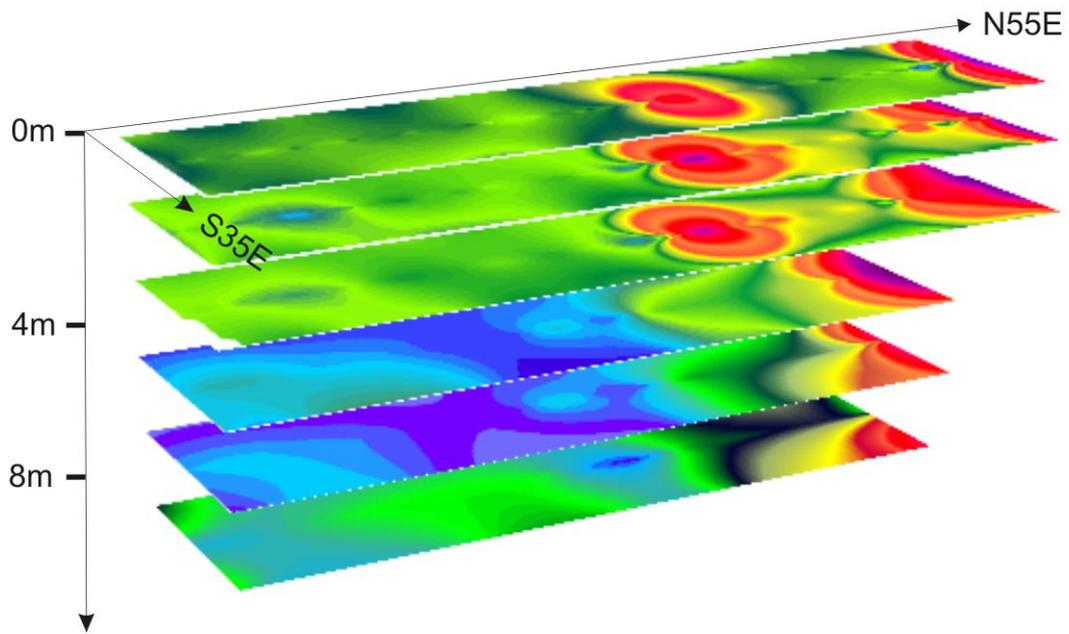


Figura 6.8: Modelo esquemático dos mapas de resistividade em suas respectivas profundidades.

Azimutal

Os diagramas polares dos levantamentos azimutais mostram variações nas direções de máxima e mínima resistividade de acordo com a profundidade de alcance dos levantamentos. Na Tabela 6.1 tem-se um modelo simplificado de tais resultados.

Tabela 6.1: Tabela contendo as principais informações dos levantamentos azimutais.

Profundidade de Investigação	Arranjo	Direção / valor da resistividade máxima	Direção / valor da resistividade mínima
2,1m	Wenner AB=12m	N45W / 350 ohm.m	N45W / 50 ohm.m
2,8m	Schlumberger	N-S / 600 ohm.m	N30W / 30 ohm.m N75E / 100 ohm.m E-W / 100 ohm.m
	Wenner AB=16m	N-S / 1000 ohm.m	N15W / 200 ohm.m N30E / 100 ohm.m E-W / 50 ohm.m
3,2m	Dipolo-equatorial	N60W / 2400 ohm.m	N-S / 110 ohm.m N30E / 110 ohm.m N75E / 110 ohm.m
8,3m	Quadrático	N60W / 1100 ohm.m	N-S / 90 ohm.m N75E / 90 ohm.m

Analisando-se a Tabela 6.1 percebe-se que a resistividade máxima encontrada na profundidade mais rasa, arranjo Wenner AB=12m, é muito baixa em relação as resistividades máximas dos outros levantamentos azimutais. Tal fato pode ser devido a algum erro do equipamento ou pelas características do subsolo nessa profundidade, solo saturado ou rocha muito carstificada. Pela incerteza, optou-se por desconsiderar este levantamento.

A partir da profundidade 2,8m tem-se valores de resistividades máximas compatíveis com a resistividade do metacalcário. As resistividades mínimas desses levantamentos podem ser interpretadas como fraturas preenchidas por água. Com isso em profundidades maiores que 2,8m teriam várias possibilidades de direção de fraturas com água: N15W, N30W, N30E, N75E, NS e E-W. Sendo que de todas essas direções as que apresentam resistividades mais baixas são apenas duas, E-W e N30W. Em profundidades maiores que 3,2m as fraturas de direção N-S, N30E e N75E parecem sobressair em relação às demais.

Se for considerado o procedimento adotado por Taylor e Fleming (1988), no qual se traça uma envoltória elíptica nos diagramas polares e se define a direção predominante das fraturas condutivas como sendo a direção do eixo menor da elipse, as fraturas na profundidade 2,8m seriam as de direção E-W e nas profundidades maiores que 3,2m seriam N30E.

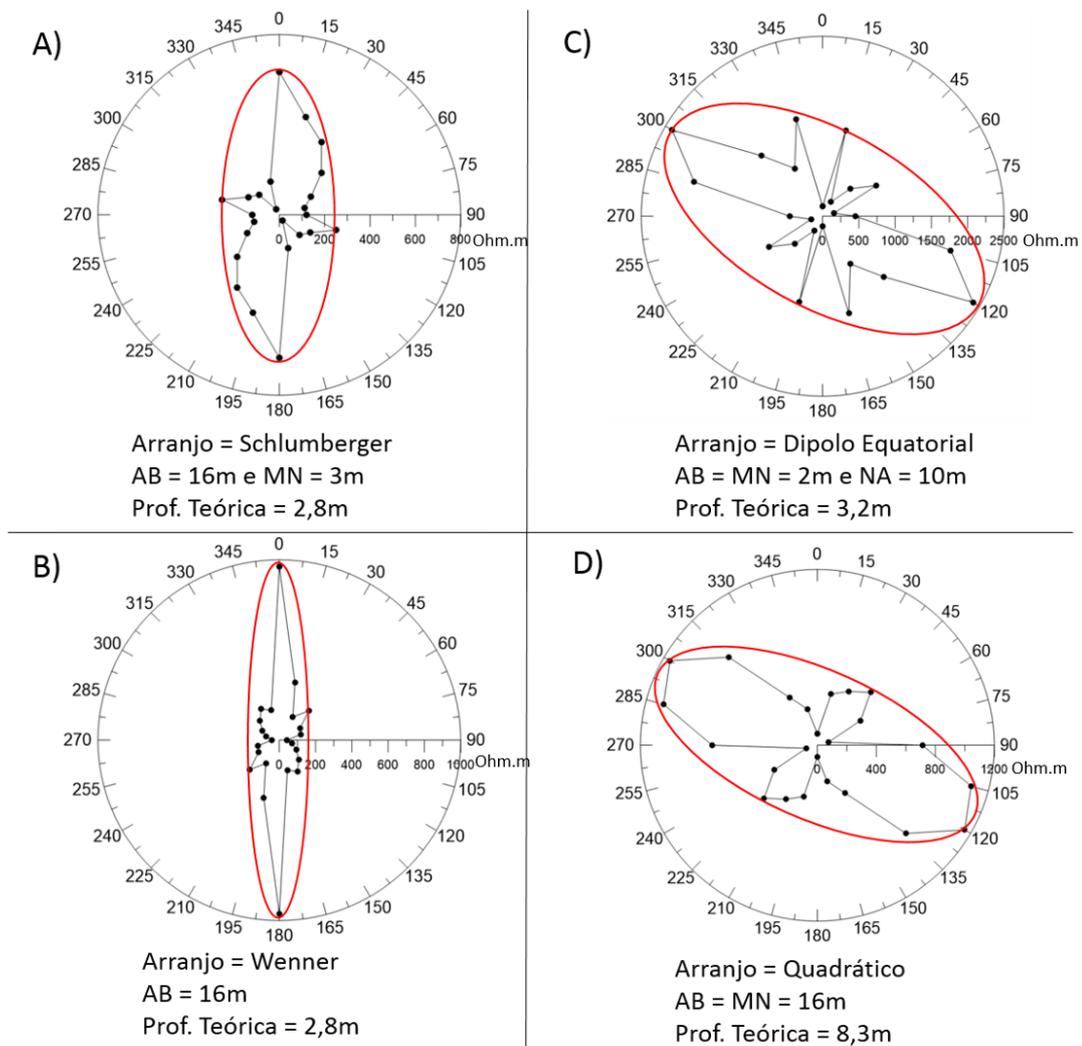


Figura 6.9: Diagramas polares interpretados de acordo com a metodologia de Taylor e Fleming (1988).

EM34

Observando-se os perfis e mapas de condutividade dos levantamentos eletromagnéticos com EM-34 percebe-se que os dados levantados com o dipolo vertical apresentam valores muito menores que aqueles levantados com o dipolo horizontal (Figura 5.33 e Figura 5.34).

No item 3.3 deste trabalho foi mostrado que a condutividade medida não é linearmente proporcional a condutividade real em levantamentos realizados em terrenos com alta condutividade. Este efeito é acentuado nos levantamentos com dipolo vertical. Pelo gráfico da Figura 3.10 nota-se que terrenos com condutividade real acima de 200mS/m nos levantamentos com dipolo vertical apresentarão condutividade medida muito menor. Portanto, isso explicaria essa discrepância nos valores medidos de acordo com a posição dos dipolos. Ou seja, na área de pesquisa, em profundidades teóricas maiores que 15m, apesar dos valores medidos serem baixos na realidade tem-se uma alta condutividade.

Observando-se os mapas com os dados dos levantamentos eletromagnéticos com o dipolo horizontal (Figura 6.10A e B) percebe-se que a condutividade da área na profundidade teórica de 15m é menor que na profundidade de 7,5m. Uma possível interpretação para essa profundidade mais resistiva seria a existência de metacalcário menos carstificado que diminuiria a condutividade em relação aos porções sobrejacentes e subjacentes.

Em praticamente todas as profundidades observa-se que a porção nordeste dos mapas mostram um padrão mais condutivo, ou seja seriam áreas mais carstificadas (áreas ressaltadas pelas linhas brancas tracejadas na Figura 6.10).

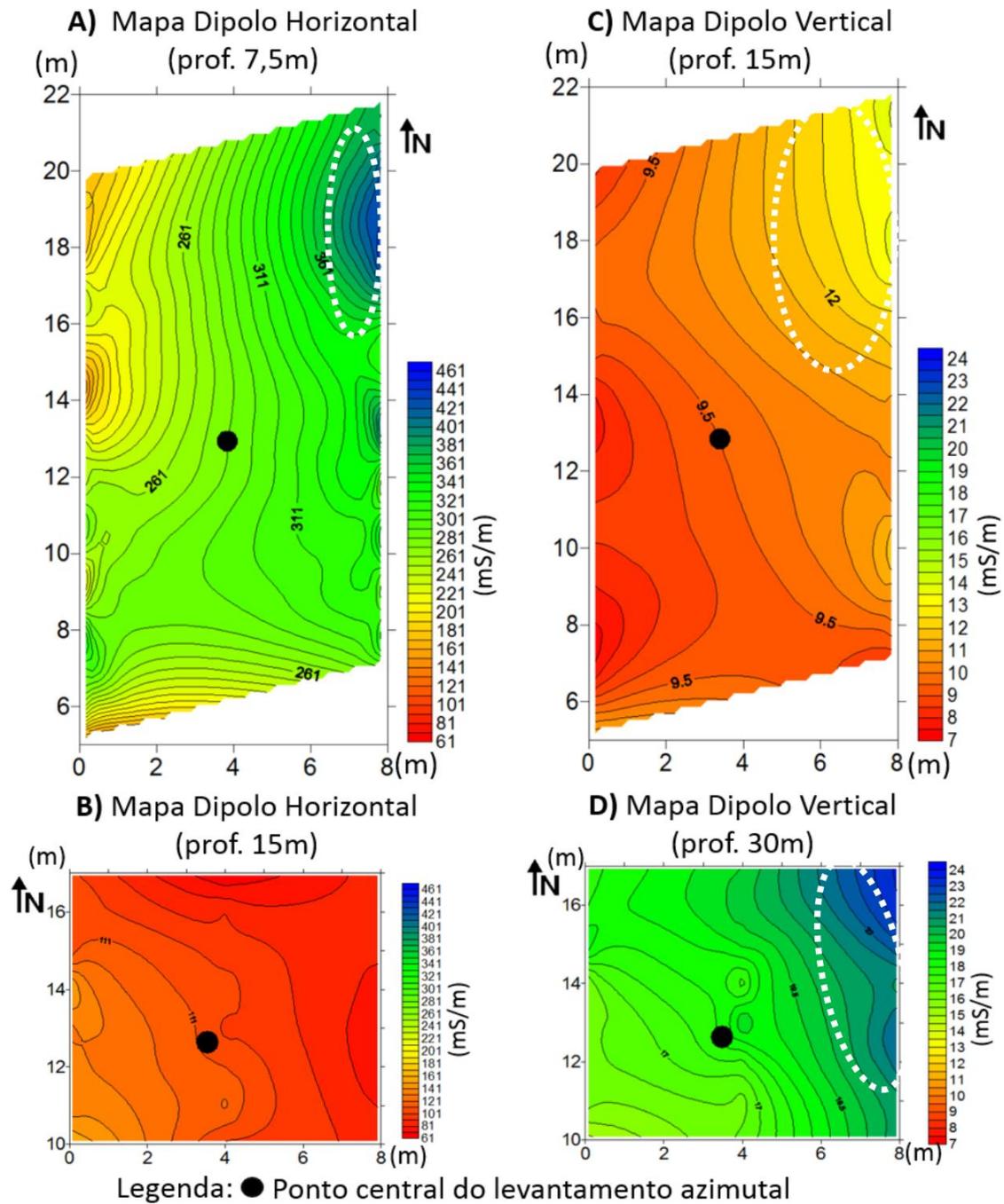


Figura 6.10: Interpretação dos mapas de condutividade elétrica obtida com o EM-34.

GPR

Em todos os radargramas é observada uma zona de atenuação de sinal a uma profundidade aproximada de 1,3m. Essa perda de sinal marca a passagem de uma porção menos condutiva para outra muito condutiva podendo ser interpretada como o nível freático associado a um solo argiloso orgânico.

