**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

# ELETRORRESISTIVIDADE APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE TÚNEIS ARQUEOLÓGICOS NO CENTRO HISTÓRICO DE OURO PRETO-MG

Gustavo Pereira de Souza

**MONOGRAFIA nº 426**

Ouro Preto, junho de 2022

# ELETRORRESISTIVIDADE APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE TÚNEIS ARQUEOLÓGICOS NO CENTRO HISTÓRICO DE OURO PRETO-MG

# FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

**Reitora**

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

**Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

**Pró-Reitora de Graduação**

Prof.ª Dr.ª Tânia Rossi Garbin

**ESCOLA DE MINAS**

*Diretor*

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior

*Vice-Diretor*

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

*Chefe*

Prof. MSc. Edison Tazava

# MONOGRAFIA

**Nº 426**

# ELETRORRESISTIVIDADE APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE TÚNEIS ARQUEOLÓGICOS NO CENTRO HISTÓRICO DE OURO PRETO-MG

**Gustavo Pereira de Souza**

*Orientadora*

Prof.ª Dr.ª Maria Sílvia Carvalho Barbosa

*Co-Orientador*

MSc. Luis Artur Souza Oliveira

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/2.

OURO PRETO

2022

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br
Escola de Minas - http://www.em.ufop.br
Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Gustavo Pereira de Souza

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729e Souza, Gustavo Pereira de.
Eletrorresistividade aplicada à identificação de túneis arqueológicos no centro histórico de Ouro Preto-MG. [manuscrito] / Gustavo Pereira de Souza. - 2022.
54 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.
Coorientador: Me. Luis Artur Souza Oliveira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geofísica. 2. Fotografia aérea em geologia. 3. Arqueologia. 4. Ouro Preto (MG). I. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. II. Oliveira, Luis Artur Souza. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.3:902

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

http://www.sisbin.ufop.br

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Gustavo Pereira de Souza**

**Eletrorresistividade aplicada à identificação de túneis arqueológicos no centro histórico de Ouro Preto -MG**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 09 de junho de 2022

Membros da banca

Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa - Orientadora (Departamento de Geologia/UFOP)
Dr. Paulo de Tarso Amorim Castro - (Departamento de Geologia/UFOP)
Dr. Joney Justo da Silva - (Departamento de Geologia/UFOP)

Maria Sílvia Carvalho Barbosa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/06/2022

Documento assinado eletronicamente por **Maria Silvia Carvalho Barbosa**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/06/2022, às 13:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0346025** e o código CRC **CD3C16AD**.



R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591600 - www.ufop.br

# AGRADECIMENTO

Agradeço a minha mãe, por toda confiança e aos sacrifícios realizados.

A todos da Geologia 14.2, pela amizade ao longo da graduação. Aos integrantes da SGA por toda amizade e confiança.

À professora Maria Sílvia e ao Luis, por toda orientação e paciência ao longo do desenvolvimento do projeto. Aos professores do Departamento de Geologia pelas aulas, conversas e ensinamentos passados, em especial à professora Raquel Cassino, por todo o período de orientação na monitoria.

À República Sete Pragas, seus moradores, ex-alunos e homenageados por todos os anos de amizade.

À Larissa, por sempre estar ao meu lado e me motivar.

Por fim, ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto, por proporcionar um ensino público gratuito e de qualidade durante toda a graduação.

# SUMÁRIO

**AGRADECIMENTOS** ..... **ix**
**SUMÁRIO** ..... **xi**
**LISTA DE FIGURAS** ..... **xiii**
**LISTA DE TABELAS** ..... **xv**
**RESUMO** ..... **xvii**
**ABSTRACT** ..... **xix**
**1 INTRODUÇÃO** ..... **1**
1.1 APRESENTAÇÃO ..... 1
1.2 LOCALIZAÇÃO ..... 2
1.3 OBJETIVO ..... 3
1.4 JUSTIFICATIVA ..... 3
1.5 METODOLOGIA ..... 5
**2 CONTEXTO GEOLÓGICO** ..... **7**
2.1 GEOLOGIA REGIONAL ..... 7
2.2 GEOLOGIA LOCAL ..... 9
**3 ELETRORRESISTIVIDADE** ..... **11**
3.1 MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE ..... 11
3.1.1 Caminhamento Elétrico ..... 14
3.2 TRABALHOS ANTERIORES ..... 18
**4 AEROFOTOGRAMETRIA** ..... **21**
4.1 FOTOGRAMETRIA E FOTOGRAMETRIA AÉREA ..... 21
4.2 PROCEDIMENTO DE LEVANTAMENTO ..... 22
4.2.1 Voo fotográfico ..... 22
4.2.2 Plano de voo ..... 23
4.3 MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE E MODELOS DIGITAIS DE TERRENO ..... 25
**5 TRABALHO DE CAMPO** ..... **27**
5.1 RECONHECIMENTO DA ÁREA ..... 27
5.2 LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO ..... 28
5.3 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO ..... 29
**6 PROCESSAMENTO DOS DADOS** ..... **35**
**7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS** ..... **41**
**8 CONCLUSÕES** ..... **51**
**9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... **53**

# INDÍCE DE FIGURAS

**Figura 1.1** - **A)** Vias de acesso para a área de estudo a partir da cidade de Belo Horizonte/MG; **B)** Acesso em detalhe do trajeto até a chegada do local de estudo. ..... 2

**Figura 1.2** - **A**) Localização de Ouro Preto em relação ao Estado de Minas Gerais; .. ..... 3

**Figura 1.3** - Foto panorâmica de Ouro Preto, datada de 1870. Na porção esquerda inferior, destaca-se a presença da Rua das Flores e ausência de construções em seu trecho superior.... ..... 5

**Figura 2.1** - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, com destaque em vermelho para a localização da área de estudo. ..... 8

**Figura 2.2** - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero ..... 9

**Figura 2.3** - Mapa simplificado com as litologias no local de estudo. ..... 10

**Figura 3.1** - Ilustração de cilindro condutor que exemplifica o comportamento de um condutor homogêneo. ..... 11

**Figura 3.2** - Representação da diferença de potencial em um levantamento. ..... 12

**Figura 3.3** - Configuração mais usual em um levantamento de campo que utiliza quatro eletrodos. .. 13

**Figura 3.4** - Resistividade em meio homogêneo e heterogêneo. ..... 14

**Figura 3.5** - Disposição dos eletrodos no arranjo Schlumberger ..... 15

**Figura 3.6** - Disposição dos eletrodos no arranjo Wenner para diferentes profundidades ..... 15

**Figura 3.7** - Esquema para aquisição de dados do arranjo Dipolo-Dipolo ..... 16

**Figura 3.8** - Esquema de caminhamento elétrico com o arranjo Polo-Dipolo ..... 17

**Figura 3.9** - Comparação entre a disposição dos arranjos de Polo-Dipolo e Dipolo-Dipolo. ..... 17

**Figura 3.10** - Procedimento para aquisição de dados com o arranjo Polo-Polo ..... 18

**Figura 4.1** - Mecanismo de desenhos estereoscópicos de Albrecht Drer e primeiro par estereoscópico desenhado a mão de Jacopo Chimenti. ..... 21

**Figura 4.2** - Procedimentos para a realização de um levantamento aerofotogramétrico. ..... 22

**Figura 4.3** - Esquema de sobreposição de fotos em um levantamento aerofotogramétrico. ..... 23

**Figura 4.4** - Esquema de sobreposição de fotos em perfil. ..... 24

**Figura 4.5** - Procedimento para obtenção de diferentes escalas em uma mesma altitude (A) e uma mesma escala para diferentes altitudes (B). ..... 24

**Figura 4.6** - Trajetória de voo para terrenos retangulares (A), e em faixas estreitas (B). ..... 25

**Figura 5.1** - Mapa indicando localização das galerias de mineração encontrada no Horto dos Contos e sua proximidade com a área de estudo. ..... 28

**Figura 5.2** - Ortofotomosaico gerado a partir do trabalho de processamento dos dados. ..... 29

**Figura 5.3** - Linhas planejadas para o levantamento de eletrorresistividade..... 30

**Figura 5.4** - A) Resistivímetro X5XTAL; B) Multipoint; C) Cabo manga; D) Cabos conectores;. .... 31

**Figura 5.5** - Trabalho de abertura de picada e inserção de eletrodos no solo. ..... 32

**Figura 5.6** - A) Manuseio e explicações acerca dos equipamentos utilizados; B) Disposição dos equipamentos na mesa; C) Inserção de eletrodos e ligação com o equipamento a mesa. ..... 32

**Figura 6.1** - Modelo digital de superfície utilizado na integração com o ortofotomosaico..... 35

**Figura 6.2 -** Ortofotomosaico integrado com o modelo digital de superfície sem exagero vertical. ... 36

**Figura 6.3** - Exemplo dos três perfis gerados para a Linha 1 referente ao espaçamento de 5 metros.. 37

**Figura 6.4** - Perfis invertidos das Linhas 1 e 2 referentes ao espaçamento de 10 metros. ..... 38

**Figura 6.5** - Perfis invertidos das Linhas 1, 2, 3 e 4, relacionados ao espaçamento de 5 metros..... 39

**Figura 6.6** - Modelo tridimensional de resistividade gerado a partir do *software Oasis Montaj*. ..... 40

**Figura 7.1** - Perfis de resistividade referentes às Linhas 1 (A) e 2 (B) com espaçamento de 5 metros. Destacadas em preto estão as respostas geofísicas de alta resistividade. ..... 42

**Figura 7.2** - Perfis de resistividade referentes às Linhas 1 (A) e 2 (B) com espaçamento de 10 metros. Destacadas em preto estão as respostas geofísicas de alta resistividade.. ..... 43

**Figura 7.3** - Modelo tridimensional gerado a partir da interpolação dos dados das Linhas 3 e 4. **A)** Visão frontal do bloco, com destaque para a zona de alta resistividade..... 46

**Figura 7.4** - Resposta geofísica de baixa resistividade — até 6000 Ω.m — do Bloco 2.. ..... 47

**Figura 7.5** - Zona de resistividade intermediária — de 6000 à 10700 Ω.m — do Bloco 2..... 48

**Figura 7.6** - Zona de alta resistividade — acima de 10700 Ω.m — do Bloco 2.. ..... 49

**Figura 7.7** - Mapa com um possível planejamento de campo para novos levantamento geofísicos de eletrorresistividade. ..... 50

# ÍNDICE DE TABELAS

**Tabela 3.1** - Tabela com as diferenças entre os tipos de condutividade. ..... 12

**Tabela 5.1** - Parâmetros de levantamento utilizados nas linhas de eletrorresistividade. ..... 30

**Tabela 5.2** - Coordenadas das linhas de eletrorresistividade. ..... 31

# Resumo

O conhecimento da história do passado permite avançar no futuro, assim, estudos arqueológicos são fundamentais para a documentação e conhecimento da história. Neste sentido, a cidade de Ouro Preto (MG), Patrimônio Cultural da Humanidade, é um local de estudo de extrema relevância para compreender o desenvolvimento do país. Algumas dessas relações envolvem histórias de túneis ou *bunkers* localizados entre o antigo palácio do governo (Museu da Escola de Minas) e a Casa da Moeda (Museu Casa dos Contos) seriam utilizados para sonegação de impostos ou como forma de esconderijo caso ocorresse uma invasão ou rebelião. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo a localização deste provável túnel/*bunker* e para tanto, foram utilizadas aerofotogrametria e eletrorresistividade para identificação destas estruturas antrópicas. O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com auxílio de um veículo aéreo não tripulado para coleta de dados topográficos do local, os quais dados foram processados e permitiu a geração de um modelo tridimensional de superfície que auxiliou o planejamento de campo. Para o levantamento eletrorresistivo, aplicou-se o método de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo, espaçamento entre eletrodos de 5 e 10 metros em dois pares de linhas de 100 e 60 metros de comprimento. Os dados coletados foram processados, invertidos e interpolados para criar um modelo tridimensional de resistividade em subsuperfície. A integração da aerofotogrametria e da geofísica resultou na definição de um alvo potencial com características compatíveis à presença de um túnel.

**Palavras chave**: aerofotogrametria, arqueologia, geofísica, Ouro Preto.

# Abstract

The knowledge of the history of the past allows to advance in the future, thus, archaeological studies are fundamental for the documentation and knowledge of the history. In this sense, the city of Ouro Preto (MG), Cultural Heritage of Humanity, is a place of study of extreme relevance to understand the development of the country. Some of these relationships involve stories of tunnels or bunkers located between the former government palace (School of Mines museum) and the Mint (Casa dos Contos museum) would be used for tax evasion or as a form of hiding in case of an invasion or rebellion. Given this scenario, this work aims to locate this probable tunnel/bunkers and, for that, aerophotogrammetry and electroresistivity were used to identify these anthropic structures. The aerial photogrammetric survey was carried out with the aid of an unmanned aerial vehicle to collect topographic data from the site, which data were processed and allowed the generation of a three-dimensional surface model that aided the field planning. For the electroresistive survey, the electrical path method was applied, dipole-dipole arrangement, spacing between electrodes of 5 and 10 meters in two pairs of lines of 100 and 60 meters in length. The collected data were processed, inverted and interpolated to create a three-dimensional model of subsurface resistivity. The integration of aerophotogrammetry and geophysics resulted in the definition of a potential target with characteristics compatible with the presence of a tunnel.

**Keywords**: aerophotogrammetry, archeology, geophysics, Ouro Preto.

# CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

A cidade de Ouro Preto – MG é conhecida por preservar características e cultura do Brasil Colônia, desde a arquitetura barroca, a maior do Brasil, a religiosidade vista na enorme quantidade de igrejas, até a sua estreita relação com a mineração, muito importante para o seu crescimento e desenvolvimento da colônia na época (Unesco, acesso em https://whc.unesco.org/en/list/124/, acesso em 03/03/2020).