Nos radargramas GPR4-100 e GPR4-200 é notado um alto nessa linha de mudança de propriedades físicas do meio. Esse alto encontra-se nos radargramas entre as distâncias de 30 e 40m. Em campo nota-se que nessas proximidades existe rocha aflorante.

As feições lineares observadas principalmente nos radargramas GPR5-200 e GPR5-50 podem indicar traços das fraturas presentes no metacalcário, sendo que a maioria dessas descontinuidades apresenta mergulho subvertical (Figura 5.38).

Com relação ao contraste de textura observado entre as profundidades de 5 e 15m no radargrama GPR6-50 (Figura 5.39A), novamente tem-se mudança nas propriedades físicas do meio. Essa região pode demarcar uma porção da rocha mais carstificada ou até mesmo uma cavidade preenchida por água.

Comparação dos resultados

Da comparação dos mapas de resistividade observa-se que há coerência entre uma das anomalias resistivas, sendo esta reflexo do flanco sudoeste do anticlinal vazado (Figura 6.11). A anomalia de alta resistividade observada na porção oeste dos mapas construídos a partir dos levantamentos de direção N-S provavelmente é a mesma identificada na porção central dos mapas mais superficiais originados dos levantamentos SW-NE (Figura 6.11). Tais anomalias se diferenciam um pouco em relação ao formato. No entanto, acredita-se que a forma da anomalia do mapa levantado com linhas SW-NE é mais confiável. Pois a direção de maior alongamento desta anomalia (NW) é coerente com a direção do flanco sudoeste do anticlinal vazado (N40W). Outro ponto a ser considerado é que o levantamento de direção SW-NE apresenta maior densidade de pontos de leitura que o levantamento N-S.

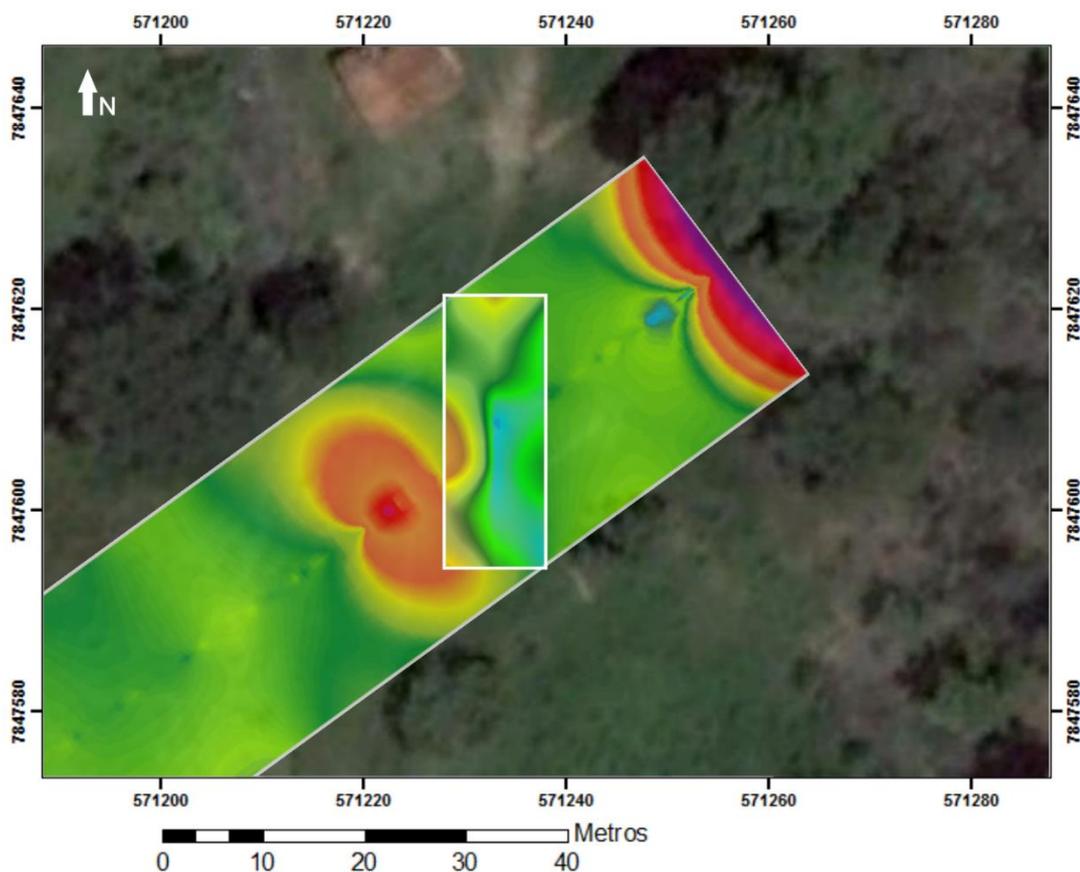


Figura 6.11: Sobreposição dos mapas de resistividade e a imagem de Landsat.

Os lineamentos estruturais predominantes em todas as escalas de imagens de sensores remotos analisadas nesta pesquisa apresentam direção N30W (Figura 5.3, Figura 5.5, Figura 5.7 e Figura 5.10). Nesta direção também tem-se os lineamentos que condicionam o alongamento da dolina que está localizada a sul da área de estudo (Figura 5.9). Esses lineamentos N30W podem ser reflexo da interseção do acamamento dobrado com a superfície topográfica ou podem ser o traço das fraturas de tração que ocorrem paralelamente ao eixo das dobras (N28W) (Figura 5.12). Inclusive em tal direção tem-se a família F4 que apresenta a maior parte das fraturas abertas (Figura 5.13 e Figura 5.16).

Um lineamento E-W de tamanho expressivo é observado na imagem SRTM e no mapa magnetométrico (Figura 2.2 e Figura 5.2). Este lineamento está localizado a norte da área de estudo, a aproximadamente 2km. Nessa direção tem-se a família de fraturas F2 (N85W) que é predominante em campo (Figura 5.13), no entanto, ela apresenta pequena expressão regional por ter poucos lineamentos em tal direção.

Nos mapas de lineamentos com escalas pequena e média provenientes da imagem SRTM e fotos aéreas, respectivamente, a direção N65E é vista de forma expressiva pela quantidade de lineamentos (Figura 5.2, Figura 5.4 e Figura 5.6). Também são vistos em grande número no mapa de lineamentos provenientes dos dados de magnetometria (Figura 2.2). Essa direção coincide com a família de fraturas F3 (segunda com maior número de medidas em campo) e é praticamente perpendicular ao eixo do anticlinal (Figura 5.13).

Analisando-se os diagramas polares contendo os dados azimutais observa-se que na porção mais rasa do terreno (profundidade 2,8m) tem-se uma tendência de resistividades menores nas direções NW e/ou E-W (Figura 6.12). Direções essas que coincidem com a família de fraturas F4 que são as fraturas mais abertas, e F2 que são as mais frequentes (Figura 5.13). Em profundidades maiores (3,2 e 8,3m) observa-se nos diagramas polares que a resistividade menor passa a ocorrer na direção NE, paralela à família de fraturas F3 (Figura 6.12). Esse basculamento na direção da menor resistividade passando de NW para NE com o aumento da profundidade pode ser devido ao aparecimento de um duto de direção NE proveniente da cavidade principal que apresenta direção NW. Os mapas de resistividade levantados com as linhas SW-NE e os mapas de condutividade mostram essa crescente carstificação para NE em profundidades maiores (Figura 5.26, Figura 5.27 e Figura 5.34).

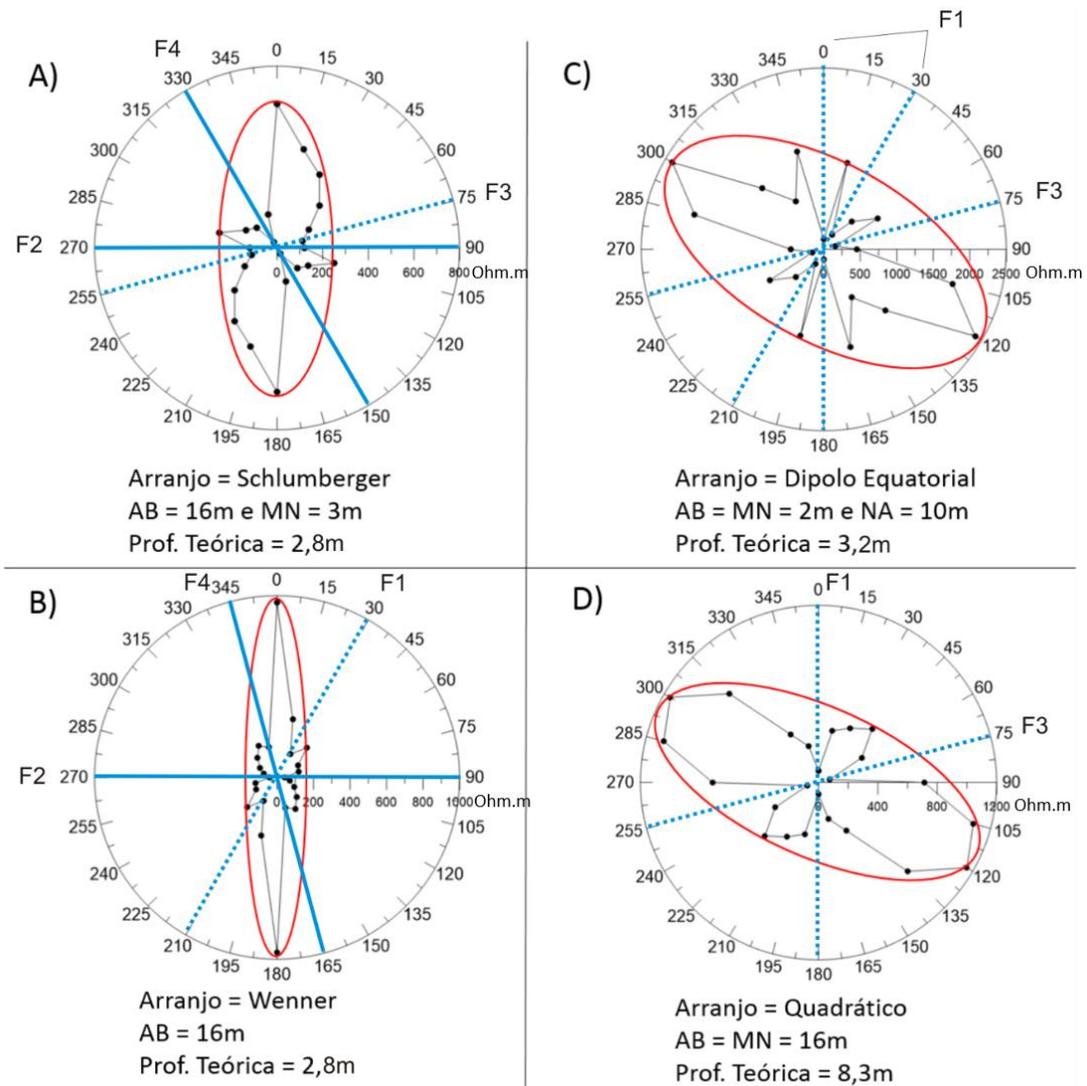


Figura 6.12: Interpretação dos diagramas polares de levantamentos azimutais. Comparação das resistividades baixas com as famílias de fraturas representadas pelas linhas azuis, sendo que as linhas cheias representam as fraturas mais abertas. Em vermelho tem-se o procedimento de interpretação por Taylor e Fleming (1988).

Pelo método da elipse (Taylor e Fleming, 1988) a água ocorreria nas fraturas de direção E-W (família F2) na profundidade de 2,8m (Figura 6.12). Mas observando os outros dados, como lineamentos, anomalias geofísicas e fraturas cavernosas, acredita-se que além dessa direção também ocorra fluxo de água na direção N45W (família F4). Já em profundidades maiores que 3,2m pelo método da elipse o fluxo ocorreria na direção N30E, família F1, (Figura 6.12). No entanto a direção N65E é mais expressiva. Há várias medidas de lineamentos em tal direção, anomalias geofísicas, maior quantidade de medida de fraturas e maiores aberturas. Logo, acredita-se que o fluxo ocorra nessa direção em maiores profundidades.

Da análise dos dados de acamamento com os de resistividade percebe-se que a dobra vista no estereograma também pode ser notada nos perfis de resistividade de direção SW-NE. Os menores valores de resistividade no perfil RES2 mostram que a carstificação pode estar ocorrendo ao longo do plano de acamamento que está dobrado e por isso apresentase como uma anomalia curvilínea. Essa estrutura está ressaltada por uma linha preta pontilhada na Figura 6.13.

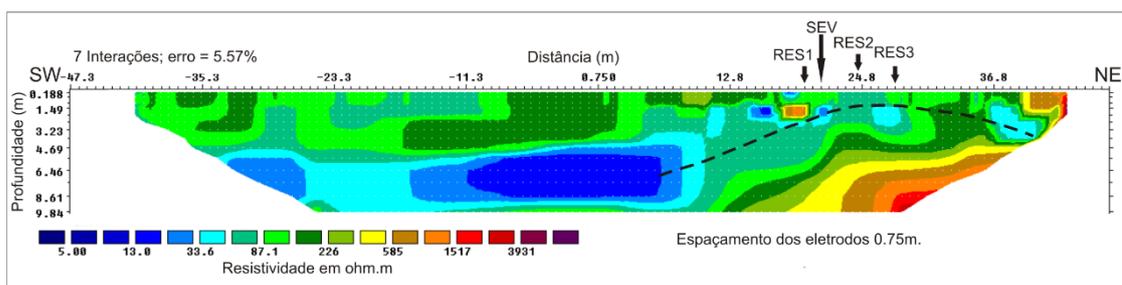


Figura 6.13: Perfil de resistividade, RES5, com interpretação de anticlinal em linha pontilhada.