Toda a sua riquíssima história é acompanhada de contos misteriosos acerca dos costumes da população no local. Devido a intensa coleta de impostos do governo português em cima da população, como o quinto do ouro, uma história se desenvolveu alegando a existência de galerias subterrâneas e/ou *bunkers* espalhados no centro histórico da cidade com o intuito dos representantes portugueses pudessem sonegar impostos e se esconderem em caso de rebelião. O mais famoso desses túneis consiste no que supostamente ligaria a antiga Casa da Moeda ao Palácio do Governo, atuais Museu Casa dos Contos e Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas, respectivamente. No entanto não foram encontrados registros históricos que deem suporte à essa informação.

A geofísica, historicamente, tem auxiliado diversos estudos nas mais diversas áreas das geociências que vislumbram a observação em subsuperfície de informações geológicas a partir de suas propriedades físicas. Por serem, normalmente, metodologias que apresentam a visualização em profundidade de forma mais ampla, econômica e rápida, tornando-se mais viáveis que outros métodos diretos, como sondagem. Desta forma, a geofísica se tornou uma ferramenta cada vez mais comum em estudos acadêmicos e empresariais.

Os métodos geoelétricos visam coletar dados acerca das características elétricas dos materiais geológicos. O trabalho de campo necessário consiste em uma atividade que gera pouco ou nenhum impacto no local, além de ter uma versatilidade amostral adequada ao objetivo. Posto isto, utilizar o método da eletrorresistividade para detectar estruturas antrópicas em profundidade se torna viável, visto o contraste de resistividade. A detecção desses prováveis túneis permitirá que os órgãos públicos tomem previdências acerca dos cuidados necessários para construção e manutenção do local.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

A cidade de Ouro Preto está localizada na região centro sul do Estado de Minas Gerais, a aproximadamente 98 km da cidade de Belo Horizonte, capital do estado. Seguindo pela região sul de Belo Horizonte, seguindo pela BR 356, sentido Itabirito. A partir da BR, o acesso a cidade ocorre pela Rua Padre Rolim, que segue até a área de estudo no centro histórico de Ouro Preto. A área de estudo está localizada na Rua Senador Rocha Lagoa, mais conhecida como Rua das Flores, próxima à Praça Tiradentes, no centro da cidade. O terreno consiste em um lote localizado ao lado da Igreja de Nossa Senhora das Mercês e da Misericórdia e do Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas (Figuras 1.1 e 1.2).

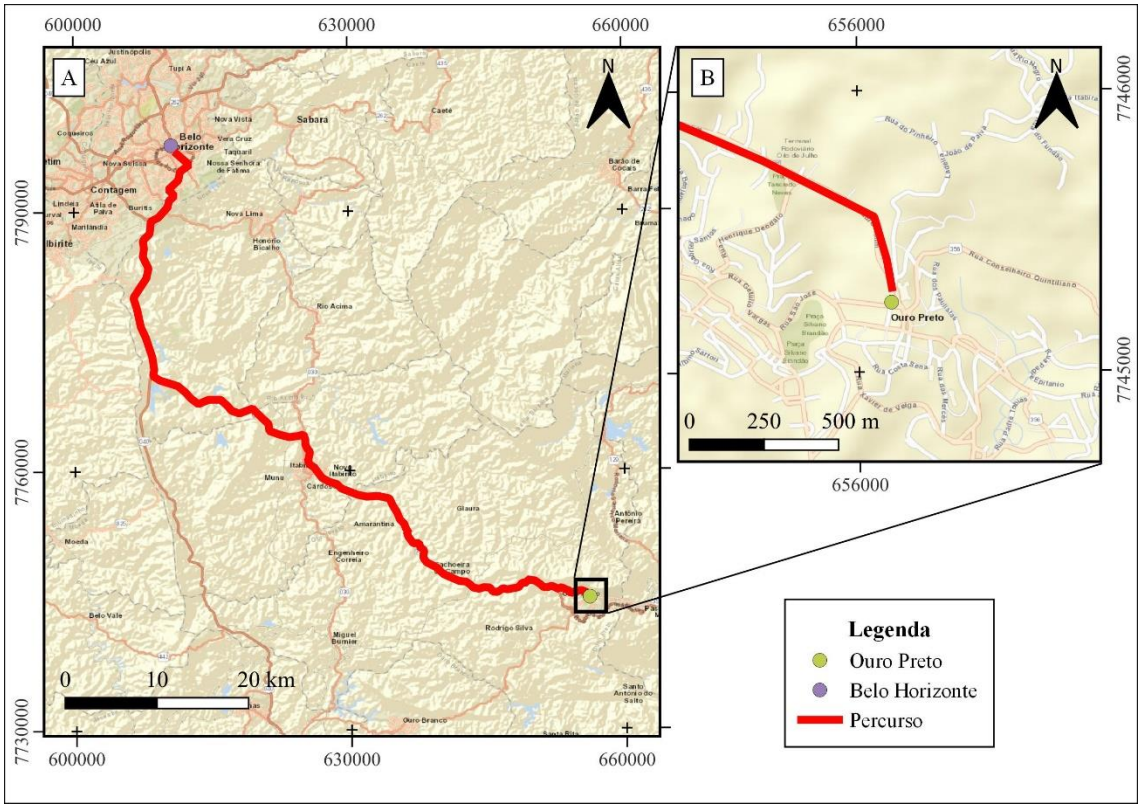



**Figura 1.1** - **A)** Vias de acesso para a área de estudo a partir da cidade de Belo Horizonte/MG; **B**) Acesso em detalhe do trajeto até a chegada do local de estudo. (Fonte: basemap por ESRI Street, Datum WGS 84 / UTM zona 23S)

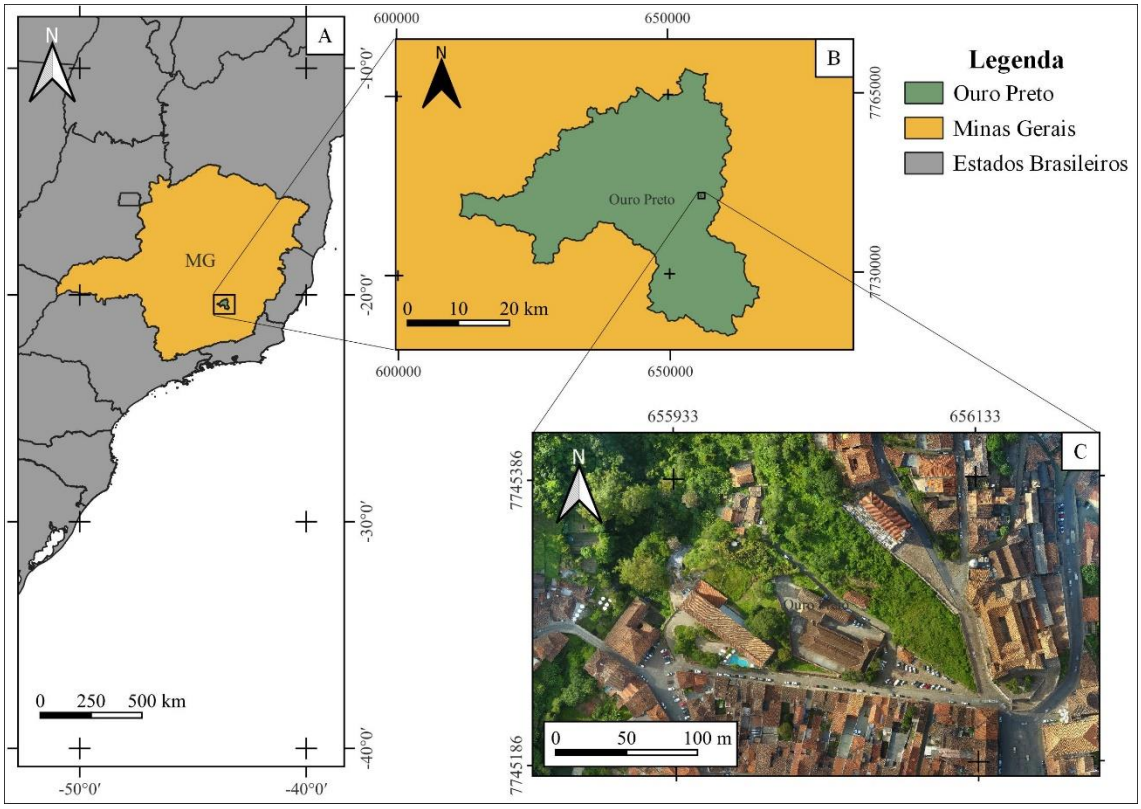



**Figura 1.2** - **A**) Localização de Ouro Preto em relação ao Estado de Minas Gerais; **B**) Localização da área de estudo dentro do município de Ouro Preto; **C**) Imagem aérea da área de estudo. (Fonte: *shapefile* dos limites territoriais dos estados brasileiros e municípios de Minas Gerais do IBGE, https://www.ibge.gov.br; Datum WGS 84 / UTM zona 23S).

## 1.3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o método geofísico de eletrorresistividade para identificar possíveis estruturas semelhantes a túneis ou *bunkers* que conectem a Casa dos Contos à Escola de Minas, no centro histórico de Ouro Preto.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A importância da cidade no desenvolvimento do país vai além das questões minerárias. Ouro Preto faz parte da história brasileira, assim como seus costumes. Por conta do potencial minerário, a região foi um grande atrativo dos europeus, principalmente os portugueses, que visavam o enriquecimento. A relação conturbada entre o governo e a população tornou as práticas de sonegação comuns (Cintra 2008, Souza 1961).

O vislumbre pela abundância de ouro promoveu o crescimento da cidade, conhecida como Vila Rica na época, tornando-a uma das cidades mais populosas da América Latina. Em meados dos anos 1760, a cidade contava com cerca de 95.000 habitantes, sendo quase dois terços de

escravos, resultando em, aproximadamente, 45% da população da capitania de Minas Gerais (Rangel 2005). Como dito pelo historiador italiano Giovanni Antonio Andreoni, em 1710: "A sede insaciável do ouro estimulou a tantos a deixarem suas terras a meterem-se por caminhos tão ásperos como os das Minas, que dificultosamente se poderá dar conta do número das pessoas que atualmente lá estão. Cada ano, vêm, nas frotas, quantidades de portugueses e estrangeiros para passarem às Minas" (Antonil 1711).

A coleta do recurso pela coroa portuguesa se deu pelo pagamento de impostos, conhecido como "quinto", onde vinte por cento do ouro coletado pelos exploradores residentes no país era direcionado ao país europeu. Porém, para despistar a fiscalização, muitos exploradores idealizavam diversas maneiras para esconder ouro e outros bens, assim como feito nos mais diversos recursos explorados no país (Renger 2006). A dificuldade de manter a fiscalização era observável na época, uma vez que a arrecadação ficava muito aquém dos níveis de produção esperados. A estrutura fiscal se reforçou com uma maior atenção às frotas e a profusão na Casa da Moeda, justamente pela constante preocupação com contrabando (Costa *et al.* 2003).

Existem relatos de um provável túnel que ligaria a Casa dos Contos ao Museu da Escola de Minas, construído no tempo do Brasil Colônia. A provável existência desse túnel pode ser baseada na importância desses prédios em relação à história da cidade, visto que a Casa dos Contos funcionava como Casa de Fundição e Casa da Moeda a partir de 1821, enquanto o Museu da Escola de Minas era o Palácio do Governador e também antiga Casa de Fundição e da Moeda. Considerando-se que durante a época o Brasil estava na transição do Período Colonial para o Império e que a capitania de Minas Gerais estava sendo criada devido ao ciclo do ouro, supõem-se que o alto fluxo de bens monetários que circulavam na antiga Vila Rica justificaria a construção de um meio para armazenar ou transportar esses bens. Deve-se considerar também que não existe obra construída na provável área que abrigaria o túnel, sendo esta, portanto, uma importante evidência (Figura 1.3).

A pesquisa arqueológica do local tem uma importância fundamental na preservação e conservação dos vestígios das possíveis estruturas, pois representam um documento testemunhal da história da sociedade local e seu desenvolvimento (Medeiros & Surya 2009). A forma como o homem se relaciona com os demais passa pela perpetuação de informações acerca dos processos histórico-culturais mediante documentos (Netto & Souza 2010).

"O conhecimento da história do passado permite avançar o futuro", ou seja, conhecendo-se o passado pode-se obter significativos avanços no futuro. Assim, a descoberta do possível túnel e a associação com tais manobras de sonegação é importante para entender o desenvolvimento da região, bem como, auxiliar na análise geotécnica nesta área e beneficiar o processo turístico.

**Figura 1.3** - Foto panorâmica de Ouro Preto, datada de 1870. Na porção esquerda inferior, destaca-se a presença da Rua das Flores e ausência de construções em seu trecho superior, local de estudos deste trabalho. (Doria 2013).

## 1.5 METODOLOGIA

A primeira etapa do projeto consistiu em pesquisas bibliográficas acerca da área de estudo. O objetivo é encontrar informações relevantes ao contexto histórico da região que possam auxiliar na continuidade do trabalho, como detalhes e costumes históricos ou referências ao possível túnel.

Em seguida foram realizados o levantamento topográfico da área. Foi utilizado o método de aerofotogrametria. A coleta de dados foi realizada com o drone Mavic 2 Pro no intuito de gerar o modelo digital de superfície (MDS) e imageamento de alta resolução, os quais permitiram o planejamento do levantamento de eletrorresistividade e dados topográficos para correções do método.

A etapa seguinte consistiu em executar um levantamento geofísico utilizando o método de eletrorresistividade, escolhido por sua praticidade e adequação ao nosso objetivo. Na campanha, foram realizadas 4 linhas de caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo), duas com 100 metros e duas com 60 metros de comprimento, com espaçamento de 5 e 10 metros, visando mais alta resolução e profundidade de interesse.

Os dados coletados durante o levantamento de eletrorresistividade foram tratados nos *software*s RES2DINV, para o processo de inversão dos dados e *Oasis Montaj, versão 2021.2.1*, a visualização em 3D com melhor interpolação.

Os dados coletados passaram por um tratamento estatístico com objetivo de eliminar possíveis erros de medidas. Após a análise, as informações foram inseridas no *software* RES2DINV com objetivo de gerar seções bidimensionais das linhas de levantamento.

A etapa seguinte consistiu em aplicar os dados topográficos aos dados das seções no *software Oasis Montaj* para a confecção de seções tridimensionais dos pares de linhas paralelas. Tais modelos permitiram uma análise espacial do levantamento, auxiliando em uma análise mais assertiva.

A última etapa foi a realização das interpretações e a conclusão.

# CAPÍTULO 2

# CONTEXTO GEOLÓGICO

## 2.1 GEOLOGIA REGIONAL

A cidade de Ouro Preto, e consequentemente a área de estudo, está localizada na região centro-sul do estado de Minas Gerais, mais especificamente na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero (QF). O QF é uma das regiões mais ricas e complexas do país, no quesito geológico, sendo de suma importância para o desenvolvimento minerário desde o período colonial. Dentre suas riquezas, suas rochas se destacam por possuir depósitos de metais e gemas raros e valiosos como ferro, ouro, topázio e esmeralda (Chemale *et al.* 1991, Roeser & Roeser 2010).

A grande variedade de bens minerários e complexas estruturas geológicas tornaram o Quadrilátero Ferrífero em uma das seções mais estudadas do país, resultando em inúmeros artigos divulgados ao longo dos anos. Muitas correções e revisões ainda são publicadas, levantando importantes divergências a serem estudadas, no entanto não é foco deste trabalho discuti-las.

Em sua base na coluna estratigráfica está o embasamento cristalino, disposto ao longo do QF em formato de domos. Suas rochas são compostas por ganisses e migmatitos do tipo TTG, pertencente a um protólito de tonalito-trondhjemito-granodiorito (Alkmin & Marshak 1998).

Sobre o embasamento está disposto o Supergrupo Rio das Velhas, composto por um conjunto de rochas metavulcanossedimentares subdivididos entre os Grupos Nova Lima e Maquiné. Apresenta também fáceis sedimentares químicas e clásticas (Dorr 1969, Baltazar & Zucchetti 2007). O Grupo Nova Lima é constituído por rochas vulcânicas, sedimentares e vulcanossedimentares, enquanto o Grupo Maquiné é composto por filitos quartzosos, quartzitos e lentes conglomeráticas (Ladeira & Roeser 1983, Baltazar & Zucchetti 2007).

Sobreposto em descontinuidade ao Rio das Velhas está o Supergrupo Minas, uma sequência de rochas metassedimentares associadas à ocorrência do Ciclo de Wilson entre 2.5 e 2.0 Ga. Suas rochas apresentam metamorfização de baixo-grau, no geral, onde variam entre as fáceis xisto-verde inferior à anfibolito inferior (Dorr *et al.* 1969, Alkmim & Marshak 1998, Alkmim & Martins-Neto 2012).

É composto pelas entre os seguintes Grupos: Tamanduá e Caraça, composto por arenitos, conglomerados, pelitos e *chert*, associados a ambientes transicionais e de margem passiva); Itabira, onde ocorreu uma sedimentação química e registros de bacia de margem passiva; e Piracicaba, composto por pelitos, folhelhos e arenitos de origem marinha (Alkmim & Marshak 1998, Duque 2018).

O Supergrupo Estrada Real é constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas e rochas metavulcânicas e é composto pelos Grupos Sabará e Itacolomi (Endo *et al.* 2020).

No topo estratigráfico, está o Supergrupo Espinhaço, composto por metarenitos/quartzitos e metaconglomerados e intercalações de sericita-xistos, depositados em uma bacia de extensão que se desenvolveu após um processo de rifteamento (Endo *et al.* 2020, Dussin *et al.* 1995, Garcia *et al.* 1987).

As Figura 2.1 e 2.2 ilustram o Mapa Geológico simplificado e a Coluna Estratigráfica do QF, respectivamente.

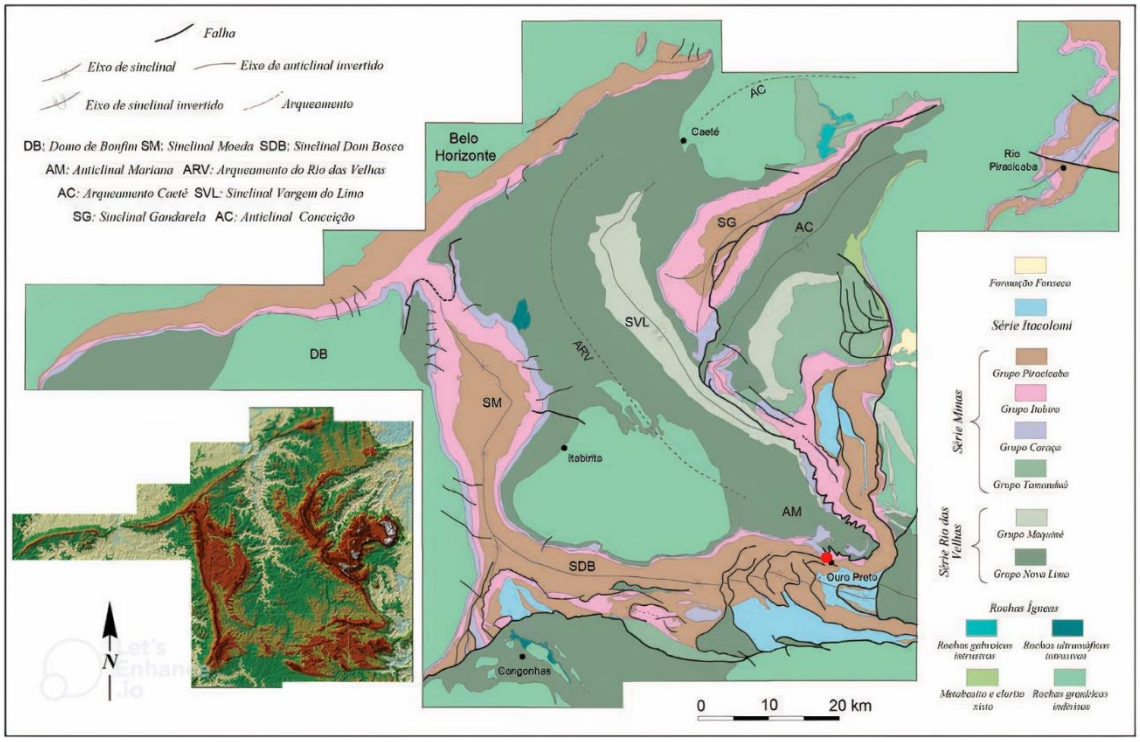



**Figura 2.1** - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, com destaque em vermelho para a localização da área de estudo (adaptado de Endo *et al.* 2020).

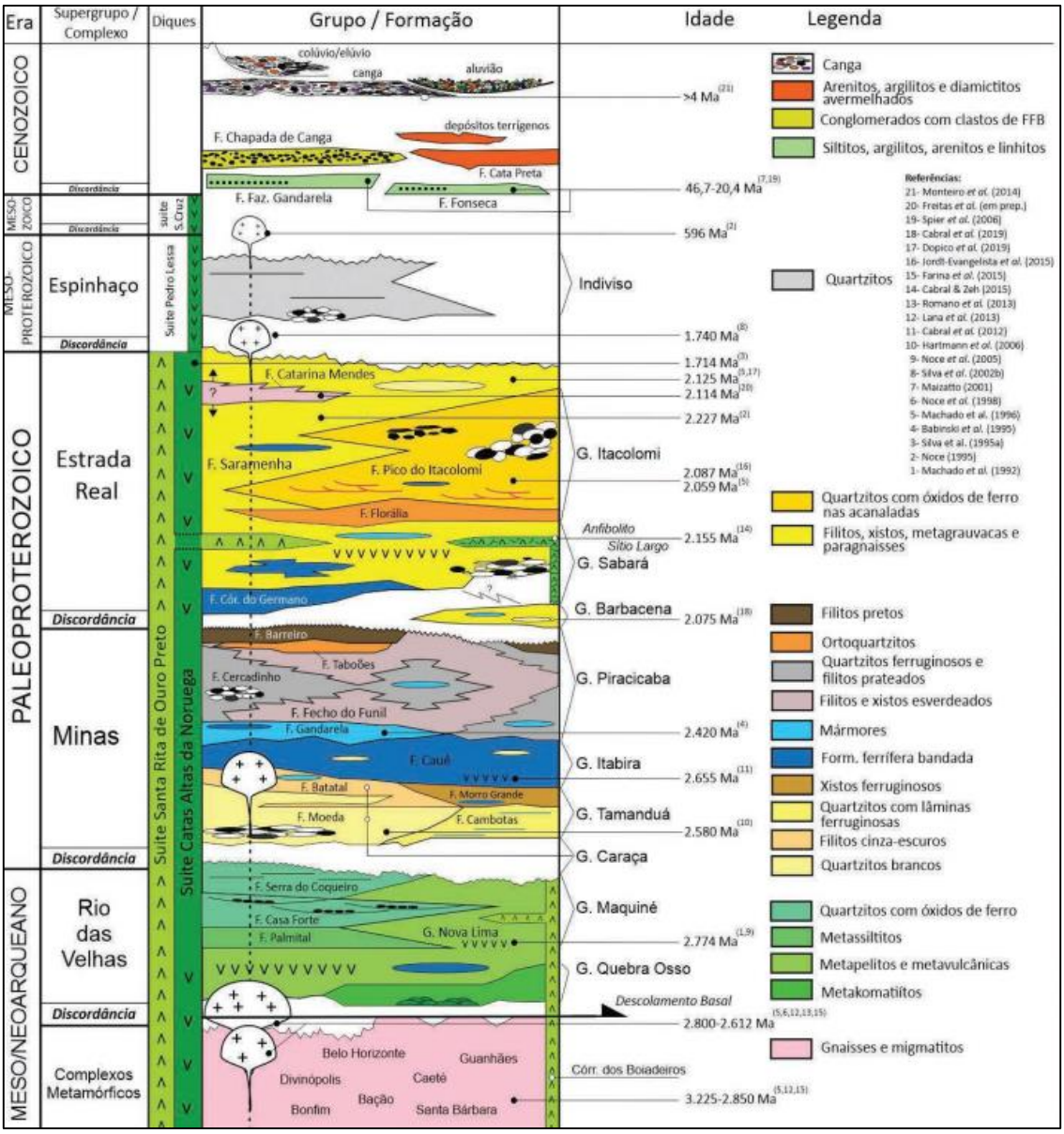



**Figura 2.2** - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2020)

## 2.2 GEOLOGIA LOCAL

Segundo o mapa publicado por Endo *et al. (op cit.)*, a área de levantamento está localizada integralmente dentro da Formação Cercadinho. Além disso, as regiões adjacentes e dentro da nossa área de interesse estão mapeadas com rochas das Formações Cauê e Moeda, mais a nordeste, enquanto uma pequena faixa com a Formação Gandarela aproxima-se a sudeste. A Figura 2.3 ilustra uma representação simplificada das litologias e a área de levantamento.

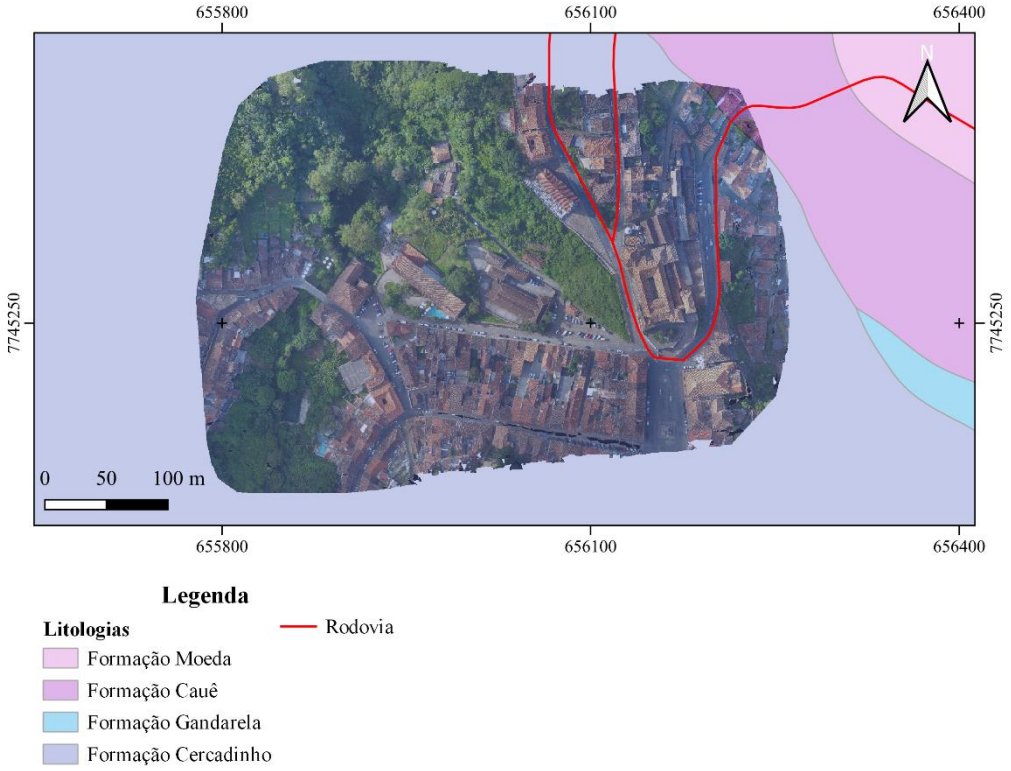



**Figura 2.3** - Mapa simplificado com as litologias no local de estudo (Simplificado e adaptado de Endo 2020). Fonte dos dados: *shapefile* de litologias e rodovia de Endo *et al.* (2020).