A partir da correlação dos dados da SEV com os de GPR percebe-se que na profundidade de 1,3m há uma mudança brusca nas propriedades físicas do subsolo passando de resistivo para pouco resistivo. Essa mudança foi interpretada como a passagem do solo não saturado para saturado e logo abaixo teria-se a rocha bastante carstificada. Nessa parte bastante carstificada, entre 1,3 e 6m de profundidade, nota-se a existência de uma possível cavidade vista na SEV, nos caminhamentos de eletrorresistividade e no radargrama GPR6-50. Essa cavidade teria altura aproximada de 5m e largura de 12m e está abaixo do nível freático. Abaixo dessa cavidade parece ocorrer outra em profundidade aproximada de 20m. Essa interpretação advém dos dados da SEV e do levantamento com o EM-34. Ressalta-se que a possibilidade de haver duas cavidades, sendo uma delas próxima da superfície, torna o risco de colapso do terreno muito alto.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com essa pesquisa foi possível melhorar o entendimento da área, correlacionando dados de geofísica, de sensores remotos e de levantamento estrutural com o objetivo de averiguar as condições do maciço rochoso para evitar possíveis problemas geotécnicos.

Como resultado dos estudos, salientam-se os seguintes pontos:

- na área identificou-se um anticlinal suave com eixo sub-horizontal de direção N30W. A zona de charneira está erodida (anticlinal vazado), restando afloramentos apenas nos flancos. A direção do eixo é aproximadamente coincidente com a direção de lineamentos em todas as escalas de imagem dos sensores remotos analisados nesse trabalho;

- há 4 famílias de fraturas subverticais identificadas em campo: N15E (F1), N85W (F2), N65E (F3) e N45W (F4). A família F2 é a mais frequente e a F4 apresenta as fraturas mais abertas, classificadas como cavernosas;

- das interpretações dos dados geofísicos, constata-se:

- a possível existência de cavidades preenchidas por água. Elas são sub-horizontalizadas e surgem a partir da profundidade aproximada de 2m. Se formam provavelmente pela percolação de água na junção das fraturas subverticais e do acamamento do metacalcário. A cavidade de maior extensão em área apresenta direção NW-SE e está localizada na região oeste da área de pesquisa. Em sua continuidade a sul, tem-se uma dolina preenchida de água e a norte a dimensão da cavidade tende a diminuir. O desenvolvimento dessa cavidade se dá na direção NW que coincide com a orientação dos lineamentos mais frequentes e também com a direção do eixo do anticlinal. Em profundidades maiores que 3,2m nota-se a presença de um conduto de direção NE-SW interligado a cavidade principal. Os levantamentos azimutais mostraram bem essa variação na direção do

desenvolvimento da cavidade de acordo com o aumento da profundidade. Uma outra cavidade provavelmente ocorre a uma profundidade maior, aproximadamente 20m, aumentando ainda mais o risco de colapso do terreno;

- que a água parece ocorrer no maciço nas fraturas subverticais em três direções principais, família F2 (N85W) e F4 (N45W) nas porções mais rasas e família F3 (N65E) em profundidades maiores, sendo que essas fraturas se interconectam com o acamamento. Essas direções foram determinadas principalmente com base nos dados obtidos pelos levantamentos azimutais de eletrorresistividade;
- que a profundidade em que o solo torna-se saturado é de aproximadamente 1,3m, estando próximo dessa profundidade também o contato do solo com a rocha carstificada. A espessura do solo diminui quando próximo aos afloramentos de rocha, como esperado;

- a geologia da área é complexa, com arcabouço estrutural muito anisotrópico e muito heterogêneo devido à carstificação, ficando, dessa forma, difícil estabelecer parâmetros para averiguar a funcionalidade dos levantamentos azimutais de resistividade. Mas de forma geral observa-se que esta técnica pode ser bastante útil como um complemento para identificar padrão de fraturas subverticais saturadas em uma escala de detalhe. Outro ponto positivo dos levantamentos azimutais é que eles atingem grandes profundidades de investigação utilizando pouco espaço superficial. Constitui-se assim uma técnica adequada para locais pequenos como em zonas urbanas, áreas industriais e de mineração;

- com este trabalho, reafirma-se a importância da utilização de mais de um método e/ou técnica geofísica na caracterização de terrenos, uma vez que os dados levantados em cada método se complementam, levando assim a um modelo final mais preciso;

- ressalta-se ainda que na área existem algumas fontes de ruído, como cercas de arame e fiação aérea, que podem ter interferido nos resultados, sobretudo nos dados eletromagnéticos indutivos e de GPR.

A partir dessa pesquisa surgiram algumas sugestões de futuros estudos, dentre elas destacam-se:

- analisar a validade dos os levantamentos azimutais em terrenos menos heterogêneos, como terrenos cristalinos, em áreas desprovidas de ruídos;

- realizar na área estudada levantamentos azimutais com o arranjo *Wenner offset*, que segundo a bibliografia tende a reproduzir melhor a questão da heterogeneidade da cobertura pedológica.

REFERÊNCIAS

ABEM. Instruction manual. Terrameter LS.2010. p. 136.

AGUIAR, J.C.M. *Radar de penetração no solo (GPR): aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análise em pavimento flexível*. 2005. 146f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco – Centro de tecnologia e geociências. 2005.

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geoc.*, v.7, p. 285-295, 1977.

ALMEIDA, F.F.M. de. A evolução do Cráton Amazônico e São Francisco comparada com a de seus homólogos no hemisfério Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Anais. Recife: SBG, 1978, v.6, p. 2393-2407.

ALKMIM, F.F.; CHEMALE JR. F.; BACELLAR, L.A.P.; OLIVEIRA, J.R.P.; MAGALHÃES, P.A. Arcabouço estrutural da porção sul da bacia do São Francisco. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. Anais. Belo Horizonte: 1989, v.5, p. 289-293.

ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, Amsterdam, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.

ALKMIM, F.F.; MARTINS-NETO M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A. (eds.) *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte, SBG-MG, p.9-30.

ARANHA, P.R.A. *Estudo das coberturas superficiais e sua dinâmica na Região de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG: Utilizando o Radar de Penetração no Solo (GPR)*. 2003. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de geologia. 2003.

ASTEN, M. W. The influence of electrical anisotropy on mise à la masse surveys. *Geophysical Prospecting*, v.22, p. 238–245, 1974.

BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: a challenge for new resource. *Hydrogeology Journal*, v. 13, p. 148-160, 2005.

BENSON, R.; GLACCUM, R. A.; NOEL, M. R. *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*. National Ground Water Association, Dublin, EUA, 1982, 236 p.

BERTOLLA, L. *Levantamento GPR 4D sobre um derrame de óleo usado em transformadores de energia elétrica: Um estudo controlado em laboratório*. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BOBACHEV, A. IPI2Win, versão 3.0: Moscow State University, 1990-2003.

BORGES, W.R. *Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade*. 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BOSTANUDIN, N.J.F. *Computacional methods for processing Ground Penetrating Radar data*. 2013. 288f. Tese (Doutorado). University of Portsmouth – School of Engineering. 2013.

BRITO, S.N.A; OLIVEIRA, A.M.S. *Geologia de engenharia*. São Paulo: Oficina de textos, 1998. 587 p.

BUSBY, J.P. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. *Geophysical Prospecting*, v.48, p. 677-695, 2000.

CABRAL, J.A.L. Informações Básicas para Gestão Territorial – GATE. Projeto VIDA – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental. Zoneamento geotécnico e aptidão dos terrenos – Município de Sete Lagoas. Belo Horizonte: CPRM. 1996. 36p.

CASTRO, P.T.A. *Os conglomerados associados ao Grupo Bambuí na porção sudoeste do Cráton do São Francisco: sedimentologia, estratigrafia e implicações tectônicas*. 1997. 262 f. Tese (Doutorado) - Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

CASTRO, P.T.A.; DARDENNE, M.A. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context on the São Francisco Supergroup at the southwestern domain of the São Francisco Craton, Brazil. *Rev. Bras. Geociências*, v. 30, n. 3, p. 439-441, 2000.

CHIAVEGATTO, J.R.S. *Análise estratigráfica das seqüências tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco*. 1992. 216 f. Dissertação (Mestrado). - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1992.

CHIAVEGATTO, J.R.S.; DARDENNE, M.A. Contribuição à sedimentologia e estratigrafia do Grupo Bambuí no norte de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. Atas. Ouro Preto: SBG, 1997, v. 9, p. 81-82.

CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Mapa do Estudo da dinâmica dos recursos hídricos da região cárstica dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos*. Belo Horizonte: 1987. Escala 1:25.000.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Informações básicas para a gestão territorial; região de Sete Lagoas – Lagoa Santa. Caracterização geomorfológica. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1994a. 33 p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINEIRA – CPRM. Projeto Sete Lagoas – Abaeté. Estado de Minas Gerais. Programa Geologia do Brasil. Ministério de

Minas e Energia. Secretaria de Geologia, mineração e transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Belo Horizonte. 2010. 138 p.

DALZIEL, I.W.D. Neoproterozoic – Paleozoic geography and tectonics: review, hypothesis and environmental speculation. *Geological Society of America Bulletin*, v. 109, n 1, p.16– 42, 1997.

DANIEL, P.H.; TEODORO, A.P. *Mapeamento geológico da cidade de Sete Lagoas e adjacências, com vistas a aplicação no planejamento urbano*. 1992. 67 f. Trabalho de Graduação – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

DARDENNE M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Anais. Recife: SBG, 1978, v.30, p.597-610.

DARDENNE M.A. Os Grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. In: SIMPÓSIO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS. Anais. Salvador: SBG, 1981, p.140-157.

DARDENNE M.A.; WALDE D.H.G. A estratigrafia dos Grupos Bambuí e Macaúbas no Brasil Central. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. Anais. Diamantina: SBG, 1979, v.1, 1979, p.43-53.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, Embrapa Produção de Informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 1999. 412 p.

FERRI, M.G. *Vegetação Brasileira*. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: USP, 1980. 157 p.

GANDOLFO, O.C.B. *Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa*. 2007. 215f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Paulo - Instituto de Geociências. 2007.

GANDOLFO, O.C.B.; GALLAS, J.D.F. O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n.3, p. 227-235, 2007..

GALVÃO, P.H.F. *Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. 2015. 124 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências, São Paulo, 2015.

GALVÃO, P; HALIHAN, T; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal* , v.23, n.7, p. 1499 – 1513, 2015.

GENTHNER, C.; FERRARI, J.A.; KARMANN, I. Identificação das áreas de recarga de fontes cársticas com o uso do traçador rodamina FWT (Área carbonática Lajeado-Bombas, Iporanga – SP). *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, v.24, p.11-23, 2003.

GORIUNOV, I.I.; MALOTKOV, L.A. Electrical Resistance of fractured rock and its relationship to reservoir properties. Translation of the Denver Mining Research Center. U.S. Bureau of Mines. Translators; Law; D.A.; Brown, J.W; 1961.

GRAPHER, graphing system, versão 11.4.770: Golden *Software*, 2015.

GROHMANN, C. H.; Campanha G.A.C.; Soares Junior A.V.; versão 0.1.2. OpenStereo, 2011.

HABBERJAM, G.M. The effects of anisotropy on square array resistivity measurements. *Geophysical Prospecting*, v.20, p. 249-266, 1972.

HABBERJAM, G.M.; WATKINS, G.E. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*, v.15, p. 221-235, 1967.

HOBBS, B. E.; MEANS, W. D.; WILLIAMS, P. F. *An outline of structural geology*. New York: Wiley International Edition, 1976. 571 p.

HOLCOMBE, R. Georient, versão 9.5.1: Holcombe, 2015.

ISRM – International Society for Rock Mechanic. *Suggested methods for the quantitative description of rock masses*. England: Pergaman Press LTD Oxford, 1983, 132 p.

IBGE. 2014. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malhas digitais. Disponível em: < <ftp://geoftp.ibge.gov.br/> >. Acesso em: 16 de fevereiro 2016.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 438 p.

KELLER, G.V; FRISCHKNECHT, F.C. *Electrical methods in geophysical prospecting*. New York: Pergamon Press, 1966. p. 519.

LAGO, A.L. *Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto – SP*. 2009. 208 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LANE, J.W.,Jr; HAENI, F.P.; WATSON, W.M. Use of a square-array direct-current resistivity method to detect fractures in crystalline bedrock in New Hampshire. *Ground Water*, v.33, n.33, p. 476-485, 1995.

LIMA, F.M.F.S; FONSECA, F.H.R.; MATINAGA, L.K. *Geologia e hidrogeologia da bacia Gordura-Escrivânia, MG*. 2017. 144f. Trabalho de conclusão de curso - Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LOKE, M.H. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. 2000.

MACHADO, D.A. *Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo – Sete Lagoas/MG*. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MAGALHÃES, L. *Análise estrutural qualitativa nos sedimentos do Grupo Bambuí, região Sudeste da Bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas – Serra do Cipó)*. 1988. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1988.

MAGALHÃES, P.M; CHEMALE Jr,F.; ALKMIM, F.F. Estilo tectônico da porção sudoeste da Bacia do São Francisco. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. Anais. Belo Horizonte: SBG, 1989, v.5, p. 281-288.

MARTINS-NETO, M.A.; ALKMIM, F.F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: registros da quebra de Rodínea e colagem de Gondwana. In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A. (ed.) *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte, SBG/Núcleo MG, p. 31-54.

MMA 2008. Ministério do Meio Ambiente. Dados Geográficos. Disponível em: < <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm#> >. Acesso 16 de Fevereiro 2016.

NABIGHIAN, N. M.; MACNE, J. C. Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods. IN: Electromagnetic methods in applied geophysics- Applications part A and part B. Investigatios in Geophysics, chapter 6, 1991.

MCNEILL, J.D. Eletromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical note TN, 6. 1980. p.15.

MIRANDA E. E. de, (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 26 janeiro 2016.

NASCIMENTO, C.T.C.; KOIDE, S.; PIRES, A.C.B. Análise Geofísica, por meio de GPR, no espalhamento de efluentes de fossa séptica no subsolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. São Paulo: 1998, p. 1-9.

NETO, P.X. *Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém – CE*. 2006. 191 f. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Ciências Exatas e da Terra.

OLIVEIRA, F.A.F. Informações básicas para gestão territorial – Geofísica aplicada ao estudo dos abatimentos da Rua Braz Filizola - Sete Lagoas, MG. In: Projeto VIDA. Belo Horizonte: CPRM, 1996, v.8.

PANOSO, L.A.; RAMOS, D.P.; BRANDÃO, M. Solos do campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro. Boletim de pesquisa e desenvolvimento 5. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2001.

PALMER, A.N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of American Bulletin*, v. 103, 21p, 1991.

PESSOA, P.F.P. *Caracterização Hidrogeológica da Região Cárstica de de Sete Lagoas – MG: Potencialidades e Riscos*. 1996. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

PESSOA, P.F.P. *Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG*. 2005. 375 f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005.

PFLUG, R.; RENGER, F. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton Sanfranciscano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Anais. Aracaju: SBG, 1973, v.2, p.5-19.

RES2DIN VX32, versão 3.71: Geotomo *Software*, 1995-2011.

RIBEIRO, JOSÉ HELENO, MANOEL PEDRO TULLER, ANDRÉ DANDERFER FILHO. Mapeamento Geológico - Região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins E Funilândia - Minas Gerais. In: Projeto VIDA. Belo Horizonte: CPRM, 2003.

RIZZINI, C.T. *Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos, ecológicos e florísticos*. 2 ed. São Paulo: Âmbito Cultural Edições, 1997. 747 p.

ROCCA, F., CAFFORIO, C., PRATI, C. Synthetic aperture radar: A new application for wave equation techniques. *Geophysical Prospecting*, v. 37, n.3, p. 809-830, 1989.

RODRIGUES, S.I. *Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP*. 2004. 89f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. 2016.

SALGADO J.R.P. *Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da formação Sete Lagoas, município de Sete Lagoas (MG)*. 2016. 85f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SCHLUMBERGER, C.M.; LEONARDON, E.G. Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation. *American Institute Of Mining and Metallurgical Engineers*, Tech. v. 505, p. 337, 1933.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L.M. Caracterização e classificação de maciços rochosos. 1998. In OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. Geologia de engenharia. São Paulo: Oficina de Texto, 1998. p. 15-38.

SILVA A.B. da. Abatimento de solo da cidade de Sete Lagoas, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 12, p. 58-66, 1988.

SNOW, D.T. Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, Washington, v. 5, n.6, p.1273-1289, 1969.

SURFER, surface mapping system, versão 8.02: Golden *Software*, 2002.

SZALAI, S.; NOVÁK, A.; SZARKA, L. Depth of investigation of dipole-dipole, noncolinear and focused geoelectric arrays. Near Surface, 13th European Meeting of environmental and engineering geophysics, Istanbul, Turkey, 2007, p. 26-30.

TAYLOR, R.W. Evaluation of geophysical surface methods for measuring hydrological variables in fractured rock units. U.S. Bureau of Mines Research Contract Report HO318044, 1982.

TAYLOR, R.W. The determination of joint orientation and porosity from azimuthal resistivity measurements. 1984. In Nielsen, D.M., and Curl, Mary (eds.). National Water Well Association/U.S. Environmental Protection Agency Conference on the applications of geophysics and borehole data to hydrogeological investigations. San Antonio, Texas. Proceedings. Worthington, Ohio. National Water Well Association, p. 37-49.

TAYLOR, R.W.; JANSEN, J. Azimuthal resistivity techniques to delineate zones of high secondary porosity in fracture controlled aquifers. In: Proceedings of the second annual outdoor action conference, NWWA, Dublin, Ohio, p. 153-170, 1988.

TAYLOR, R.W.; FLEMING, A.H. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water*, v. 26, n. 4, p. 464 – 474, 1988.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. AND SHERIFF, R.E. *Applied geophysics*. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 792p.

TROMPETTE R. 1994. Geology of Western Gondwana (2000-500 Ma). Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa. A.A. Balkema, Rotterdam, 350 p.

TULLER, M.P; RIBEIRO, J.H.; SIGNORELLI, N; FÉBOLI, W.L.; PINHO, J.M.M. Projeto Sete-Lagoas – Abaeté – Estado de Minas Gerais. CPRM Belo Horizonte. 2010.

VESTENA, LEANDRO REDIN; KOBIYAMA, MASATO; SANTOS, LEONARDO J. C. Considerações Sobre Gestão Ambiental em Áreas Carste. *RA' EGA (UFPR)*, v. 4, n. 6, p. 81-94, 2002.

VIANA, J.H.M. *Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de latossolos, visando o mapeamento de áreas produtivas*. 2005. 194f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas/Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

WHITE, W.B. Karst hydrology: Recent developments and open questions. *Engineering Geology*, v. 65, p.85-105, 2002.

WYLLIE, D.C.; MAH, C.W. *Rock Slope Engineering: civil and mining*. 4ed. Londres: Spon Press, 2004. 431p.

ANEXOS

Anexo I

Medidas das atitudes dos acamamentos

Direção da máximo declive	Mergulho	Direção da máximo declive	Mergulho
350	15	300	5
20	16	220	11
28	20	150	20
30	20	250	8
90	20	168	9
110	2	200	17
45	10	206	15
10	8	230	14
75	10	238	20
0	17	239	14
45	20	250	7
55	10	223	35
0	5	200	33
12	12	230	23
345	15	230	23
343	22	230	32
0	10	180	18
278	30	204	15
285	33	230	14
288	28	65	7
280	30	160	18
210	32	55	15
320	15	120	25
28	21	70	5
354	14	195	25
47	19	255	5
0	14	280	8
15	10	273	27
357	15	225	18
11	18	145	10
86	14	220	22
63	9	125	10
44	11	55	10
72	12	215	23
225	15	280	8
245	15	215	20

Anexo II

Medidas das atitudes, espaçamentos e aberturas das fraturas

Direção da máximo declive	Mergulho	Espaçamento (m)	Abertura (cm)	Direção da máximo declive	Mergulho	Espaçamento (m)	Abertura (cm)
235	90		40 - 150	234	84	10,9	107
333	70	3	2,0 - 5,0	253	90		
325	80			235	90		107
155	90			250	89	9,65	5
190	90		2,0 - 5,0	330	70		30
155	90			120	25	0,5	50
337	77			170	90	0,6	3
360	82			340	84		
160	90		2,0 - 5,0	195	85		20
320	82			220	72		118
185	90	3		160	90	0,4	15
185	90			225	89	7,25	64
170	90			145	90	1,2	3
290	90	1 - 1,5	15	5	83	1,2	3
290	90			250	77		8
285	90			355	70		8
195	90	0,05	0,2	120	83	0,4	5
185	90		0,2	170	87	9,81	0
110	80			325	72	9,81	0
230	90	2	100	200	87		
152	85			5	90		100
140	85			260	70		
355	78	0,2	3	280	82		6
12	85			325	72		
175	90			290	70		1
185	90			110	90		10
188	90			40	83	0,5	10
90	90	5	>100	85	88	0,4	5
355	70	0,3	2	25	80		
355	83			5	90		>100
175	84		2	30	90		30
50	75			250	88		
0	84		0	40	82		> 100
85	80		1	125	90		
250	78		3	235	70		
180	90		0	230	90		>100
285	80		1	225	90		>100
265	90		3	215	90		>100

Anexo II

Medidas das atitudes, espaçamentos e aberturas das fraturas

Direção da máximo declive	Mergulho	Espaçamento (m)	Abertura (cm)	Direção da máximo declive	Mergulho	Espaçamento (m)	Abertura (cm)
200	90		>100	140	80		
235	90		>100	6	90		
230	90		>100	150	80		5
225	90		>100	325	90		
190	90		>100	82	90		
336	85		5	82	80		
338	90			235	90		>100
236	90			190	90		>100
168	85			210	90		>100
156	90		3	210	90		>100
50	85			172	73		
342	90			157	88		
183	85			128	63		
0	80			30	72		
90	90			295	70		0
200	75	1,5	10	10	70		>100
185	73			20	75		>100
300	80		10	210	85		>100
115	90			35	80		>100

Anexo III
Dados da SEV

MN (m)	Background (mV)	AB (m)	AB/2 (m)	K	I (mA)	V (mV)	V corrigido (mV)	R (ohm.m)
1	-111	5	2,5	19,64	110	640	751	134,1
1	-113	6	3	28,27	110	370	483	124,2
1	-112	7	3,5	38,48	100	170	282	108,5
1	-113	8	4	50,27	110	85	198	90,5
1	-112	9	4,5	63,62	90	35	147	103,9
1	-110	10	5	78,54	80	-37	73	71,7
1	-110	11	5,5	95,03	80	-50	60	71,3
2	-72	10	5	39,27	80	81	153	75,1
2	-63	11	5,5	47,52	84	68	131	74,1
2	-78	12	6	56,55	81	20	98	68,4
2	-83	14	7	76,97	81	-13	70	66,5
2	-85	16	8	100,53	80	-33	52	65,3
2	-93	18	9	127,23	120	-18	75	79,5
2	-94	20	10	157,08	120	-35	59	77,2
2	-95	22	11	190,07	150	-41	54	68,4
4	-112	20	10	78,54	140	12	124	69,6
4	-140	22	11	95,03	120	36	176	139,4
4	-155	24	12	113,10	100	-71	84	95,0
4	-201	28	14	153,94	100	-143	58	89,3
4	-205	32	16	201,06	85	-157	48	113,5
4	-209	36	18	254,47	100	-165	44	112,0
4	-212	40	20	314,16	80	-174	38	149,2
5	-19	40	20	251,33	120	38	57	119,4
5	-37	45	22,5	318,09	110	26	63	182,2
5	-58	50	25	392,70	80	-26	32	157,1
5	-81	55	27,5	475,17	98	-52	29	140,6
5	-86	60	30	565,49	100	-64	22	124,4

Anexo IV

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade N-S

Nome: RES1				Sentido do caminharmento: N -->S				
Arranjo: Dipolo-dipolo		Data: 26/05/2016		Espaçamento entre as linhas: 4m				
n	Posição AB	AB (m)	MN (m)	BM (m)	K	I (mA)	V (mV)	R (ohm.m)
1	1	4	4	4	75,4	23,5	15,4	49,3
2		4	4	8	301,6	15,0	4,6	92,3
3		4	4	12	754,0	15,3	20,5	1010,2
4		4	4	16	1508,0	15,5	26,8	2610,7
5		4	4	20	2638,9	15,7	29,3	4937,5
1	2	4	4	4	75,4	15,7	28,4	136,0
2		4	4	8	301,6	15,6	75,0	1450,0
3		4	4	12	754,0	16,0	87,8	4129,7
4		4	4	16	1508,0	16,0	10,9	1026,7
5		4	4	20	2638,9	10,5	5,5	1382,3
1	3	4	4	4	75,4	11,0	40,3	275,2
2		4	4	8	301,6	11,6	100,7	2629,5
3		4	4	12	754,0	16,4	7,9	363,4
4		4	4	16	1508,0	16,0	2,4	226,2
5		4	4	20	2638,9	18,2	52,2	7577,2
1	4	4	4	4	75,4	6,4	80,5	951,3
2		4	4	8	301,6	13,7	5,4	119,0
3		4	4	12	754,0	5,8	48,5	6304,9
4		4	4	16	1508,0	5,3	93,8	26942,4
1	5	4	4	4	75,4	6,8	34,9	387,5
2		4	4	8	301,6	6,8	37,9	1688,4
3		4	4	12	754,0	9,6	46,9	3698,9
1	6	4	4	4	75,4	8,6	16,1	141,2
2		4	4	8	301,6	9,1	34,7	1156,4
1	7	4	4	4	75,4	8,8	36,4	311,9

Anexo IV

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade N-S

Nome: RES2				Sentido do caminhamento: N -->S				
Arranjo: Dipolo-dipolo		Data: 26/05/2016		Espaçamento entre as linhas: 4m				
n	Posição AB	AB (m)	MN (m)	BM (m)	K	I (mA)	V (mV)	R (ohm.m)
1	1	4	4	4	75,4	15,4	69,2	338,4
2		4	4	8	301,6	16,0	91,2	1719,1
3		4	4	12	754,0	16,3	3,9	180,4
4		4	4	16	1508,0	16,5	9,2	841,8
5		4	4	20	2638,9	16,8	12,9	2031,2
1	2	4	4	4	75,4	14,5	54,7	284,4
2		4	4	8	301,6	15,8	4,3	82,1
3		4	4	12	754,0	14,3	3,8	200,8
4		4	4	16	1508,0	14,8	18,8	1919,4
5		4	4	20	2638,9	15,5	31,9	5445,2
1	3	4	4	4	75,4	14,3	7,9	41,7
2		4	4	8	301,6	14,4	10,1	211,5
3		4	4	12	754,0	14,7	9,9	507,8
4		4	4	16	1508,0	14,3	14,2	1502,7
5		4	4	20	2638,9	15,0	12,0	2115,4
1	4	4	4	4	75,4	16,1	6,1	28,6
2		4	4	8	301,6	16,1	5,2	97,3
3		4	4	12	754,0	16,2	11,1	517,3
4		4	4	16	1508,0	15,7	21,7	2088,3
1	5	4	4	4	75,4	15,8	5,3	25,4
2		4	4	8	301,6	15,8	8,6	164,4
3		4	4	12	754,0	16,1	27,6	1295,8
1	6	4	4	4	75,4	15,8	7,1	33,9
2		4	4	8	301,6	15,6	10,4	200,8
1	7	4	4	4	75,4	14,7	14,0	71,6

Anexo IV

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade N-S

Nome: RES3				Sentido do caminhamento: N -->S				
Arranjo: Dipolo-dipolo		Data: 26/05/2016		Espaçamento entre as linhas: 4m				
n	Posição AB	AB (m)	MN (m)	BM (m)	K	I (mA)	V (mV)	R (ohm.m)
1	1	4	4	4	75,4	10,8	13,0	90,7
2		4	4	8	301,6	10,3	14,2	415,8
3		4	4	12	754,0	10,6	14,5	1031,4
4		4	4	16	1508,0	18,7	15,1	1217,0
5		4	4	20	2638,9	8,8	3,5	1049,6
1	2	4	4	4	75,4	9,1	10,3	85,3
2		4	4	8	301,6	9,0	2,9	97,7
3		4	4	12	754,0	9,0	10,2	851,7
4		4	4	16	1508,0	8,9	3,0	509,5
5		4	4	20	2638,9	16,4	0,3	48,2
1	3	4	4	4	75,4	16,7	16,5	74,6
2		4	4	8	301,6	17,5	13,7	236,4
3		4	4	12	754,0	17,2	0,8	35,1
4		4	4	16	1508,0	17,2	1,5	131,2
5		4	4	20	2638,9	17,1	1,0	154,0
1	4	4	4	4	75,4	13,3	7,7	43,6
2		4	4	8	301,6	13,3	6,1	138,4
3		4	4	12	754,0	13,5	1,0	55,8
4		4	4	16	1508,0	13,0	1,1	127,5
1	5	4	4	4	75,4	12,5	10,3	62,2
2		4	4	8	301,6	12,5	3,3	79,6
3		4	4	12	754,0	12,8	3,8	224,7
1	6	4	4	4	75,4	13,0	13,0	75,7
2		4	4	8	301,6	12,1	4,7	117,3
1	7	4	4	4	75,4	12,3	7,8	47,9