Ressalta-se que o local de estudo constitui uma área pequena com pouca ou nenhuma expressão de rocha aflorante, estando disposta na forma de solo. Devido a excesso de vegetação, lixo e áreas incessíveis, nenhuma amostra foi coletada para determinação da litologia exata.

# CAPÍTULO 3

# ELETRORRESISTIVIDADE

## 3.1 MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

O método da eletrorresistividade consiste no método geoelétricos utilizado para determinar a resistividade elétrica dos materiais geológicos, parâmetro esse que varia de acordo com sua composição e preenchimento de poros. A partir da injeção de uma corrente elétrica artificial pela superfície, é possível medir a diferença de potencial entre dois pontos pré-determinados. Como a corrente é controlada e conhecida, é possível determinar, assim, a resistividade do material geológico (Braga 2016).

Pela Lei de Ohm, a resistividade ($\rho$) em um condutor homogêneo é dada pela Equação 3.1 (Figura 3.1):

$$R = \rho\, L/S \quad \text{.....Equação 3.1}$$

Onde $L$ é o comprimento do prisma e $S$ sua seção transversal e $\rho$ é o coeficiente (resistividade) que varia de acordo com a natureza do material, sua unidade é Ω.m.

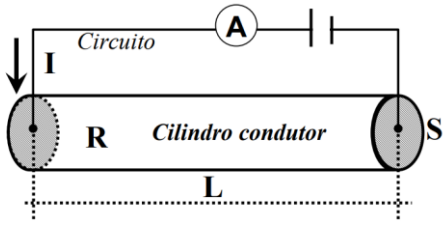



**Figura 3.1** - Ilustração de cilindro condutor que exemplifica o comportamento de um condutor homogêneo (adaptado de Braga 2006).

A resistividade consiste na propriedade física que expressa a dificuldade de uma corrente elétrica percorrer um determinado material. Em corpos geológicos, como rochas e solos, o mecanismo que caracteriza essa propriedade é a condutividade (σ), que numericamente é expresso pelo inverso da resistividade, dada pela Equação 3.2 (Braga 2016, Kearey *et.al* 2009):

$$\sigma = \frac{1}{R}\frac{L}{S} \quad \text{.....Equação 3.2}$$

A condutividade pode ser de três tipos: condutividade eletrônica; condutividade iônica (eletrolítica); condutividade dielétrica. Suas diferenciações são descritas na Tabela 3.1:

**Tabela 3.1** - Tabela com as diferenças entre os tipos de condutividade (adaptado de Telford *et al.* 1990).

| | |
|---|---|
| **Eletrônica** | Ocorre normalmente em matérias que possuem elétrons livres, como os metais. |
| **Iônica** | Ocorre devido ao deslocamento de íons existentes no meio. |
| **Dielétrica** | Ocorre em condutores e isolantes pobres que tem poucos ou nenhum elétron livre. |

Para material geológico, a propagação de corrente elétrica ocorre em formato tridimensional, com forma semi-esférica, considerando o ponto de origem o local onde é injetado a corrente. A Terra, por não se um isolante perfeito, conduz a corrente elétrica e assume-se, nesse estágio, que a resistividade do solo é uniforme (Figura 3.2) (Kearey *et al.* 2009, Gandolfo 2007).

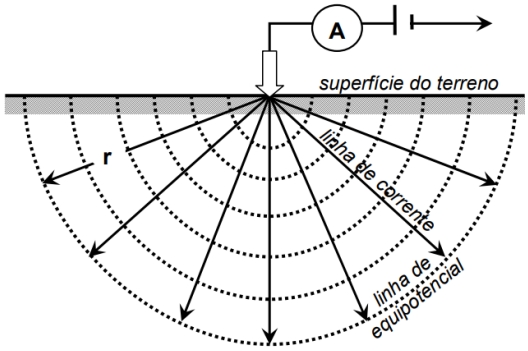



**Figura 3.2** - Representação da diferença de potencial em um levantamento (Braga 2006).

Aplicando a Equação 3.1 no semi-espaço, tem-se:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad \text{.....Equação 3.3}$$

E substituindo a lei de Ohm (V = R. I) na Equação 3.3:

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad \text{.....Equação 3.4}$$

Onde:

- V – Potencial elétrico;
- I – Intensidade de corrente;
- $\rho$ – Resistividade;
- r – Distância entre o eletrodo de corrente e o ponto de medição de potencial.

Como a resistividade do solo é constante, é pode-se definir o valor desse parâmetro em subsuperfície. Adicionando outros dois eletrodos de medição, é possível medir a diferença de potencial entre os eletrodos. Usualmente, utiliza-se quatro eletrodos, dois de corrente e dois de

medição, para realizar esse procedimento, visto a necessidade de reduzir a distância entre dois eletrodos de corrente (Figura 3.3) (Kearey *et al.* 2009).

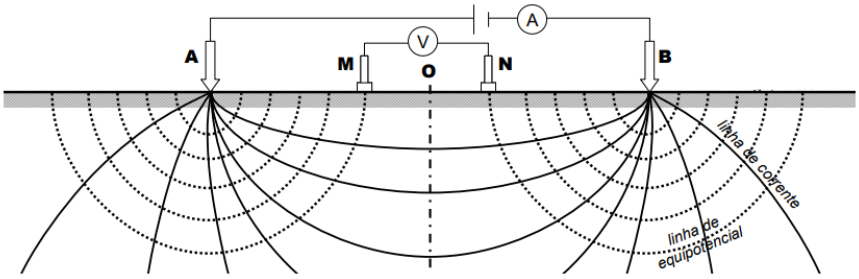



**Figura 3.3** - Configuração mais usual em um levantamento de campo que utiliza quatro eletrodos (adaptado de Braga 2006).

Essa configuração, utilizando os eletrodos de corrente (A e B) e os eletrodos de medição (M e N), permite medir o potencial resultante entre os eletrodos M e N. A partir da Equação 3.4, tem-se:

$$V(M) = \frac{I\rho}{2\pi I}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) \quad \text{.....Equação 3.5}$$

$$V(N) = \frac{I\rho}{2\pi I}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \quad \text{.....Equação 3.6}$$

A diferença de potencial entre os eletrodos M e N será determinada por ΔV (MN) = V(M) – V(N), explicitado pela Equação 3.7, a seguir:

$$\Delta V\ (MN) = \frac{I\rho}{2\pi I}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \quad \text{.....Equação 3.7}$$

Pode-se definir a resistividade do meio geológico investigado a partir da equação supracitada, onde definimos o parâmetro *K* como o coeficiente geométrico dos quatro eletrodos utilizados. Tem-se, então, as Equações 3.8 e 3.9, a seguir:

$$\rho = K\frac{\Delta V}{I} \quad \text{.....Equação 3.8}$$

Onde:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad \text{.....Equação 3.9}$$

O método da eletrorresistividade é condicionado pela capacidade do equipamento utilizado para inserir corrente elétrica no material geológico. Realizar medições em materiais geológicos homogêneos e heterogêneos, utilizando um mesmo arranjo de eletrodos, resultará em dados diferentes, pois a propagação de corrente ocorre de maneira diferente nessas duas situações (Figura 3.4) (Braga 2006).

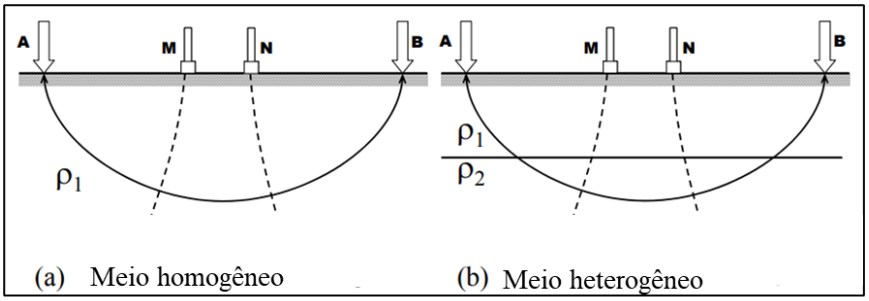



**Figura 3.4** - Resistividade em meio homogêneo e heterogêneo (adaptado de Braga 2006).

Solos não podem ser considerados meios homogêneos, então a resistividade em um local é influenciada por todas as resistividades verdadeiras de um grande volume de material. Logo, o que é medido, na prática, é a resistividade aparente, parâmetro que expressa o resultado das medições tomando como base para a interpretação final.

A resistividade em rochas é influenciada por fatores como:

- Resistividade dos minerais;
- Líquido e gases nos poros;
- Teor de umidade;
- Porosidade;
- Forma e distribuição dos poros na rocha;
- Textura e compactação.

Portanto, litologias semelhantes podem apresentar diferentes valores de resistividade por conta dos diversos fatores que a influenciam (Braga 2006, Kearey *et al.* 2009, Telford *et al.* 1990).

### 3.1.1 Caminhamento Elétrico

O caminhamento elétrico consiste na análise e interpretação dos parâmetros de resistividade a partir de medições realizadas por resistivímetros em superfície. Essas medidas são realizadas lateralmente e em níveis de profundidade que desejar. Seus resultados são exibidos em mapas ou seções que indiquem anomalias de resistividade ao longo do corpo geológico.

Os arranjos comumente utilizados se baseiam na inserção de dois pares de eletrodos em superfície, com dois injetando corrente e dois realizando as medidas. Para cada arranjo, existem diferentes benefícios, como melhores alcances ou melhores resoluções. A utilização de um arranjo varia de acordo com a necessidade do projeto (Braga 2006).

#### 3.1.1.1 Principais Arranjos

Como dito anteriormente, os arranjos são as disposições espaciais possíveis de eletrodos para a realização do caminhamento elétrico. Para cada arranjo, tem-se vantagens e desvantagens

acerca de sua utilização. Determinar o melhor arranjo para um projeto está relacionado às suas necessidades e objetivos.

O arranjo Schlumberger consiste na disposição de quatro eletrodos, sendo os eletrodos de potencial localizados na parte central e os eletrodos de corrente na parte externa. O procedimento de campo se baseia na ideia de que a distância "a", que separa os eletrodos de potencial, tenda a zero em relação aos eletrodos de corrente, que se afastam para cada medida que será realizada (Figura 3.5).

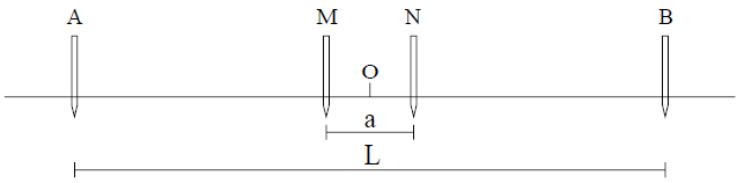



**Figura 3.5** - Disposição dos eletrodos no arranjo Schlumberger (Gandolfo 2007)

Esse arranjo é mais prático de ser utilizado em campo, por ter que deslocar apenas dois eletrodos durante o levantamento e suas leituras são menos sujeitas a interferências por ruídos (Braga 2006). Por apresentar boa resolução vertical, é muito comum ser utilizada em Sondagem Elétrica Vertical (Gandolfo 2007).

O arranjo Wenner consiste na disposição de quatro eletrodos igualmente espaçados. Nas imagens de Gandolfo (2007), essa distância é denominada "a". A profundidade de investigação aumenta com o aumento da distância entre os eletrodos, sendo sempre um múltiplo de "a" (Figura 3.6) (Gandolfo 2007).

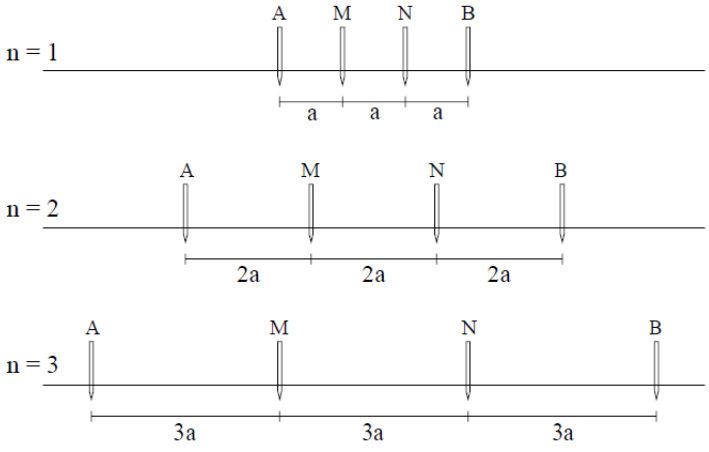



**Figura 3.6** - Disposição dos eletrodos no arranjo Wenner para diferentes profundidades (Gandolfo 2007)

Esse arranjo tem como principal vantagem a elevada razão entre sinal e ruído. Porém tem como desvantagem a perda de cobertura horizontal com o aumento de profundidade. Além disso,

o procedimento de campo é mais trabalhoso pois necessita da movimentação dos quatro eletrodos (Braga 2006, Gandolfo 2007)

O arranjo dipolo-dipolo consiste, também, na utilização de quatro eletrodos para captação determinação da resistividade. O processo consiste em manter uma separação constante entre os eletrodos de emissão (A e B) e os emissores de recepção (M e N), aumento a distância entre eles. Essa separação é feita a partir de um fator "n.a" e para cada fator, tem-se um novo nível de investigação.

O caminhamento é realizado quando se desloca os pares de eletrodos para novas posições com objetivo de obter dados de um novo espaço em subsuperfície (Figura 3.7).