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

Nome: RES4				Sentido do caminhamento: SW -->NE			
Arranjo: Dipolo-dipolo			Data: 25/05/2017	Espaçamento entre as linhas: 12m			
n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-42,75	1,5	417,7	2	0,75	1,5	144,3
1	-36,75	1,5	148,7	2	3,75	1,5	116,4
1	-33,75	1,5	31,6	2	6,75	1,5	94,4
1	-32,25	1,5	90,7	2	9,75	1,5	118,7
1	-27,75	1,5	115,1	2	12,75	1,5	152,5
1	-24,75	1,5	139,5	2	15,75	1,5	152,0
1	-23,25	1,5	118,5	2	18,75	1,5	127,5
1	-18,75	1,5	245,2	2	21,75	1,5	109,4
1	-15,75	1,5	168,7	2	24,75	1,5	95,9
1	-14,25	1,5	347,9	2	27,75	1,5	70,8
1	-9,75	1,5	2823,8	2	30,75	1,5	92,5
1	-6,75	1,5	501,3	2	33,75	1,5	83,9
1	-5,25	1,5	282,7	2	36,75	1,5	149,1
1	-0,75	1,5	93,4	2	39,75	1,5	98,9
1	2,25	1,5	129,7	1	-44,25	3	154,5
1	3,75	1,5	117,6	1	-39,75	3	51,1
1	8,25	1,5	95,3	1	-36,75	3	48,8
1	11,25	1,5	106,6	1	-35,25	3	28,9
1	12,75	1,5	161,6	1	-32,25	3	115,6
1	17,25	1,5	146,4	1	-30,75	3	144,4
1	20,25	1,5	140,4	1	-27,75	3	143,6
1	21,75	1,5	146,1	1	-26,25	3	176,2
1	26,25	1,5	110,5	1	-23,25	3	210,6
1	29,25	1,5	105,0	1	-21,75	3	217,2
1	30,75	1,5	109,9	1	-18,75	3	337,6
1	35,25	1,5	118,2	1	-17,25	3	394,4
1	38,25	1,5	157,7	1	-14,25	3	1049,1
1	39,75	1,5	144,6	1	-9,75	3	287,9
2	-44,25	1,5	1540,0	1	-8,25	3	266,3
2	-41,25	1,5	70,9	1	-5,25	3	82,8
2	-35,25	1,5	51,8	1	-0,75	3	121,0
2	-32,25	1,5	103,8	1	0,75	3	101,3
2	-29,25	1,5	138,8	1	3,75	3	118,9
2	-26,25	1,5	144,2	1	8,25	3	121,4
2	-23,25	1,5	170,7	1	9,75	3	113,7
2	-20,25	1,5	200,3	1	12,75	3	133,4
2	-17,25	1,5	273,8	1	14,25	3	150,5
2	-14,25	1,5	435,1	1	17,25	3	131,6

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
2	-11,25	1,5	3055,9	1	18,75	3	134,6
2	-8,25	1,5	292,3	1	21,75	3	99,4
2	-5,25	1,5	112,1	1	26,25	3	68,2
2	-2,25	1,5	76,5	1	27,75	3	82,9
1	30,75	3	84,3	2	-5,25	3	70,1
1	32,25	3	84,9	2	-2,25	3	64,8
1	35,25	3	132,5	2	6,75	3	121,4
1	36,75	3	110,4	2	12,75	3	146,3
4	-45,75	1,5	189,1	2	18,75	3	102,3
4	-42,75	1,5	91,4	2	21,75	3	76,9
4	-36,75	1,5	49,2	2	24,75	3	75,2
4	-33,75	1,5	7,8	5	-45,75	1,5	206,7
4	-30,75	1,5	158,2	5	-41,25	1,5	3500,8
4	-27,75	1,5	132,7	5	-39,75	1,5	1708,1
4	-24,75	1,5	309,3	5	-24,75	1,5	325,3
4	-21,75	1,5	233,4	5	-23,25	1,5	265,7
4	-18,75	1,5	446,1	5	-11,25	1,5	131,1
4	-15,75	1,5	521,3	5	2,25	1,5	92,4
4	-12,75	1,5	623,7	5	9,75	1,5	110,6
4	-6,75	1,5	156,5	5	12,75	1,5	158,0
4	-3,75	1,5	67,5	5	27,75	1,5	81,4
4	-0,75	1,5	72,1	5	29,25	1,5	82,2
4	2,25	1,5	97,9	5	30,75	1,5	76,5
4	5,25	1,5	153,1	5	33,75	1,5	85,8
4	8,25	1,5	127,5	1	-41,25	6	102,4
4	11,25	1,5	95,5	1	-18,75	6	685,7
4	14,25	1,5	147,7	1	-17,25	6	250,9
4	17,25	1,5	139,0	1	-9,75	6	88,0
4	20,25	1,5	110,5	1	-8,25	6	74,8
4	23,25	1,5	74,8	1	0,75	6	133,1
4	26,25	1,5	68,4	1	12,75	6	112,3
4	29,25	1,5	86,8	1	15,75	6	92,0
4	32,25	1,5	85,5	1	17,25	6	87,3
4	35,25	1,5	103,8	1	20,25	6	80,2
4	38,25	1,5	96,4	1	21,75	6	78,3
1	-33,75	4,5	151,3	1	27,75	6	78,7
1	-30,75	4,5	145,3	6	-42,75	1,5	2547,2
1	-27,75	4,5	236,8	6	-39,75	1,5	815,1
1	-15,75	4,5	1056,3	6	-36,75	1,5	78,4
1	-8,25	4,5	99,2	6	-30,75	1,5	119,7
1	14,25	4,5	131,8	6	-27,75	1,5	190,8
1	15,75	4,5	116,9	6	-24,75	1,5	313,5

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	20,25	4,5	90,0	6	-21,75	1,5	278,8
1	24,75	4,5	76,6	6	-20,25	1,5	276,8
1	30,75	4,5	86,4	6	-18,75	1,5	570,9
1	33,75	4,5	102,8	6	-15,75	1,5	292,9
2	-20,25	3	383,0	6	-12,75	1,5	64,9
2	-17,25	3	795,4	6	-9,75	1,5	95,4
2	-11,25	3	144,1	6	-6,75	1,5	148,0
2	-8,25	3	117,3	6	-3,75	1,5	47,1
6	-2,25	1,5	51,2	1	-20,25	7,5	157,2
6	-0,75	1,5	68,3	1	-18,75	7,5	59,3
6	2,25	1,5	113,0	1	-15,75	7,5	62,3
6	5,25	1,5	187,8	1	-14,25	7,5	64,9
6	8,25	1,5	106,9	1	-11,25	7,5	82,0
6	11,25	1,5	111,4	1	-9,75	7,5	68,4
6	14,25	1,5	129,4	1	-6,75	7,5	18,8
6	17,25	1,5	95,1	1	-5,25	7,5	72,7
6	20,25	1,5	81,4	1	-2,25	7,5	102,9
6	23,25	1,5	80,3	1	-0,75	7,5	119,8
6	26,25	1,5	74,6	1	2,25	7,5	114,0
6	27,75	1,5	74,3	1	3,75	7,5	111,8
6	29,25	1,5	87,3	1	6,75	7,5	109,3
6	32,25	1,5	79,0	1	8,25	7,5	103,0
6	33,75	1,5	69,3	1	11,25	7,5	85,2
6	35,25	1,5	88,4	1	12,75	7,5	80,5
3	-44,25	3	2242,7	1	15,75	7,5	78,0
3	-33,75	3	150,3	1	17,25	7,5	79,9
3	-24,75	3	270,1	1	20,25	7,5	81,0
3	-14,25	3	45,9	1	21,75	7,5	76,0
3	-9,75	3	72,3	1	24,75	7,5	73,2
3	-3,75	3	48,7	2	-45,75	4,5	1671,5
3	5,25	3	122,8	2	-42,75	4,5	486,6
3	11,25	3	119,0	2	-39,75	4,5	140,1
3	26,25	3	74,0	2	-36,75	4,5	82,8
3	27,75	3	84,3	2	-33,75	4,5	138,2
7	-32,25	1,5	227,1	2	-30,75	4,5	171,8
7	-26,25	1,5	219,1	2	-27,75	4,5	244,1
7	-20,25	1,5	354,1	2	-24,75	4,5	341,2
7	-18,75	1,5	1082,1	2	-21,75	4,5	524,1
7	3,75	1,5	547,9	2	-18,75	4,5	168,0
7	9,75	1,5	125,0	2	-15,75	4,5	40,4
7	15,75	1,5	93,7	2	-12,75	4,5	71,2
7	21,75	1,5	83,6	2	-9,75	4,5	99,8

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-47,25	7,5	1405,9	2	-6,75	4,5	61,4
1	-45,75	7,5	691,4	2	-3,75	4,5	55,8
1	-42,75	7,5	178,9	2	-0,75	4,5	101,4
1	-41,25	7,5	166,3	2	5,25	4,5	115,5
1	-38,25	7,5	101,8	2	8,25	4,5	106,2
1	-36,75	7,5	142,9	2	11,25	4,5	100,5
1	-33,75	7,5	157,7	2	14,25	4,5	85,0
1	-32,25	7,5	199,3	2	17,25	4,5	74,6
1	-29,25	7,5	262,0	2	20,25	4,5	86,6
1	-27,75	7,5	304,3	2	23,25	4,5	78,1
1	-24,75	7,5	414,2	2	26,25	4,5	79,0
1	-23,25	7,5	493,8	2	29,25	4,5	67,0
9	-47,25	1,5	2493,3	5	-24,75	3	517,9
9	29,25	1,5	60,3	5	-23,25	3	104,2
1	-44,25	9	308,9	5	-20,25	3	27,7
1	-36,75	9	147,1	5	-17,25	3	36,5
1	-32,25	9	270,5	5	-0,75	3	80,9
1	-30,75	9	285,4	5	0,75	3	88,6
1	-24,75	9	388,1	5	5,25	3	88,0
1	-18,75	9	45,6	5	11,25	3	62,1
1	-12,75	9	72,4	5	14,25	3	67,6
1	-9,75	9	59,6	5	17,25	3	72,7
1	5,25	9	88,6	5	21,75	3	76,5
1	6,75	9	82,1	5	23,25	3	74,0
1	17,25	9	80,2	11	27,75	1,5	56,4
2	-36,75	6	140,8	2	-47,25	7,5	847,7
2	-33,75	6	148,8	2	-44,25	7,5	425,5
2	-32,25	6	185,4	2	-42,75	7,5	224,5
2	-15,75	6	45,6	2	-41,25	7,5	166,7
2	-12,75	6	60,0	2	-39,75	7,5	87,9
2	-6,75	6	59,4	2	-38,25	7,5	85,1
2	-3,75	6	71,2	2	-33,75	7,5	217,9
2	2,25	6	104,2	2	-30,75	7,5	259,5
2	23,25	6	64,9	2	-26,25	7,5	36,1
1	-47,25	10,5	467,5	2	-24,75	7,5	35,7
1	-44,25	10,5	301,8	2	-18,75	7,5	37,0
1	-41,25	10,5	155,6	2	-9,75	7,5	71,1
1	-38,25	10,5	124,5	2	-8,25	7,5	64,6
1	-35,25	10,5	195,4	2	-2,25	7,5	75,5
1	-32,25	10,5	293,9	2	0,75	7,5	71,3
1	-29,25	10,5	263,3	2	5,25	7,5	51,1
1	-26,25	10,5	97,4	2	6,75	7,5	53,5

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-23,25	10,5	35,1	2	14,25	7,5	72,4
1	-20,25	10,5	44,7	2	15,75	7,5	73,7
1	-17,25	10,5	56,1	2	17,25	7,5	71,4
1	-14,25	10,5	65,6	13	-44,25	1,5	1766,4
1	-11,25	10,5	61,1	4	-47,25	4,5	1300,5
1	-8,25	10,5	75,7	4	-35,25	4,5	154,9
1	-5,25	10,5	411,7	4	-27,75	4,5	82,8
1	-2,25	10,5	89,1	4	-26,25	4,5	38,3
1	0,75	10,5	84,5	4	-21,75	4,5	37,5
1	3,75	10,5	72,0	4	-20,25	4,5	40,7
1	6,75	10,5	66,5	4	-18,75	4,5	41,4
1	9,75	10,5	40,7	4	-15,75	4,5	31,3
1	12,75	10,5	74,9	4	-14,25	4,5	41,7
1	15,75	10,5	74,4	4	-12,75	4,5	56,6
5	-45,75	3	682,5	4	-11,25	4,5	91,8
5	-44,25	3	818,2	4	-9,75	4,5	97,1
4	-5,25	4,5	45,8	5	-17,25	4,5	40,9
4	-3,75	4,5	48,5	5	-14,25	4,5	55,5
4	3,75	4,5	62,9	5	-12,75	4,5	73,9
4	5,25	4,5	54,2	5	-9,75	4,5	103,4
4	9,75	4,5	54,3	5	-8,25	4,5	88,4
4	20,25	4,5	68,1	5	-5,25	4,5	42,6
3	-47,25	6	964,9	5	-3,75	4,5	33,8
3	-41,25	6	181,3	5	-0,75	4,5	45,1
3	-36,75	6	150,3	5	0,75	4,5	43,6
3	-35,25	6	215,5	5	3,75	4,5	43,9
3	-30,75	6	185,8	5	5,25	4,5	42,6
3	-27,75	6	37,5	5	8,25	4,5	49,9
3	-24,75	6	39,1	5	12,75	4,5	64,7
3	-21,75	6	40,6	5	14,25	4,5	66,7
3	-20,25	6	39,7	17	-47,25	1,5	756,1
3	-17,25	6	33,9	17	18,75	1,5	18,0
3	-3,75	6	58,4	3	-45,75	7,5	700,9
3	-0,75	6	60,9	3	-44,25	7,5	436,6
3	2,25	6	56,4	3	-41,25	7,5	229,2
3	5,25	6	48,2	3	-39,75	7,5	106,0
3	14,25	6	64,6	3	-36,75	7,5	117,2
7	-44,25	3	835,9	3	-35,25	7,5	38,5
7	-41,25	3	623,3	3	-32,25	7,5	32,6
7	-36,75	3	112,9	3	-30,75	7,5	40,0
7	-30,75	3	244,8	3	-27,75	7,5	46,9
7	-12,75	3	49,3	3	-26,25	7,5	46,8

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
7	-5,25	3	46,6	3	-23,25	7,5	44,1
7	-3,75	3	44,9	3	-21,75	7,5	44,4
7	-0,75	3	59,8	3	-18,75	7,5	46,9
7	8,25	3	46,0	3	-17,25	7,5	56,5
7	11,25	3	62,2	3	-14,25	7,5	73,8
7	17,25	3	65,3	3	-12,75	7,5	92,9
7	18,75	3	66,8	3	-9,75	7,5	74,9
5	-45,75	4,5	911,8	3	-8,25	7,5	58,5
5	-44,25	4,5	721,0	3	-5,25	7,5	39,2
5	-41,25	4,5	211,6	3	-3,75	7,5	37,8
5	-39,75	4,5	140,0	3	-0,75	7,5	46,4
5	-36,75	4,5	101,5	3	0,75	7,5	47,1
5	-35,25	4,5	205,6	3	3,75	7,5	116,5
5	-32,25	4,5	57,4	3	5,25	7,5	49,1
5	-30,75	4,5	23,1	3	8,25	7,5	48,4
5	-27,75	4,5	41,0	3	9,75	7,5	57,7
5	-26,25	4,5	51,7	2	-45,75	10,5	412,4
5	-23,25	4,5	44,1	2	-42,75	10,5	172,3
5	-21,75	4,5	39,9	2	-39,75	10,5	120,0
5	-18,75	4,5	40,5	2	-38,25	10,5	79,9
2	-30,75	10,5	44,1	4	-45,75	7,5	617,6
2	-24,75	10,5	48,1	4	-42,75	7,5	56,5
2	-20,25	10,5	54,0	4	-41,25	7,5	29,7
2	-17,25	10,5	70,1	4	-38,25	7,5	16,3
2	-6,75	10,5	47,9	4	-36,75	7,5	29,5
2	-3,75	10,5	44,7	4	-33,75	7,5	34,3
2	2,25	10,5	47,9	4	-32,25	7,5	40,6
6	-45,75	4,5	734,7	4	-29,25	7,5	51,8
6	-44,25	4,5	721,2	4	-27,75	7,5	57,6
6	-41,25	4,5	348,4	4	-24,75	7,5	64,7
6	-38,25	4,5	13,5	4	-23,25	7,5	66,5
6	-32,25	4,5	36,9	4	-20,25	7,5	61,6
6	-29,25	4,5	37,8	4	-18,75	7,5	59,1
6	-24,75	4,5	50,6	4	-15,75	7,5	67,8
6	-20,25	4,5	49,8	4	-14,25	7,5	65,7
6	-9,75	4,5	106,4	4	-11,25	7,5	70,7
6	-2,25	4,5	47,2	4	-9,75	7,5	63,0
6	2,25	4,5	45,9	4	-6,75	7,5	49,2
6	6,75	4,5	46,7	4	-5,25	7,5	40,1
6	11,25	4,5	53,9	4	-2,25	7,5	49,1
3	-39,75	9	24,4	4	-0,75	7,5	55,7
3	-30,75	9	46,6	4	2,25	7,5	52,6

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
3	-27,75	9	51,7	5	-27,75	6	52,0
3	-24,75	9	60,1	5	-21,75	6	61,4
3	-18,75	9	64,4	5	-18,75	6	62,4
3	-15,75	9	70,8	5	-12,75	6	68,8
3	-12,75	9	72,3	5	-8,25	6	58,0
3	-11,25	9	64,0	5	-3,75	6	38,6
3	-6,75	9	53,6	5	2,25	6	53,7
3	2,25	9	50,9	5	5,25	6	794,2
5	-47,25	6	1136,8	4	-47,25	7,5	785,6
5	-45,75	6	898,1				
5	-44,25	6	718,4				
5	-39,75	6	21,4				
5	-36,75	6	26,7				
5	-33,75	6	32,9				
5	-32,25	6	41,7				

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

Nome: RES5				Sentido do caminhamento: SW -->NE			
Arranjo: Dipolo-dipolo			Data: 25/05/2017	Espaçamento entre as linhas: 12m			
n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-42,75	1,5	613,9	2	9,8	1,5	87,4
1	-36,75	1,5	82,1	2	12,8	1,5	79,4
1	-33,75	1,5	140,3	2	15,8	1,5	84,6
1	-32,25	1,5	127,6	2	18,8	1,5	69,0
1	-27,75	1,5	73,9	2	27,8	1,5	123,6
1	-24,75	1,5	74,2	2	30,8	1,5	132,4
1	-23,25	1,5	93,6	2	33,8	1,5	124,9
1	-15,75	1,5	99,8	2	36,8	1,5	179,9
1	-14,25	1,5	143,3	2	39,8	1,5	83,3
1	-9,75	1,5	232,1	1	-44,3	3	369,8
1	-6,75	1,5	145,8	1	-41,3	3	127,5
1	-5,25	1,5	149,3	1	-39,8	3	78,2
1	-0,75	1,5	149,1	1	-36,8	3	113,8
1	2,25	1,5	206,7	1	-35,3	3	135,5
1	3,75	1,5	196,5	1	-32,3	3	92,7
1	8,25	1,5	113,9	1	-30,8	3	67,8
1	11,25	1,5	68,9	1	-27,8	3	68,2
1	12,75	1,5	77,1	1	-26,3	3	78,1
1	17,25	1,5	106,0	1	-23,3	3	46,8
1	20,25	1,5	99,1	1	-21,8	3	196,1
1	29,25	1,5	153,4	1	-18,8	3	35,9
1	30,75	1,5	136,5	1	-17,3	3	62,6
1	35,25	1,5	174,4	1	-14,3	3	94,0
1	38,25	1,5	172,9	1	-9,8	3	108,2
1	39,75	1,5	73,7	1	-8,3	3	104,3
2	-44,25	1,5	1175,1	1	-5,3	3	151,5
2	-41,25	1,5	207,4	1	-0,8	3	206,1
2	-38,25	1,5	61,0	1	0,8	3	206,9
2	-35,25	1,5	131,0	1	3,8	3	141,8
2	-32,25	1,5	152,6	1	8,3	3	94,9
2	-29,25	1,5	62,4	1	9,8	3	78,2
2	-26,25	1,5	66,4	1	12,8	3	80,6
2	-23,25	1,5	84,9	1	14,3	3	87,3
2	-20,25	1,5	282,2	1	18,8	3	81,2
2	-14,25	1,5	97,1	1	21,8	3	85,7
2	-11,25	1,5	129,5	1	27,8	3	119,1
2	-8,25	1,5	120,9	1	30,8	3	150,2
2	-5,25	1,5	137,8	1	32,3	3	143,2

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
2	-2,25	1,5	159,2	1	35,3	3	151,9
2	0,75	1,5	230,1	1	36,8	3	105,5
2	3,75	1,5	180,8	4	-45,8	1,5	414,3
2	6,75	1,5	126,4	4	-42,8	1,5	155,9
4	-36,75	1,5	77,5	5	-39,8	1,5	135,8
4	-33,75	1,5	108,5	5	-38,3	1,5	66,6
4	-30,75	1,5	83,2	5	-24,8	1,5	116,4
4	-27,75	1,5	75,4	5	-23,3	1,5	66,1
4	-21,75	1,5	67,1	5	-11,3	1,5	50,8
4	-18,75	1,5	106,8	5	2,3	1,5	112,8
4	-15,75	1,5	80,2	5	9,8	1,5	98,0
4	-12,75	1,5	54,9	5	12,8	1,5	101,5
4	-6,75	1,5	122,7	5	27,8	1,5	111,8
4	-3,75	1,5	127,1	5	29,3	1,5	111,1
4	-0,75	1,5	147,6	5	30,8	1,5	89,9
4	2,25	1,5	147,0	5	33,8	1,5	88,7
4	5,25	1,5	126,4	1	-41,3	6	94,3
4	8,25	1,5	111,8	1	-38,3	6	92,6
4	11,25	1,5	77,1	1	-18,8	6	45,7
4	14,25	1,5	93,2	1	-17,3	6	40,3
4	20,25	1,5	101,5	1	-9,8	6	100,8
4	23,25	1,5	68,7	1	-8,3	6	99,3
4	29,25	1,5	117,5	1	-2,3	6	109,2
4	32,25	1,5	118,5	1	0,8	6	114,3
4	35,25	1,5	97,2	1	12,8	6	83,6
4	38,25	1,5	94,6	1	15,8	6	84,1
1	-33,75	4,5	91,7	1	17,3	6	77,9
1	-30,75	4,5	77,6	1	21,8	6	82,6
1	-27,75	4,5	61,7	1	27,8	6	94,3
1	-15,75	4,5	59,5	6	-45,8	1,5	174,5
1	-8,25	4,5	129,5	6	-44,3	1,5	388,3
1	14,25	4,5	79,7	6	-42,8	1,5	185,0
1	15,75	4,5	78,5	6	-39,8	1,5	132,6
1	20,25	4,5	76,6	6	-38,3	1,5	74,1
1	24,75	4,5	99,5	6	-36,8	1,5	62,7
1	30,75	4,5	111,8	6	-33,8	1,5	111,3
1	33,75	4,5	102,2	6	-30,8	1,5	114,6
2	-20,25	3	92,0	6	-27,8	1,5	68,9
2	-17,25	3	48,0	6	-24,8	1,5	64,3
2	-11,25	3	70,3	6	-21,8	1,5	67,4
2	-8,25	3	110,9	6	-20,3	1,5	74,3
2	-5,25	3	120,5	6	-18,8	1,5	101,6

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
2	-2,25	3	127,4	6	-15,8	1,5	57,5
2	3,75	3	119,1	6	-12,8	1,5	40,2
2	6,75	3	117,2	6	-9,8	1,5	95,8
2	12,75	3	92,2	6	-6,8	1,5	87,6
2	18,75	3	89,3	6	-3,8	1,5	97,5
2	21,75	3	77,8	6	-2,3	1,5	96,9
2	24,75	3	87,3	6	-0,8	1,5	90,8
5	-45,75	1,5	183,7	6	2,3	1,5	115,9
5	-42,75	1,5	155,8	6	5,3	1,5	135,5
5	-41,25	1,5	185,8	6	8,3	1,5	114,3
6	11,25	1,5	95,4	1	-0,8	7,5	101,1
6	17,25	1,5	95,2	1	2,3	7,5	111,3
6	20,25	1,5	75,7	1	6,8	7,5	94,5
6	23,25	1,5	73,5	1	8,3	7,5	85,4
6	27,75	1,5	98,1	1	12,8	7,5	76,9
6	29,25	1,5	73,1	1	15,8	7,5	75,5
6	32,25	1,5	385,8	1	17,3	7,5	77,4
6	33,75	1,5	93,3	1	20,3	7,5	74,9
6	35,25	1,5	84,3	1	21,8	7,5	78,1
3	-47,25	3	262,6	1	24,8	7,5	72,6
3	-44,25	3	314,1	2	-45,8	4,5	308,9
3	-33,75	3	133,7	2	-42,8	4,5	160,5
3	-24,75	3	63,7	2	-39,8	4,5	71,4
3	-14,25	3	38,9	2	-36,8	4,5	114,5
3	-9,75	3	82,9	2	-33,8	4,5	119,3
3	-3,75	3	79,5	2	-30,8	4,5	83,5
3	5,25	3	122,2	2	-27,8	4,5	65,6
3	27,75	3	83,6	2	-24,8	4,5	72,5
7	-38,25	1,5	54,7	2	-21,8	4,5	77,5
7	-32,25	1,5	149,9	2	-18,8	4,5	38,1
7	-26,25	1,5	64,3	2	-15,8	4,5	44,0
7	-20,25	1,5	77,1	2	-12,8	4,5	67,6
7	-18,75	1,5	84,0	2	-9,8	4,5	74,3
7	3,75	1,5	106,9	2	-6,8	4,5	72,3
7	9,75	1,5	116,3	2	-3,8	4,5	67,6
7	15,75	1,5	92,0	2	-0,8	4,5	95,3
7	21,75	1,5	80,9	2	2,3	4,5	109,8
1	-47,25	7,5	280,2	2	5,3	4,5	118,0
1	-45,75	7,5	219,5	2	11,3	4,5	85,9
1	-42,75	7,5	103,9	2	14,3	4,5	81,2
1	-41,25	7,5	96,6	2	17,3	4,5	74,0
1	-38,25	7,5	112,3	2	20,3	4,5	74,6