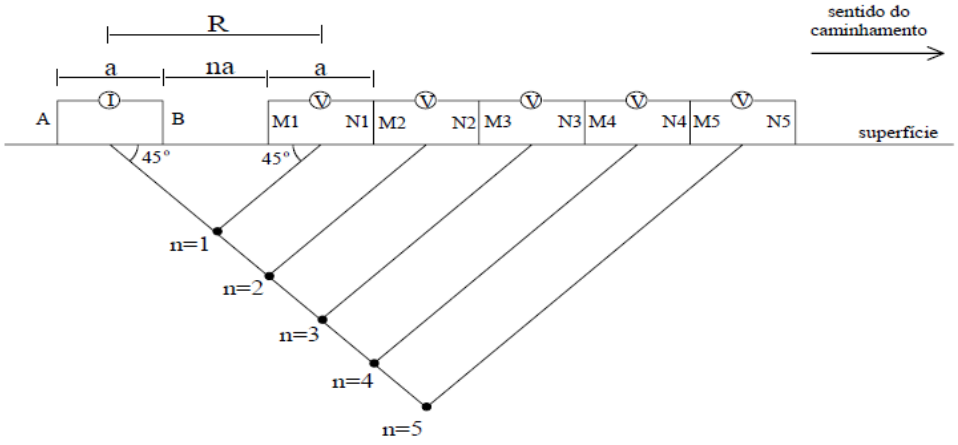



**Figura 3.7** - Esquema para aquisição de dados do arranjo Dipolo-Dipolo (Gandolfo 2007)

Suas principais vantagens consistem na detecção mais precisa de anomalias na interpretação qualitativa e ser fácil de operar em campo. Possui também uma boa resolução lateral e, de forma geral, oferece uma melhor resolução como um todo (Kearey *et al.* 2009, Braga 2006, Gandolfo & Gallas 2007).

O arranjo Polo-Dipolo possui o mesmo princípio do arranjo Dipolo-Dipolo, porém com a diferença que um dos eletrodos de corrente (B) é mantido a uma distância grande o suficiente para ser chamada de "infinito", em relação ao tamanho do trecho do caminhamento (Figura 3.8 e Figura 3.9).

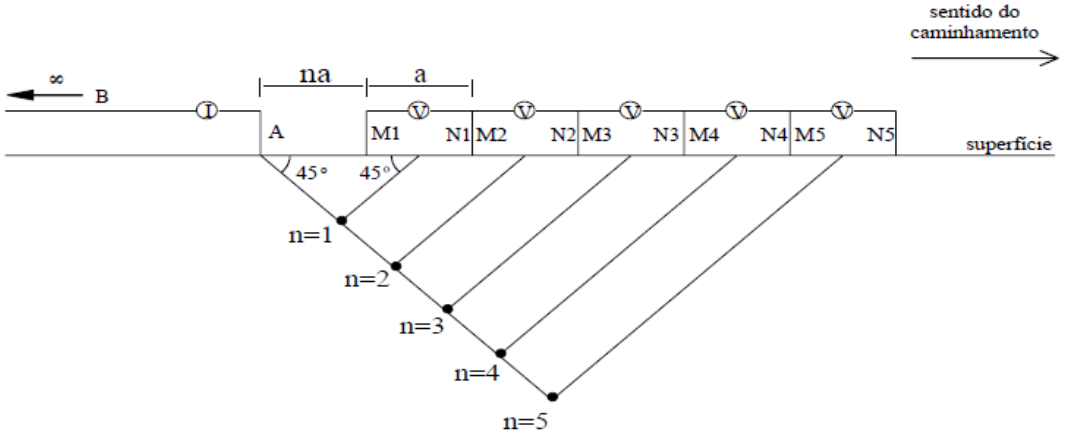



**Figura 3.8** - Esquema de caminhamento elétrico com o arranjo Polo-Dipolo (Gandolfo 2007)

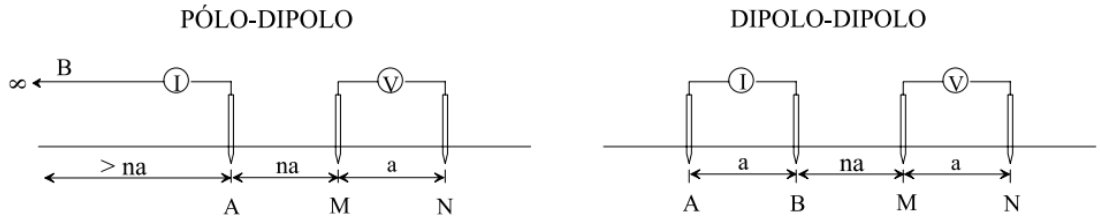



**Figura 3.9** - Comparação entre a disposição dos arranjos de Polo-Dipolo e Dipolo-Dipolo (Gandolfo & Gallas 2007).

Esse arranjo possui como vantagem uma melhor razão sinal/ruído, além de ser necessário manipular apenas três eletrodos durante o levantamento. Porém, por ser um arranjo assimétrico, caminhamentos realizados em direções opostas fornecem pseudo-seções diferentes, o que dificulta a localização de anomalias.

Gandolfo & Gallas (2007) mostram que para maiores profundidades, o arranjo Polo-Dipolo pode ser uma alternativa viável em relação ao Dipolo-Dipolo.

O arranjo Polo-Polo segue o mesmo princípio do Polo-Dipolo, porém colocando dois eletrodos, um de potencial e um de corrente no infinito (Figura 3.10). Sendo assim, o levantamento é realizado com apenas dois eletrodos (Gandolfo 2007).

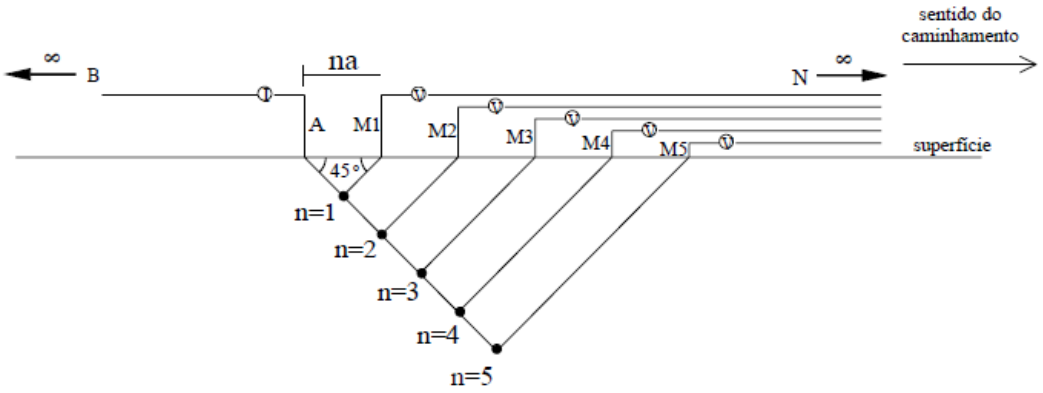



**Figura 3.10** - Procedimento para aquisição de dados com o arranjo Polo-Polo (Gandolfo 2007)

Esse arranjo permite alcançar grandes profundidades devido a sua alta razão sinal/ruído, porém é suscetível a interferências de natureza telúrica. Além disso, para realizar esse tipo de arranjo é necessário muito espaço físico para o posicionamento dos eletrodos.

## 3.2 TRABALHOS ANTERIORES

A utilização de diferentes métodos geofísicos para a detecção de cavidades está se tornando cada vez mais comum, uma vez que sua eficiência é comprovada a cada trabalho publicado. Uma das principais qualidades de utilizar geofísica é aliar bons resultados com baixos custos e facilidade na execução do trabalho. Além disso, os métodos geofísicos, no geral, utilizam metodologias que pouco ou nada afetam o local de trabalho, visto que a obtenção de dados é feita de maneira indireta, utilizando equipamentos que não poluem ou destroem o ambiente.

Dourado *et.al* (2001) utilizaram os métodos geofísicos de gravimetria, eletrorresistividade e GPR na identificação de cavidades em arenitos, em Descalvado, interior do estado de São Paulo. A partir de trabalhos consultados pelos autores, os métodos selecionados foram utilizados por conta do contraste das propriedades físicas que são apresentadas entre as cavidades e os arenitos. Para o método da gravimetria, foram planejadas 269 estações espaçadas em 5 metros através de nove linhas. No método da eletrorresistividade, foi utilizado a técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, também com espaçamento de 5 metros entre os eletrodos.

Franzini (2015), com objetivo de localizar cavidades naturais em São Pedro - SP, utilizou o método de Eletrorresistividade para determinar a localização das estruturas. A única linha do levantamento possuía 83 metros de comprimento e os eletrodos foram espaçados em 1 metro. Além disso, o levantamento foi realizado em três diferentes arranjos: Schlumberger; Wenner; e Dipolo-Dipolo. Os resultados das três seções foram comparados e o arranjo Schlumberger apresentou dados mais realistas, com os outros dois dispondo dados menos precisos por conta da

geometria dos arranjos. No entanto, o trabalho apresentou resultados satisfatórios em relação a efetividade da geofísica na detecção de cavidades.

O trabalho de Carraza (2016), por exemplo, utiliza a geofísica para identificar cavidades internamente em voçorocas. Essas cavidades são resultado de um fenômeno chamado *piping*, gerados pelo fluxo de água na parte interna da voçoroca. O aumento do fluxo de água faz com que a cavidade aumente e *aumente* o risco de desabamento do local. O trabalho foi realizado na cidade de São Pedro, no interior do estado de São Paulo, e o método geofísico utilizado foi o de eletrorresistividade, utilizando uma combinação dos arranjos Wenner e Schulumberger por ter um resultado com uma boa relação entre sinal e ruído, além de boa resolução lateral. O arranjo Wenner foi utilizado no primeiro nível de levantamento enquanto Schulumberger foi utilizado nos demais por apresentar resultados melhores em maiores profundidades. De forma geral, os dados coletados apresentaram resultados satisfatórios na identificação de cavidades naturais (*piping*) e artificiais (tubulações).

# CAPÍTULO 4

# AEROFOTOGRAMETRIA

O presente capítulo tem como finalidade compreender a evolução do método fotogramétrico, assim como a metodologia de trabalho para levantamentos aerofotogramétricos.

## 4.1 FOTOGRAMETRIA E FOTOGRAMETRIA AÉREA

A fotogrametria, segundo a *American Society of Photogrammetry*, consiste na arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes. Etimologicamente, o termo significa "medir graficamente usando luz" (Tommaselli 2009).

Ainda segundo Tommaselli (*op cit*.), a utilização dos princípios da aerofotogrametria foi iniciada por Aristóteles, em 350 a.C, onde já se projetava imagens por meio ótico. Em 1492, Leonardo da Vinci demonstrou os princípios de projeções óticas e de aerodinâmica de forma gráfica. Albrecht Drer, em 1525, construiu um equipamento que permitia o desenho em perspectivas verdadeiras, além de um dispositivo para produção de desenhos estereoscópicos. Jacopo Chimenti, em 1600, construiu o primeiro par de estereoscópico desenhado a mão (Figura 4.1). Em 1840, um ano após a invenção da fotografia, a viabilidade na utilização para fins topográficos foi demonstrada.

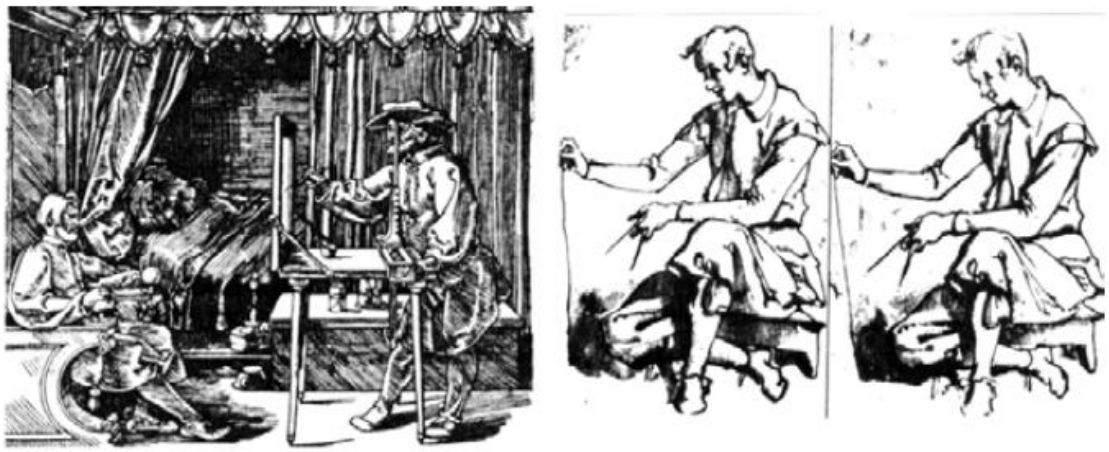


**Figura 4.1** - Mecanismo de desenhos estereoscópicos de Albrecht Drer e primeiro par estereoscópico desenhado a mão de Jacopo Chimenti (Tomasseli 2009).

Os métodos utilizados para levantamentos aerofotogramétricos podem ser classificados de acordo com o equipamento utilizado. Inicialmente, pela ausência de computadores capazes de processar os dados, os levantamentos topográficos utilizavam equipamentos analógicos, sendo

classificados como fotogrametria analógica. Com a evolução dos equipamentos fotográficos, substituiu-se os equipamentos analógicos por câmeras modernas, com melhores resoluções e qualidades de imagem. Esses levantamentos passaram a ser classificados como fotogrametria digital.

Assim como tem a fotogrametria terrestre, onde os equipamentos são utilizados em posições fixas no terreno, a fotogrametria aérea consiste na utilização dos equipamentos em veículos aéreos, tripulados ou não. A sua utilização se tornou indispensável nos levantamentos cartográficos nos últimos anos (Redweik 2015).