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-36,75	7,5	117,1	2	23,3	4,5	74,0
1	-33,75	7,5	92,7	2	29,3	4,5	70,6
1	-32,25	7,5	79,6	9	-47,3	1,5	457,8
1	-29,25	7,5	70,5	9	29,3	1,5	47,0
1	-27,75	7,5	68,0	1	-44,3	9	139,1
1	-24,75	7,5	76,9	1	-36,8	9	106,1
1	-23,25	7,5	44,2	1	-32,3	9	81,0
1	-20,25	7,5	40,5	1	-30,8	9	72,7
1	-18,75	7,5	39,1	1	-24,8	9	39,7
1	-15,75	7,5	61,3	1	-18,8	9	45,7
1	-14,25	7,5	72,1	1	-12,8	9	59,9
1	-11,25	7,5	77,1	1	-9,8	9	55,4
1	-9,75	7,5	76,2	1	5,3	9	80,2
1	-6,75	7,5	72,1	1	6,8	9	81,7
1	-5,25	7,5	80,8	2	-36,8	6	123,7
1	-2,25	7,5	95,0	2	-33,8	6	110,4
2	-32,25	6	98,6	2	-26,3	7,5	46,1
2	-15,75	6	47,2	2	-24,8	7,5	52,6
2	-12,75	6	50,2	2	-18,8	7,5	38,4
2	-6,75	6	43,5	2	-9,8	7,5	37,2
2	-3,75	6	62,6	2	-8,3	7,5	38,4
2	23,25	6	56,3	2	-2,3	7,5	66,8
1	-47,25	10,5	201,5	2	0,8	7,5	73,8
1	-44,25	10,5	155,6	2	5,3	7,5	69,9
1	-41,25	10,5	130,1	2	6,8	7,5	65,4
1	-38,25	10,5	107,5	2	11,3	7,5	58,9
1	-35,25	10,5	93,2	2	14,3	7,5	88,7
1	-32,25	10,5	74,7	2	15,8	7,5	57,6
1	-29,25	10,5	60,2	2	17,3	7,5	48,2
1	-26,25	10,5	38,0	13	-44,3	1,5	515,3
1	-23,25	10,5	42,1	4	-47,3	4,5	431,7
1	-20,25	10,5	45,4	4	-35,3	4,5	136,1
1	-17,25	10,5	47,6	4	-27,8	4,5	46,1
1	-14,25	10,5	47,4	4	-26,3	4,5	41,6
1	-11,25	10,5	45,0	4	-21,8	4,5	61,0
1	-8,25	10,5	57,8	4	-20,3	4,5	35,7
1	-2,25	10,5	86,7	4	-18,8	4,5	40,4
1	0,75	10,5	652,0	4	-15,8	4,5	40,4
1	3,75	10,5	77,5	4	-14,3	4,5	32,8
1	6,75	10,5	72,6	4	-12,8	4,5	34,0
1	9,75	10,5	64,6	4	-11,3	4,5	35,5
1	12,75	10,5	64,4	4	-9,8	4,5	36,3

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
5	-45,75	3	414,7	4	-5,3	4,5	37,1
5	-44,25	3	298,6	4	-3,8	4,5	41,1
5	-38,25	3	90,6	4	9,8	4,5	67,4
5	-24,75	3	57,8	4	20,3	4,5	42,0
5	-23,25	3	48,3	3	-47,3	6	420,9
5	-20,25	3	51,1	3	-41,3	6	108,6
5	-17,25	3	36,3	3	-36,8	6	127,0
5	-0,75	3	70,0	3	-35,3	6	132,4
5	0,75	3	82,0	3	-30,8	6	61,9
5	11,25	3	64,5	3	-27,8	6	45,6
5	14,25	3	72,8	3	-24,8	6	51,5
5	17,25	3	62,7	3	-21,8	6	38,7
5	21,75	3	49,4	3	-20,3	6	42,1
11	27,75	1,5	46,3	3	-17,3	6	31,9
2	-47,25	7,5	329,7	3	-0,8	6	59,0
2	-44,25	7,5	215,0	3	5,3	6	64,9
2	-42,75	7,5	134,7	3	11,3	6	57,0
2	-41,25	7,5	114,3	3	14,3	6	414,6
2	-39,75	7,5	112,2	7	-44,3	3	484,4
2	-38,25	7,5	124,5	7	-41,3	3	143,4
2	-33,75	7,5	104,1	7	-36,8	3	104,1
2	-30,75	7,5	67,0	7	-30,8	3	84,0
7	-12,75	3	30,2	3	-14,3	7,5	38,8
7	-8,25	3	35,8	3	-12,8	7,5	37,4
7	-5,25	3	33,6	3	-9,8	7,5	35,6
7	-3,75	3	38,4	3	-8,3	7,5	34,4
7	8,25	3	70,4	3	-0,8	7,5	52,3
7	11,25	3	64,6	3	0,8	7,5	58,7
7	17,25	3	51,5	3	3,8	7,5	59,6
7	18,75	3	46,1	3	5,3	7,5	58,6
5	-45,75	4,5	427,0	3	8,3	7,5	43,5
5	-44,25	4,5	319,7	3	9,8	7,5	48,1
5	-41,25	4,5	122,4	2	-45,8	10,5	184,1
5	-39,75	4,5	93,6	2	-42,8	10,5	116,4
5	-36,75	4,5	123,0	2	-39,8	10,5	89,6
5	-35,25	4,5	120,9	2	-38,3	10,5	75,2
5	-32,25	4,5	70,5	2	-30,8	10,5	56,3
5	-30,75	4,5	56,2	2	-24,8	10,5	41,6
5	-27,75	4,5	52,3	2	-20,3	10,5	36,6
5	-26,25	4,5	52,9	2	-17,3	10,5	36,9
5	-23,25	4,5	51,7	2	-6,8	10,5	43,8
5	-21,75	4,5	55,2	2	-3,8	10,5	51,2

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW –NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
5	-18,75	4,5	35,5	2	2,3	10,5	55,8
5	-17,25	4,5	30,0	6	-45,8	4,5	347,5
5	-14,25	4,5	33,9	6	-44,3	4,5	328,0
5	-12,75	4,5	36,5	6	-41,3	4,5	129,6
5	-9,75	4,5	37,9	6	-38,3	4,5	65,9
5	-8,25	4,5	35,6	6	-32,3	4,5	77,6
5	-3,75	4,5	31,0	6	-29,3	4,5	57,4
5	3,75	4,5	57,1	6	-24,8	4,5	48,3
5	5,25	4,5	1459,8	6	-20,3	4,5	32,0
5	8,25	4,5	61,6	6	-2,3	4,5	38,6
5	9,75	4,5	47,9	6	2,3	4,5	43,9
5	12,75	4,5	50,0	6	6,8	4,5	59,5
5	14,25	4,5	53,3	6	11,3	4,5	43,7
17	-47,25	1,5	586,5	3	-39,8	9	70,1
3	-45,75	7,5	281,3	3	-30,8	9	53,4
3	-44,25	7,5	214,9	3	-27,8	9	46,9
3	-41,25	7,5	111,4	3	-24,8	9	38,8
3	-39,75	7,5	101,5	3	-15,8	9	45,7
3	-36,75	7,5	83,6	3	-11,3	9	38,5
3	-35,25	7,5	74,8	3	-6,8	9	44,9
3	-32,25	7,5	62,6	3	2,3	9	56,1
3	-30,75	7,5	58,9	5	-47,3	6	402,9
3	-27,75	7,5	51,8	5	-45,8	6	311,1
3	-26,25	7,5	49,4	5	-44,3	6	219,1
3	-23,25	7,5	36,9	5	-39,8	6	58,0
3	-21,75	7,5	39,7	5	-36,8	6	79,0
3	-18,75	7,5	35,4	5	-33,8	6	80,8
3	-17,25	7,5	33,6	5	-32,3	6	71,1
5	-27,75	6	46,1	4	-33,8	7,5	72,4
5	-21,75	6	38,2	4	-32,3	7,5	61,8
5	-18,75	6	43,0	4	-29,3	7,5	48,7
5	-12,75	6	42,6	4	-27,8	7,5	45,9
5	-8,25	6	37,6	4	-24,8	7,5	52,2
5	-0,75	6	55,9	4	-23,3	7,5	40,9
5	2,25	6	59,4	4	-20,3	7,5	44,3
5	5,25	6	55,4	4	-15,8	7,5	46,8
4	-47,25	7,5	303,3	4	-14,3	7,5	43,2
4	-45,75	7,5	212,0	4	-9,8	7,5	40,5
4	-42,75	7,5	80,2	4	-6,8	7,5	38,5
4	-41,25	7,5	69,1	4	-2,3	7,5	55,5
4	-38,25	7,5	73,4	4	-0,8	7,5	59,4
4	-36,75	7,5	82,5	4	2,3	7,5	55,5

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW –NE

Nome: RES6				Sentido do caminhamento: SW -->NE			
Arranjo: Dipolo-dipolo			Data: 25/05/2017	Espaçamento entre as linhas: 12m			
n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-42,75	1,5	417,7	1	-18,8	3	337,6
1	-36,75	1,5	148,7	1	-17,3	3	394,4
1	-33,75	1,5	31,6	1	-14,3	3	1049,1
1	-32,25	1,5	90,7	1	-9,8	3	287,9
1	-27,75	1,5	115,1	1	-8,3	3	266,3
1	-24,75	1,5	139,5	1	-5,3	3	82,8
1	-23,25	1,5	118,5	1	-0,8	3	121,0
1	-18,75	1,5	245,2	1	0,8	3	101,3
1	-15,75	1,5	168,7	1	3,8	3	118,9
1	-14,25	1,5	347,9	1	8,3	3	121,4
1	-9,75	1,5	2823,8	1	9,8	3	113,7
1	-6,75	1,5	501,3	1	12,8	3	133,4
1	-5,25	1,5	282,7	1	14,3	3	150,5
1	-0,75	1,5	93,4	1	17,3	3	131,6
1	2,25	1,5	129,7	1	18,8	3	134,6
1	3,75	1,5	117,6	1	21,8	3	99,4
1	8,25	1,5	95,3	1	26,3	3	68,2
1	11,25	1,5	106,6	1	27,8	3	82,9
1	12,75	1,5	161,6	1	30,8	3	84,3
1	17,25	1,5	146,4	1	32,3	3	84,9
1	20,25	1,5	140,4	1	35,3	3	132,5
1	21,75	1,5	146,1	1	36,8	3	110,4
1	26,25	1,5	110,5	1	-33,8	4,5	151,3
1	29,25	1,5	105,0	1	-30,8	4,5	145,3
1	30,75	1,5	109,9	1	-27,8	4,5	236,8
1	35,25	1,5	118,2	1	-15,8	4,5	1056,3
1	38,25	1,5	157,7	1	-8,3	4,5	99,2
1	39,75	1,5	144,6	1	14,3	4,5	131,8
1	-44,25	3	154,5	1	15,8	4,5	116,9
1	-39,75	3	51,1	1	20,3	4,5	90,0
1	-36,75	3	48,8	1	24,8	4,5	76,6
1	-35,25	3	28,9	1	30,8	4,5	86,4
1	-32,25	3	115,6	1	33,8	4,5	102,8
1	-30,75	3	144,4	1	-41,3	6	102,4
1	-27,75	3	143,6	1	-38,3	6	1,1
1	-26,25	3	176,2	1	-18,8	6	685,7
1	-23,25	3	210,6	1	-17,3	6	250,9
1	-21,75	3	217,2	1	-9,8	6	88,0

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW -NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
1	-8,25	6	74,8	1	-36,8	9	147,1
1	0,75	6	133,1	1	-32,3	9	270,5
1	12,75	6	112,3	1	-30,8	9	285,4
1	15,75	6	92,0	1	-24,8	9	388,1
1	17,25	6	87,3	1	-18,8	9	45,6
1	20,25	6	80,2	1	-12,8	9	72,4
1	21,75	6	78,3	1	-9,8	9	59,6
1	27,75	6	78,7	1	5,3	9	88,6
1	-47,25	7,5	1405,9	1	6,8	9	82,1
1	-45,75	7,5	691,4	1	17,3	9	80,2
1	-42,75	7,5	178,9	1	-47,3	10,5	467,5
1	-41,25	7,5	166,3	1	-44,3	10,5	301,8
1	-38,25	7,5	101,8	1	-41,3	10,5	155,6
1	-36,75	7,5	142,9	1	-38,3	10,5	124,5
1	-33,75	7,5	157,7	1	-35,3	10,5	195,4
1	-32,25	7,5	199,3	1	-32,3	10,5	293,9
1	-29,25	7,5	262,0	1	-29,3	10,5	263,3
1	-27,75	7,5	304,3	1	-26,3	10,5	97,4
1	-24,75	7,5	414,2	1	-23,3	10,5	35,1
1	-23,25	7,5	493,8	1	-20,3	10,5	44,7
1	-20,25	7,5	157,2	1	-17,3	10,5	56,1
1	-18,75	7,5	59,3	1	-14,3	10,5	65,6
1	-15,75	7,5	62,3	1	-11,3	10,5	61,1
1	-14,25	7,5	64,9	1	-8,3	10,5	75,7
1	-11,25	7,5	82,0	1	-5,3	10,5	411,7
1	-9,75	7,5	68,4	1	-2,3	10,5	89,1
1	-6,75	7,5	18,8	1	0,8	10,5	84,5
1	-5,25	7,5	72,7	1	3,8	10,5	72,0
1	-2,25	7,5	102,9	1	6,8	10,5	66,5
1	-0,75	7,5	119,8	1	9,8	10,5	40,7
1	2,25	7,5	114,0	1	12,8	10,5	74,9
1	3,75	7,5	111,8	1	15,8	10,5	74,4
1	6,75	7,5	109,3	2	-44,3	1,5	1540,0
1	8,25	7,5	103,0	2	-41,3	1,5	70,9
1	11,25	7,5	85,2	2	-38,3	1,5	11447,1
1	12,75	7,5	80,5	2	-35,3	1,5	51,8
1	15,75	7,5	78,0	2	-32,3	1,5	103,8
1	17,25	7,5	79,9	2	-29,3	1,5	138,8
1	20,25	7,5	81,0	2	-26,3	1,5	144,2
1	21,75	7,5	76,0	2	-23,3	1,5	170,7
1	24,75	7,5	73,2	2	-20,3	1,5	200,3
1	-44,25	9	308,9	2	-17,3	1,5	273,8

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW -NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
2	-14,25	1,5	435,1	2	-9,8	4,5	99,8
2	-11,25	1,5	3055,9	2	-6,8	4,5	61,4
2	-8,25	1,5	292,3	2	-3,8	4,5	55,8
2	-5,25	1,5	112,1	2	-0,8	4,5	101,4
2	-2,25	1,5	76,5	2	2,3	4,5	5121,4
2	0,75	1,5	144,3	2	5,3	4,5	115,5
2	3,75	1,5	116,4	2	8,3	4,5	106,2
2	6,75	1,5	94,4	2	11,3	4,5	100,5
2	9,75	1,5	118,7	2	14,3	4,5	85,0
2	12,75	1,5	152,5	2	17,3	4,5	74,6
2	15,75	1,5	152,0	2	20,3	4,5	86,6
2	18,75	1,5	127,5	2	23,3	4,5	78,1
2	21,75	1,5	109,4	2	26,3	4,5	79,0
2	24,75	1,5	95,9	2	29,3	4,5	67,0
2	27,75	1,5	70,8	2	-36,8	6	140,8
2	30,75	1,5	92,5	2	-33,8	6	148,8
2	33,75	1,5	83,9	2	-32,3	6	185,4
2	36,75	1,5	149,1	2	-15,8	6	45,6
2	39,75	1,5	98,9	2	-12,8	6	60,0
2	-20,25	3	383,0	2	-6,8	6	59,4
2	-17,25	3	795,4	2	-3,8	6	71,2
2	-11,25	3	144,1	2	2,3	6	104,2
2	-8,25	3	117,3	2	23,3	6	64,9
2	-5,25	3	70,1	2	-47,3	7,5	847,7
2	-2,25	3	64,8	2	-44,3	7,5	425,5
2	6,75	3	121,4	2	-42,8	7,5	224,5
2	12,75	3	146,3	2	-41,3	7,5	166,7
2	18,75	3	102,3	2	-39,8	7,5	87,9
2	21,75	3	76,9	2	-38,3	7,5	85,1
2	24,75	3	75,2	2	-33,8	7,5	217,9
2	-45,75	4,5	1671,5	2	-30,8	7,5	259,5
2	-42,75	4,5	486,6	2	-26,3	7,5	36,1
2	-39,75	4,5	140,1	2	-24,8	7,5	35,7
2	-36,75	4,5	82,8	2	-18,8	7,5	37,0
2	-33,75	4,5	138,2	2	-9,8	7,5	71,1
2	-30,75	4,5	171,8	2	-8,3	7,5	64,6
2	-27,75	4,5	244,1	2	-2,3	7,5	75,5
2	-24,75	4,5	341,2	2	0,8	7,5	71,3
2	-21,75	4,5	524,1	2	5,3	7,5	51,1
2	-18,75	4,5	168,0	2	6,8	7,5	53,5
2	-15,75	4,5	40,4	2	14,3	7,5	72,4
2	-12,75	4,5	71,2	2	15,8	7,5	73,7

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW -NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
2	17,25	7,5	71,4	3	-35,3	7,5	38,5
2	-45,75	10,5	412,4	3	-32,3	7,5	32,6
2	-42,75	10,5	172,3	3	-30,8	7,5	40,0
2	-39,75	10,5	120,0	3	-27,8	7,5	46,9
2	-38,25	10,5	79,9	3	-26,3	7,5	46,8
2	-30,75	10,5	44,1	3	-23,3	7,5	44,1
2	-24,75	10,5	48,1	3	-21,8	7,5	44,4
2	-20,25	10,5	54,0	3	-18,8	7,5	46,9
2	-17,25	10,5	70,1	3	-17,3	7,5	56,5
2	-6,75	10,5	47,9	3	-14,3	7,5	73,8
2	-3,75	10,5	44,7	3	-12,8	7,5	92,9
2	2,25	10,5	47,9	3	-9,8	7,5	74,9
3	-44,25	3	2242,7	3	-8,3	7,5	58,5
3	-33,75	3	150,3	3	-5,3	7,5	39,2
3	-24,75	3	270,1	3	-3,8	7,5	37,8
3	-14,25	3	45,9	3	-0,8	7,5	46,4
3	-9,75	3	72,3	3	0,8	7,5	47,1
3	-3,75	3	48,7	3	3,8	7,5	116,5
3	5,25	3	122,8	3	5,3	7,5	49,1
3	11,25	3	119,0	3	8,3	7,5	48,4
3	26,25	3	74,0	3	9,8	7,5	57,7
3	27,75	3	84,3	3	-39,8	9	24,4
3	-47,25	6	964,9	3	-30,8	9	46,6
3	-41,25	6	181,3	3	-27,8	9	51,7
3	-36,75	6	150,3	3	-24,8	9	60,1
3	-35,25	6	215,5	3	-18,8	9	64,4
3	-30,75	6	185,8	3	-15,8	9	70,8
3	-27,75	6	37,5	3	-12,8	9	72,3
3	-24,75	6	39,1	3	-11,3	9	64,0
3	-21,75	6	40,6	3	-6,8	9	53,6
3	-20,25	6	39,7	3	2,3	9	50,9
3	-17,25	6	33,9	4	-45,8	1,5	189,1
3	-3,75	6	58,4	4	-42,8	1,5	91,4
3	-0,75	6	60,9	4	-36,8	1,5	49,2
3	2,25	6	56,4	4	-33,8	1,5	7,8
3	5,25	6	48,2	4	-30,8	1,5	158,2
3	14,25	6	64,6	4	-27,8	1,5	132,7
3	-45,75	7,5	700,9	4	-24,8	1,5	309,3
3	-44,25	7,5	436,6	4	-21,8	1,5	233,4
3	-41,25	7,5	229,2	4	-18,8	1,5	446,1
3	-39,75	7,5	106,0	4	-15,8	1,5	521,3
3	-36,75	7,5	117,2	4	-12,8	1,5	623,7

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletrorresistividade SW -NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
4	-6,75	1,5	156,5	4	-29,3	7,5	51,8
4	-3,75	1,5	67,5	4	-27,8	7,5	57,6
4	-0,75	1,5	72,1	4	-24,8	7,5	64,7
4	2,25	1,5	97,9	4	-23,3	7,5	66,5
4	5,25	1,5	153,1	4	-20,3	7,5	61,6
4	8,25	1,5	127,5	4	-18,8	7,5	59,1
4	11,25	1,5	95,5	4	-15,8	7,5	67,8
4	14,25	1,5	147,7	4	-14,3	7,5	65,7
4	17,25	1,5	139,0	4	-11,3	7,5	70,7
4	20,25	1,5	110,5	4	-9,8	7,5	63,0
4	23,25	1,5	74,8	4	-6,8	7,5	49,2
4	26,25	1,5	68,4	4	-5,3	7,5	40,1
4	29,25	1,5	86,8	4	-2,3	7,5	49,1
4	32,25	1,5	85,5	4	-0,8	7,5	55,7
4	35,25	1,5	103,8	4	2,3	7,5	52,6
4	38,25	1,5	96,4	5	-45,8	1,5	206,7
4	-47,25	4,5	1300,5	5	-41,3	1,5	3500,8
4	-35,25	4,5	154,9	5	-39,8	1,5	1708,1
4	-27,75	4,5	82,8	5	-24,8	1,5	325,3
4	-26,25	4,5	38,3	5	-23,3	1,5	265,7
4	-21,75	4,5	37,5	5	-11,3	1,5	131,1
4	-20,25	4,5	40,7	5	2,3	1,5	92,4
4	-18,75	4,5	41,4	5	9,8	1,5	110,6
4	-15,75	4,5	31,3	5	12,8	1,5	158,0
4	-14,25	4,5	41,7	5	27,8	1,5	81,4
4	-12,75	4,5	56,6	5	29,3	1,5	82,2
4	-11,25	4,5	91,8	5	30,8	1,5	76,5
4	-9,75	4,5	97,1	5	33,8	1,5	85,8
4	-5,25	4,5	45,8	5	-45,8	3	682,5
4	-3,75	4,5	48,5	5	-44,3	3	818,2
4	3,75	4,5	62,9	5	-24,8	3	517,9
4	5,25	4,5	54,2	5	-23,3	3	104,2
4	9,75	4,5	54,3	5	-20,3	3	27,7
4	20,25	4,5	68,1	5	-17,3	3	36,5
4	-47,25	7,5	785,6	5	-0,8	3	80,9
4	-45,75	7,5	617,6	5	0,8	3	88,6
4	-42,75	7,5	56,5	5	5,3	3	88,0
4	-41,25	7,5	29,7	5	11,3	3	62,1
4	-38,25	7,5	16,3	5	14,3	3	67,6
4	-36,75	7,5	29,5	5	17,3	3	72,7
4	-33,75	7,5	34,3	5	21,8	3	76,5
4	-32,25	7,5	40,6	5	23,3	3	74,0

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW -NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
5	-45,75	4,5	911,8	6	-42,8	1,5	2547,2
5	-44,25	4,5	721,0	6	-39,8	1,5	815,1
5	-41,25	4,5	211,6	6	-36,8	1,5	78,4
5	-39,75	4,5	140,0	6	-33,8	1,5	0,9
5	-36,75	4,5	101,5	6	-30,8	1,5	119,7
5	-35,25	4,5	205,6	6	-27,8	1,5	190,8
5	-32,25	4,5	57,4	6	-24,8	1,5	313,5
5	-30,75	4,5	23,1	6	-21,8	1,5	278,8
5	-27,75	4,5	41,0	6	-20,3	1,5	276,8
5	-26,25	4,5	51,7	6	-18,8	1,5	570,9
5	-23,25	4,5	44,1	6	-15,8	1,5	292,9
5	-21,75	4,5	39,9	6	-12,8	1,5	64,9
5	-18,75	4,5	40,5	6	-9,8	1,5	95,4
5	-17,25	4,5	40,9	6	-6,8	1,5	148,0
5	-14,25	4,5	55,5	6	-3,8	1,5	47,1
5	-12,75	4,5	73,9	6	-2,3	1,5	51,2
5	-9,75	4,5	103,4	6	-0,8	1,5	68,3
5	-8,25	4,5	88,4	6	2,3	1,5	113,0
5	-5,25	4,5	42,6	6	5,3	1,5	187,8
5	-3,75	4,5	33,8	6	8,3	1,5	106,9
5	-0,75	4,5	45,1	6	11,3	1,5	111,4
5	0,75	4,5	43,6	6	14,3	1,5	129,4
5	3,75	4,5	43,9	6	17,3	1,5	95,1
5	5,25	4,5	42,6	6	20,3	1,5	81,4
5	8,25	4,5	49,9	6	23,3	1,5	80,3
5	12,75	4,5	64,7	6	26,3	1,5	74,6
5	14,25	4,5	66,7	6	27,8	1,5	74,3
5	-47,25	6	1136,8	6	29,3	1,5	87,3
5	-45,75	6	898,1	6	32,3	1,5	79,0
5	-44,25	6	718,4	6	33,8	1,5	69,3
5	-39,75	6	21,4	6	35,3	1,5	88,4
5	-36,75	6	26,7	6	-45,8	4,5	734,7
5	-33,75	6	32,9	6	-44,3	4,5	721,2
5	-32,25	6	41,7	6	-41,3	4,5	348,4
5	-27,75	6	52,0	6	-38,3	4,5	13,5
5	-21,75	6	61,4	6	-32,3	4,5	36,9
5	-18,75	6	62,4	6	-29,3	4,5	37,8
5	-12,75	6	68,8	6	-24,8	4,5	50,6
5	-8,25	6	58,0	6	-20,3	4,5	49,8
5	-3,75	6	38,6	6	-9,8	4,5	106,4
5	2,25	6	53,7	6	-2,3	4,5	47,2
5	5,25	6	794,2	6	2,3	4,5	45,9

Anexo V

Dados dos caminhamentos de eletroresistividade SW -NE

n	Posição leitura(m)	Prof. (m)	R (ohm.m)	n	Posição leitura (m)	Prof. (m)	R (ohm.m)
6	6,75	4,5	46,7	7	-8,3	3	2728,3
6	11,25	4,5	53,9	7	-5,3	3	46,6
7	-32,25	1,5	227,1	7	-3,8	3	44,9
7	-26,25	1,5	219,1	7	-0,8	3	59,8
7	-20,25	1,5	354,1	7	8,3	3	46,0
7	-18,75	1,5	1082,1	7	11,3	3	62,2
7	3,75	1,5	547,9	7	17,3	3	65,3
7	9,75	1,5	125,0	7	18,8	3	66,8
7	15,75	1,5	93,7	9	-47,3	1,5	2493,3
7	21,75	1,5	83,6	9	29,3	1,5	60,3
7	-44,25	3	835,9	11	27,8	1,5	56,4
7	-41,25	3	623,3	13	-44,3	1,5	1766,4
7	-36,75	3	112,9	17	-47,3	1,5	756,1
7	-30,75	3	244,8	17	18,8	1,5	18,0
7	-12,75	3	49,3				

Anexo VI

Dados dos levantamentos azimutais de eletrorresistividade

Arranjo: Dipolo Equatorial		Arranjo: Wenner AB=16m		Arranjo: Schlumberger	
Azimute	Resistividade (ohm.m)	Azimute	Resistividade (ohm.m)	Azimute	Resistividade (ohm.m)
0 ⁰	135,5	0 ⁰	961,9	0 ⁰	634,7
15 ⁰	1229,7	15 ⁰	331,1	15 ⁰	448,1
30 ⁰	230,3	30 ⁰	148,8	30 ⁰	371,5
45 ⁰	541,4	45 ⁰	229,3	45 ⁰	262,4
60 ⁰	852,6	60 ⁰	131,8	60 ⁰	162,1
75 ⁰	161,8	75 ⁰	122,1	75 ⁰	114,1
90 ⁰	454,4	90 ⁰	41,8	90 ⁰	120,8
105 ⁰	1830,5	105 ⁰	73,9	105 ⁰	260,4
120 ⁰	2394,7	120 ⁰	106,9	120 ⁰	157,5
135 ⁰	1188,8	135 ⁰	151,6	135 ⁰	126,5
150 ⁰	766,8	150 ⁰	199,3	150 ⁰	27,4
165 ⁰	1396,0	165 ⁰	171,7	165 ⁰	153,7
Arranjo: Quadrático		Arranjo: Wenner AB=12m			
Azimute	Resistividade (ohm.m)	Azimute	Resistividade (ohm.m)		
0 ⁰	300,3	0 ⁰	83,7		
15 ⁰	228,5	21,1 ⁰	201,9		
30 ⁰	204,8	42,2 ⁰	351,7		
45 ⁰	95,6	63,3 ⁰	211,0		
60 ⁰	163,8	84,4 ⁰	120,3		
75 ⁰	157,7	105,5 ⁰	121,8		
90 ⁰	177,5	126,6 ⁰	50,2		
105 ⁰	132,1	147,4 ⁰	114,8		
120 ⁰	136,5	168,4 ⁰	99,0		
135 ⁰	186,2				
150 ⁰	202,4				
165 ⁰	183,5				