## 4.2 PROCEDIMENTO DE LEVANTAMENTO

Para a realização de um levantamento aerofotogramétrico, é necessário seguir uma série de procedimentos, que vão de definir o projeto até o resultado final, separados em duas grandes fases de trabalho (Redweik 2015 - Figura 4.2).

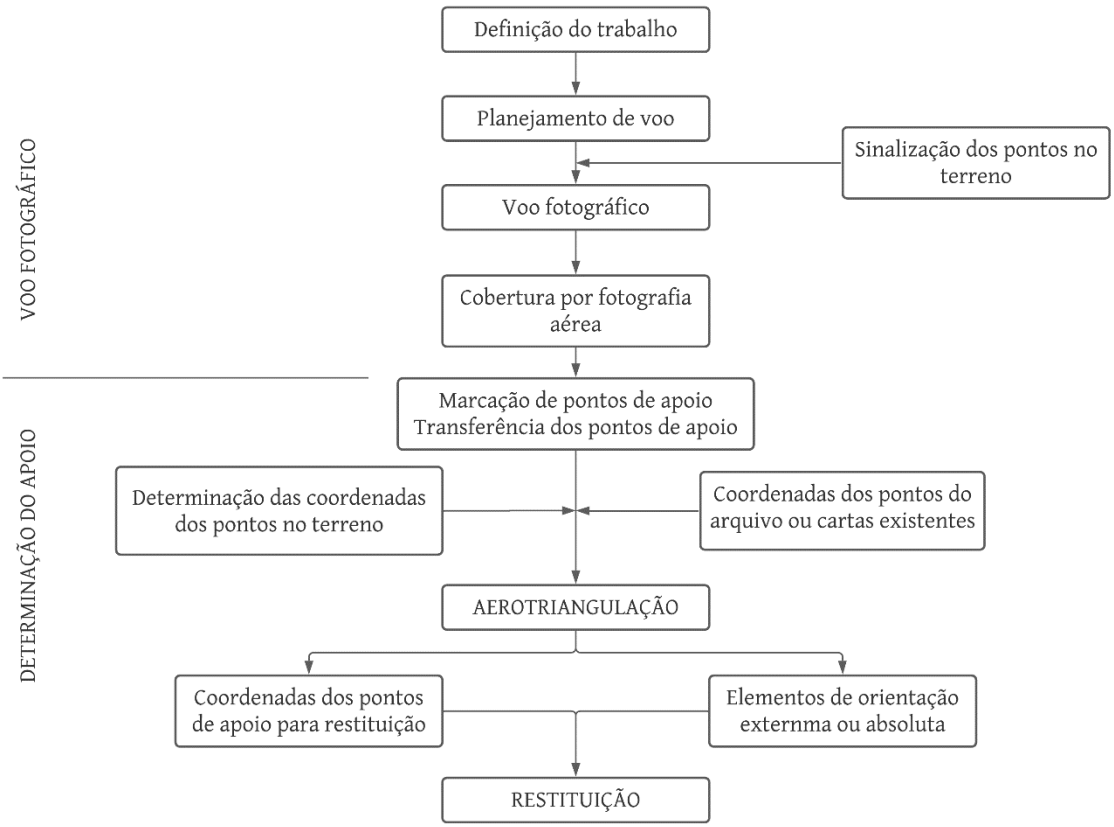



**Figura 4.2** - Procedimentos para a realização de um levantamento aerofotogramétrico (adaptado de Redweik 2015).

### 4.2.1 Voo fotográfico

Essa etapa consiste no reconhecimento do trabalho proposto com objetivo de realizar a programação do levantamento. Inicialmente há a definição do trabalho, onde o foco do planejamento se volta em entender a área do projeto, como sua disposição espacial, suas

dimensões totais, que tipo de resultado espera-se apresentar, escala utilizada, precisão, prazos de execução e possíveis restrições de voo.

### 4.2.2 Plano de voo

O planejamento do voo começa, basicamente, pela escolha da escala, considerando dois importantes aspectos: técnico e econômico. O primeiro se relaciona com o nível de detalhes que se espera do resultado. Fotografias com maior escala darão um maior nível de detalhe, assim como menor escala, menor nível de detalhe. O segundo aspecto está relacionado à quantidade de fotos tiradas e, consequentemente, o tempo de voo. Projetos realizados em menores escalas necessitam de menos fotos para cobrir uma determinada área, reduzindo assim os custos operacionais do projeto. O terceiro aspecto a ser considerado é a sobreposição das fotografias. Define-se como sobreposição a superfície que deverá ser captada pela câmera em duas ou mais fotografias. A sobreposição pode ser dividida em dois tipos: longitudinal e lateral (Redweik 2015).

A sobreposição longitudinal consiste na porcentagem de fotografia que será sobreposta a fotografia anteriormente tirada longitudinalmente a direção de voo (Figura 4.3). O seu principal objetivo é permitir uma visualização em três dimensões do terreno. A sobreposição lateral consiste na porcentagem de fotografia sobreposta na direção perpendicular à do voo, com objetivo de criar uma margem de segurança que não permita o aparecimento de espações vazios no resultado final (Figura 4.4).

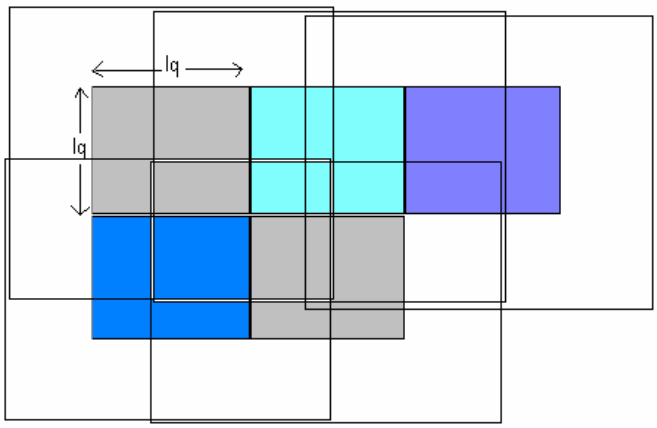



**Figura 4.3** - Esquema de sobreposição de fotos em um levantamento aerofotogramétrico (Redweik 2015).

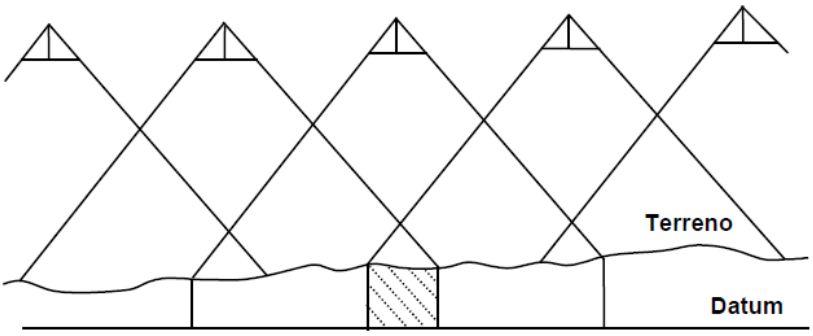



**Figura 4.4** - Esquema de sobreposição de fotos em perfil (Redweik 2015).

O quarto aspecto a ser considerado é a câmera e suas lentes. Para a realização de um levantamento, é possível utilizar câmeras analógicas, digitais ou imagens de satélites. A utilização de câmeras analógicas permite a troca de suas lentes, com diferentes distâncias focais, para alcançar diferentes objetivos no projeto. Com essa característica, é possível obter diferentes escalas de levantamento para uma mesma altura de voo ou até mesmo manter a escala variando a altura de voo (Figura 4.5).

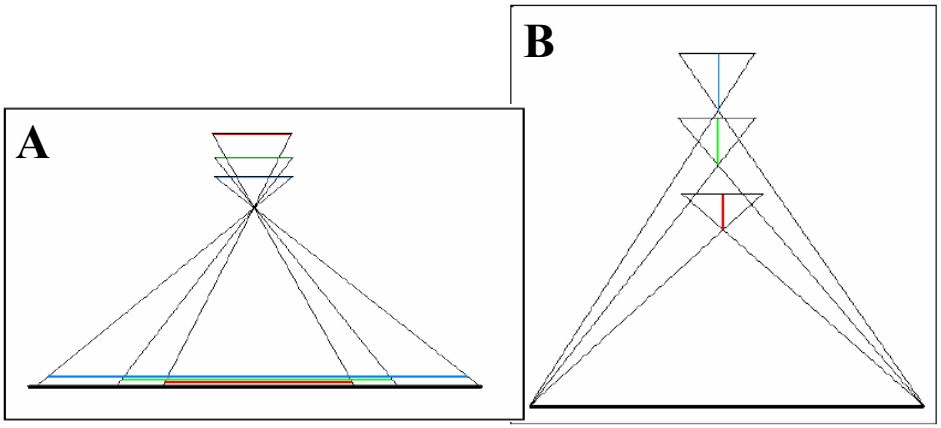



**Figura 4.5** - Procedimento para obtenção de diferentes escalas em uma mesma altitude (A) e uma mesma escala para diferentes altitudes (B) (Redweik 2015).

A escolha de lentes com maiores distâncias focais é mais utilizada em projetos que envolvam fotointerpretação, cartas fotográficas, cartografia de montanhas e vales profundos e cartografia de cidades com prédios altos. Assim, o cone de abertura da câmera fotográfica é maior que em lentes com distância focal menor, resultando em fotografias com menores distorções. A utilização de lentes com menores distâncias focais é utilizada em projetos que envolvam aerotriangulação, voos panorâmicos, aumento de precisão altimétrica, além de reduzir o custo do voo. O seu cone de abertura é maior, abrangendo uma maior área por foto, porém com uma maior distorção do terreno (Redweik 2015, Gamarra 2020).

O traçado do voo é um dos aspectos que são determinados a partir das características do terreno. Em áreas retangulares, o traçado do voo deve ser paralelo, varrendo toda a área de estudo.

Em áreas irregulares, deve-se subdividi-la em retângulos menores, de modo que cubra toda a área, e assim realizar o traçado paralelo em cada um dos retângulos. Para levantamentos em áreas que se aproximes de faixas estreitas, o voo deve ser realizado em trações retilíneos nas direções necessárias (Redweik 2015, Lopes 2019). A Figura 4.6 ilustra com mais detalhes um possível traçado de voo a ser realizado em diferentes situações.

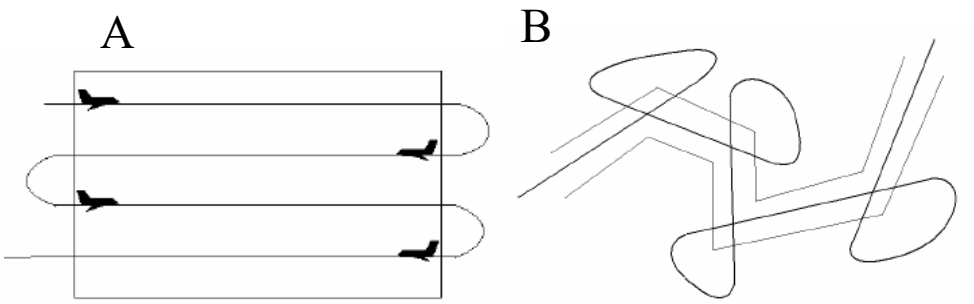



**Figura 4.6** - Trajetória de voo para terrenos retangulares (A), e em faixas estreitas (B) (Redweik 2015).

Silva & Costa (2010) apontam as principais vantagens e desvantagens da utilização do método de aerofotogrametria. Segundo os autores, a utilização ou não do método varia de acordo com a necessidade do projeto. A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) em projetos de aerofotogrametria é extremamente eficiente para mapear grandes extensões em um curto intervalo de tempo. É possível utilizar aplicativos de *smartphones* para programar o levantamento e torná-lo automático. Além disso, é um método mais seguro que os levantamentos topográficos convencionais. A sua utilização permite que áreas com elevada inclinação e zonas de risco possam ser mapeadas sem a necessidade de estar no local. Esse método também permite que áreas inacessíveis, seja por vegetação densa ou geomorfologia do local, também possam ser mapeadas e estudadas.

Em contrapartida, o mapeamento de áreas com vegetação densa impossibilita resultados precisos da topografia local. Além disso, locais com lagos ou rios também interferem no resultado devido ao reflexo da luz solar na água. A interferência gerada impossibilita a medição exata da coordenada. Para ambos os casos, é necessária uma correção no memento do tratamento dos dados. As condições climáticas também são variáveis que interferem na coleta de dados por VANTS. Para um bom levantamento é necessário tempo aberto com poucas ou nenhuma nebulosidade. A presença de nuvens interfere na captura de fotos, incapacitando o levantamento (Silva & Costa 2010).

## 4.3 MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE E MODELOS DIGITAIS DE TERRENO

Segundo Aspiazú (1990), o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT) consistem na aquisição, processamento e utilização de dados digitais para a elaboração de modelos que representem graficamente o relevo da superfície terrestre. Para Cruz

*et al*. (2011), a diferença entre ambos os modelos consiste no que está realmente representado: o MDT apresenta graficamente a superfície real do terreno, enquanto o MDS representa a superfície do terreno somado a qualquer objeto lá existente, como árvores e casas, por exemplo.

Cândido (2014) ressalta em seu trabalho as vantagens na construção do modelo a partir de VANTS, onde obtém-se grande resolução espacial que permite a elaboração de pequenas feições que possam estar presentes no local. Além disso, dentro do modelo é possível retirar informações importantes como curva de nível, declividade do terreno, dados hidrogeológicos e delimitação de bacias hidrográficas.

# CAPÍTULO 5

# TRABALHO DE CAMPO

O presente capítulo tem o propósito de detalhar todas as etapas dos trabalhos de campo realizados durante o projeto. Foram programadas três atividades: reconhecimento da área, levantamento aerofotogramétrico e levantamento geofísico de eletrorresistividade. Os dois primeiros tinham a finalidade de reconhecer as principais características geológicas e topográficas do local para que o levantamento geofísico fosse realizado da maneira mais eficiente. Após as análises, foram determinadas as linhas utilizadas para realização do levantamento de eletrorresistividade de forma que fosse possível alcançar profundidades mais elevadas com boa resolução.

## 5.1 RECONHECIMENTO DA ÁREA

Para o reconhecimento da área, foi realizado uma visita ao Parque Horto dos Contos, no centro histórico de Ouro Preto. Este Parque situa-se a noroeste da área de estudo. Na premissa da existência do túnel / bunkers, realizou-se a investigação na possibilidade de uma conexão com o Parque.

O local possui diversas galerias de lavra de ouro com direção NS. O objetivo secundário de caracterizar essas galerias é compará-las com os possíveis resultados do levantamento geofísico (Figuras 5.1).

**Figura 5.1** - Mapa indicando localização das galerias de mineração encontrada no Horto dos Contos e sua proximidade com a área de estudo (Fonte: basemap por Google Satellite, Datum WGS 84 / UTM zona 23S).

## 5.2 LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

O levantamos aerofotogramétrico, realizado com auxílio de um VANT, foi planejado para abranger uma boa cobertura de área ao redor da Rua das Flores. O objetivo do levantamento foi confeccionar um modelo digital de superfície para auxiliar no planejamento do levantamento geofísico e na integração dos resultados (Figura 5.2).

**Figura 5.2** - Ortofotomosaico gerado a partir do trabalho de processamento dos dados.

O planejamento e a aquisição dos dados foram feitos pelo *software DroneDeploy* e processados pelo *software Agisoft Metashape* para alinhamento das fotos, geração da nuvem de pontos, criação da ortofotomosaico, MDS e MDT.

## 5.3 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

O levantamento foi realizado conforme Figura 5.1, visando cortar perpendicularmente o possível túnel. Utilizou-se a técnica de caminhamento elétrico, no intuito de realçar as variações laterais em subsuperfície. O arranjo definido para o levantamento é o Dipolo-Dipolo, devido às características de precisão posicional e melhor resolução (Figura 5.3).

As principais informações sobre o levantamento de eletrorresistividade estão dispostas na (Tabela 5.1). Foram planejadas dois pares de linhas, paralelos entre si, com extensão de 100 e 60 metros. A Tabela 5.2 detalha as coordenadas de início e fim das linhas no Datum WGS 1984.

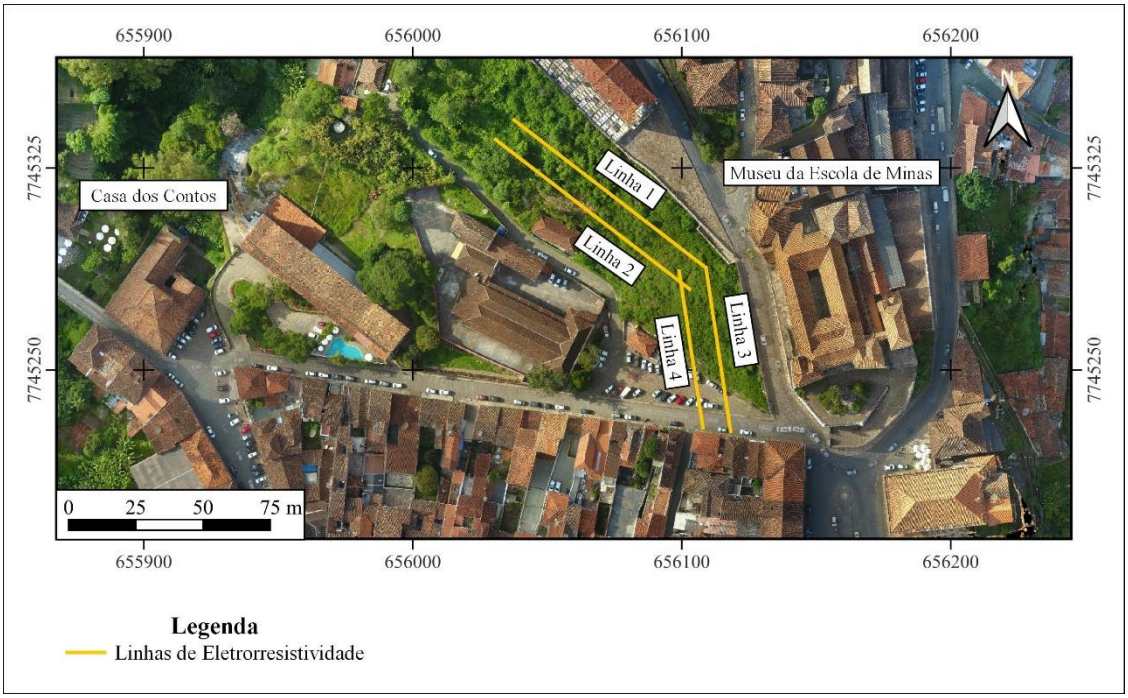



**Figura 5.3** - Linhas planejadas para o levantamento de eletrorresistividade.

**Tabela 5.1** - Parâmetros de levantamento utilizados nas linhas de eletrorresistividade.

| Parâmetros | Linhas 1 e 2 | Linhas 3 e 4 |
|---|---|---|
| Extensão | 100 m | 60 m |
| Espaçamento entre eletrodos | 5 m e 10 m | 5 m e 10 m |
| Espaçamento entre linhas | 10 m | 10 m |

**Tabela 5.2** - Coordenadas das linhas de eletrorresistividade. (Datum WGS 1984).

| Linhas | | Coordenadas (m) | | Altitude (m) |
|---|---|---|---|---|
| | | X | Y | |
| L1 | Inicio | 656109 | 7745288 | 1151 |
| | Fim | 656037 | 7745342 | 1158 |
| L2 | Inicio | 656102 | 7745280 | 1141 |
| | Fim | 656030 | 7745335 | 1149 |
| L3 | Inicio | 656109 | 7745288 | 1151 |
| | Fim | 656118 | 7745227 | 1156 |
| L4 | Inicio | 656099 | 7745286 | 1144 |
| | Fim | 656107 | 7745228 | 1149 |

O equipamento utilizado durante o levantamento um resistivímetro X5XTAL 500, operador Multipoint de 32 canais, cabos manga, multímetros digitais, eletrodos de alumínio, cabos e adaptadores (Figura 5.4).

**Figura 5.4** - A) Resistivímetro X5XTAL; B) Multipoint; C) Cabo manga; D) Cabos conectores; E) Eletrodos de alumínio; F) Cabo conector jacaré; Imagens disponíveis em http://autoenergia.com.br/Index.aspx, acesso em 20/04/2021.

A execução do levantamento durou três dias, de forma que no início a principal tarefa foi abrir picada (Figura 5.5) para possibilitar a inserção dos eletrodos no solo. Após essa etapa, foi realizado o levantamento de eletrorresistividade cobrindo a área do terreno e parte da Rua das Flores (Figura 5.6).

**Figura 5.5** - Trabalho de abertura de picada e inserção de eletrodos no solo.

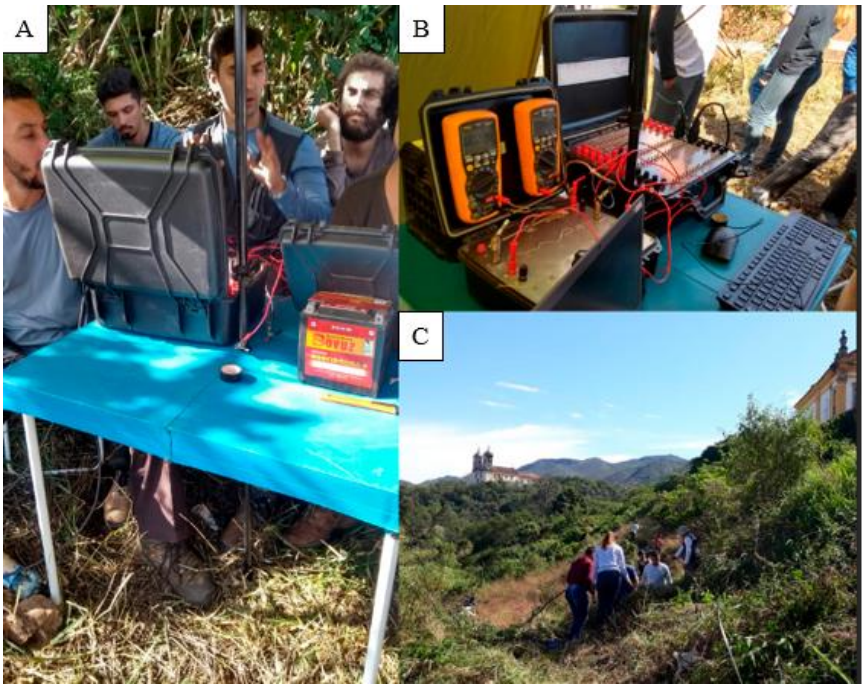



**Figura 5.6** - A) Manuseio e explicações acerca dos equipamentos utilizados; B) Disposição dos equipamentos na mesa; C) Inserção de eletrodos e ligação com o equipamento a mesa.

Desta forma, foram levantados um total de 320 metros de extensão em duas linhas paralelas entre si, equidistante de 10 metros. Realizaram-se medidas em 10 níveis, arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 10 e 5 metros, totalizando 370 medidas amostradas.

# CAPÍTULO 6

# PROCESSAMENTO DOS DADOS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o passo a passo do processamento dos dados obtidos durante o projeto. As seguintes informações estão relacionadas aos materiais dos levantamentos aerofotogramétrico e geofísico. O primeiro será apresentado na forma de um modelo tridimensional do terreno, ressaltando o seu relevo e sua relação com o planejamento das atividades; o segundo detalhará os resultados obtidos no levantamento de eletrorresistividade em três diferentes versões.

## 6.1 Aerofotogrametria

Os dados relacionados à aerofotogrametria foram trabalhados de duas formas diferentes. A princípio, o ortofotomosaico foi utilizado no *software* ArcMap 10.3 para o planejamento inicial das atividades, como planejamento das linhas de eletrorresistividade (Figura 5.3).

Em uma etapa posterior, os arquivos referentes ao modelo de elevação e ao ortofotomosaico foram integrados dentro do *software* ArcScene para gerar um modelo tridimensional do terreno com as fotos obtidas pelo drone. O arquivo de modelo digital de superfície consiste em um modelo visual referente às diferentes altitudes do terreno (Figura 6.1).

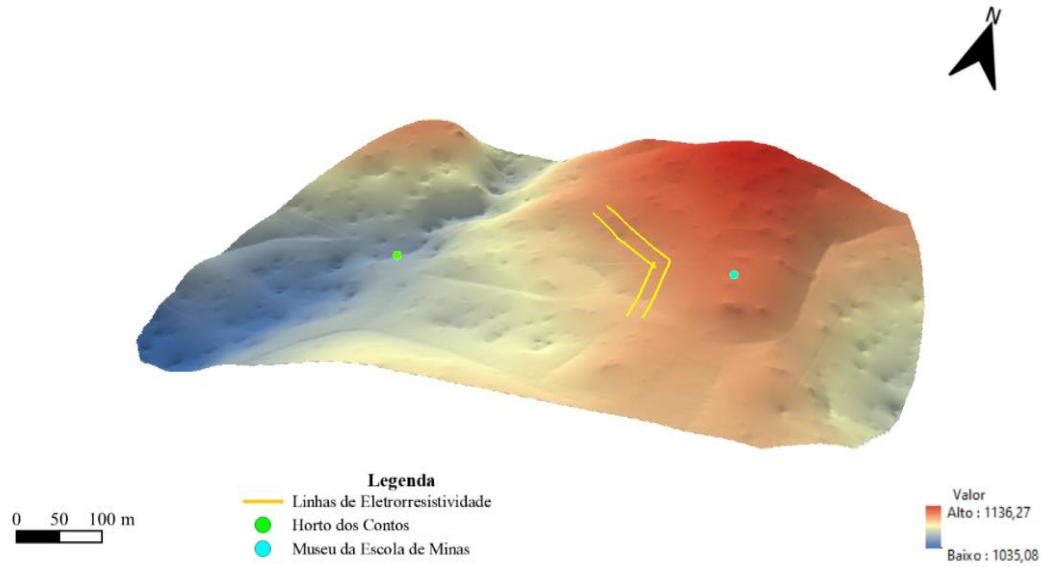



**Figura 6.1** - Modelo digital de superfície utilizado na integração com o ortofotomosaico.

Dentre suas ferramentas, o ArcScene possibilita o usuário em flutuar uma imagem na superfície gerada – no caso o ortofotomosaico – e atribuir o relevo como característica (Figura 6.2). Assim, o trabalho de análise se torna mais eficaz, além de possibilitar diferentes abordagens em relação aos resultados.

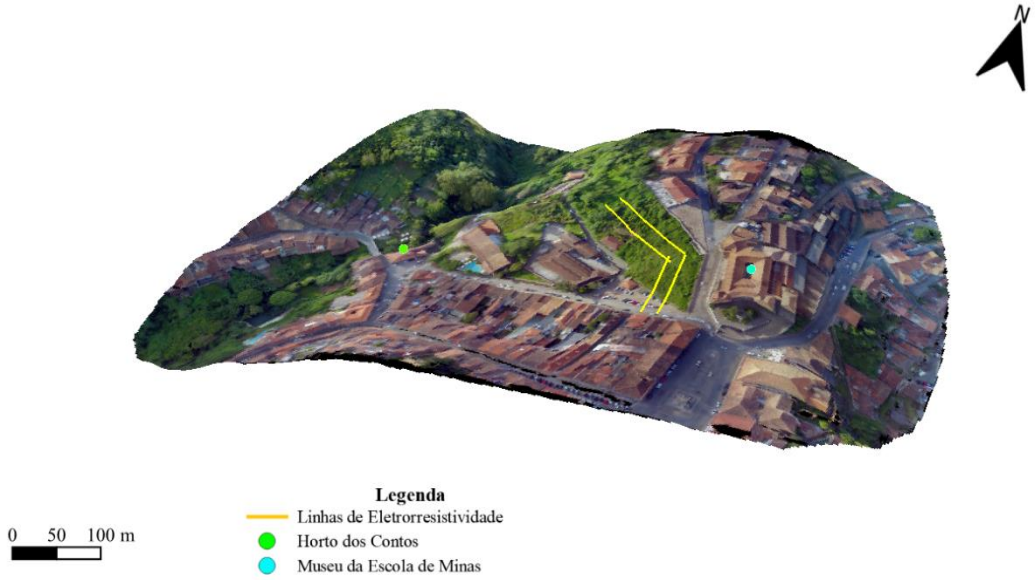



**Figura 6.2 -** Ortofotomosaico integrado com o modelo digital de superfície sem exagero vertical.

## 6.2 Eletrorresistividade

Os dados geofísicos coletados durante o trabalho de campo foram invertidos no *software RES2DINV*, onde se confeccionaram as seções bidimensionais das linhas de levantamento; e posteriormente os dados invertidos processados no *software Oasis Montaj* para gerar os modelos tridimensionais.

Os dados levantados são inseridos no *software* RES2DINV e no processamento geram-se três perfis distintos: o modelo teórico; o modelo esperado; e o resultado após a inversão. O primeiro consiste em um perfil bidimensional com eixos X e Y, que indicam a localização da medida no espaço, e o valor de resistividade coletado em campo. Ele é chamado de teórico pois possui valores de profundidade referentes a um ambiente homogêneo, em que a corrente flui sem interferência no local. A segunda seção corresponde ao modelo esperado com a resistividade aparente calculada pelo *software*, enquanto o terceiro corresponde ao modelo invertido, com o alcance de profundidade real definido (Figura 6.3).

Foram gerados dois perfis invertidos, com espaçamento de 10 metros e quatro perfis com espaçamento de 5 metros (Figura 6.4 e Figura 6.5). Para o espaçamento de 10 metros, a profundidade máxima foi de, aproximadamente 17 metros, enquanto para o espaçamento de 5 metros, a profundidade máxima foi de 8,5 metros.

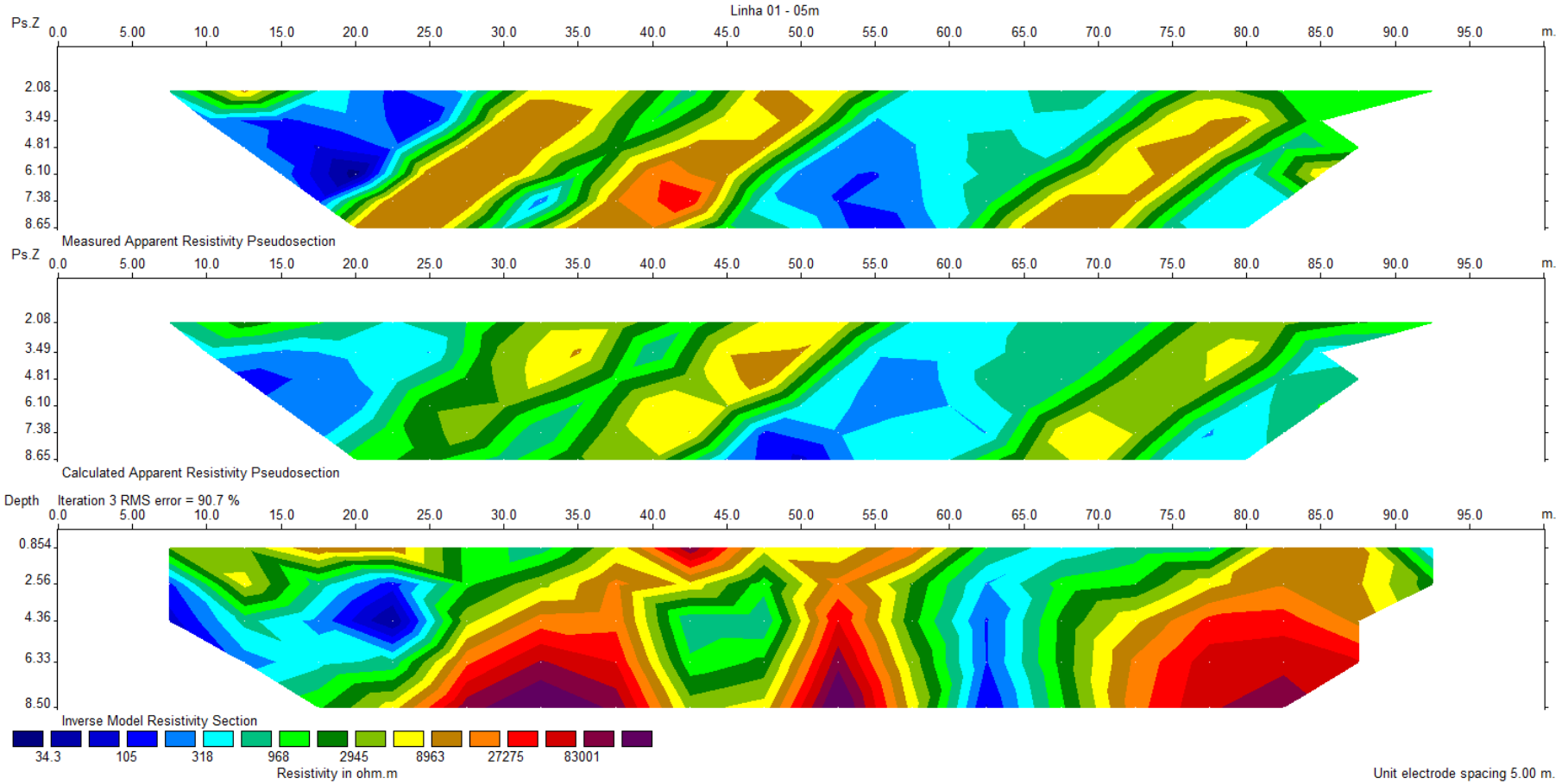
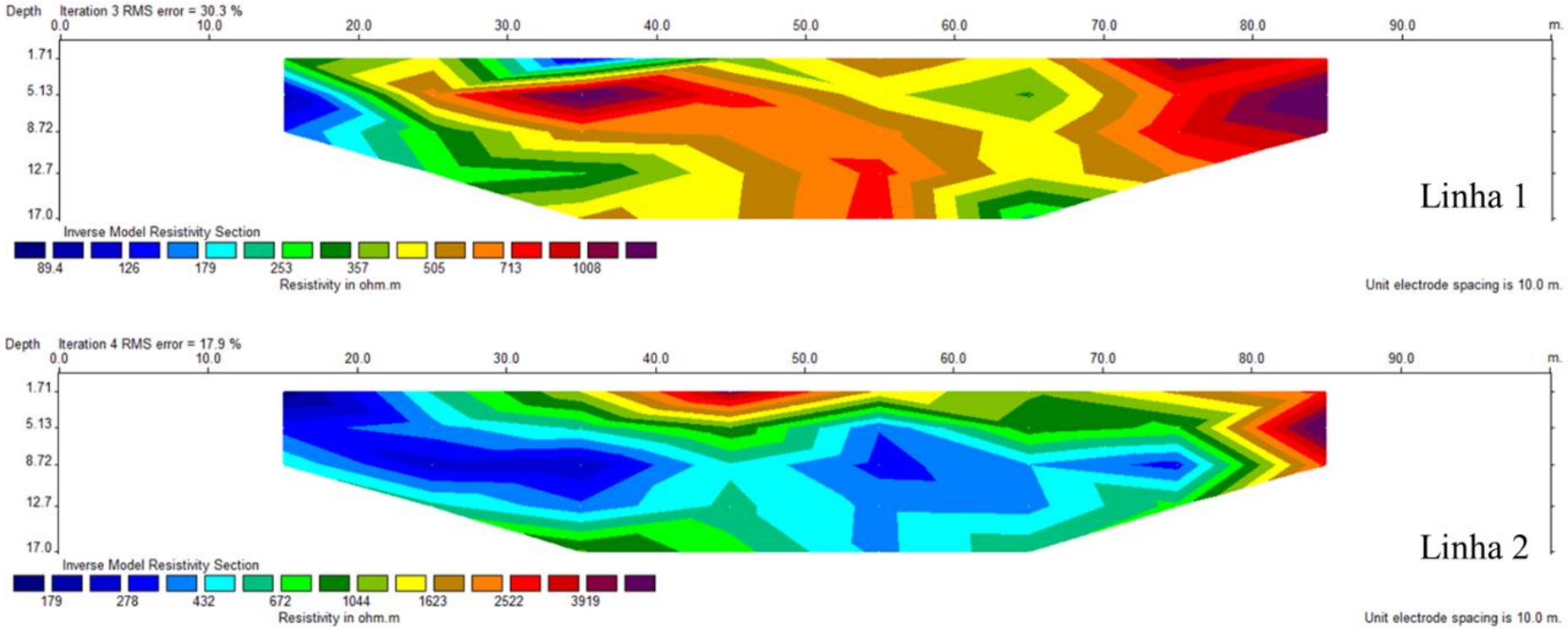



**Figura 6.3** - Exemplo dos três perfis gerados para a Linha 1 referente ao espaçamento de 5 metros.




.

**Figura 6.4** - Perfis invertidos das Linhas 1 e 2 referentes ao espaçamento de 10 metros.

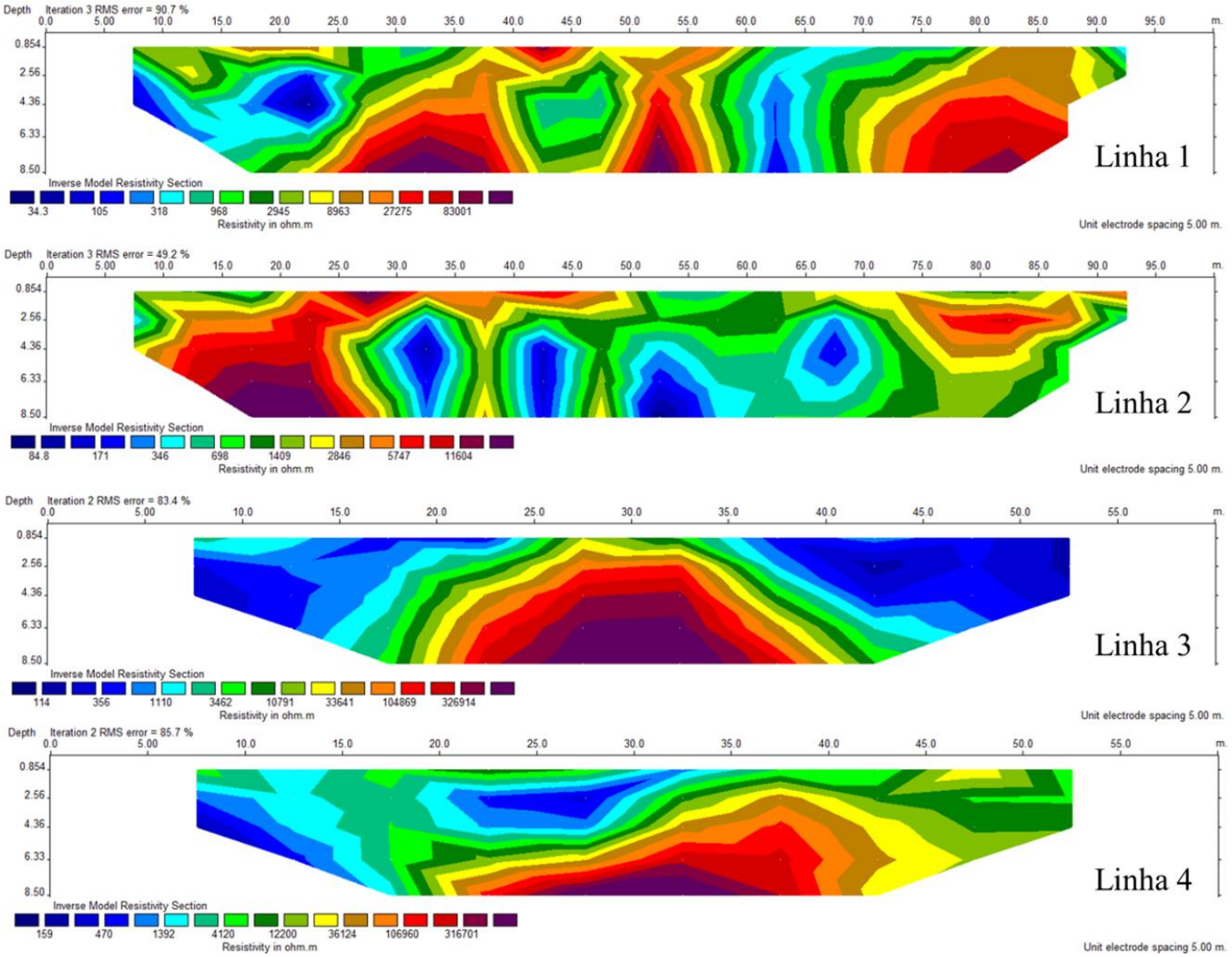



**Figura 6.5** - Perfis invertidos das Linhas 1, 2, 3 e 4, relacionados ao espaçamento de 5 metros.

Os dados invertidos são inseridos no *software* Oasis Montaj com as suas respectivas posições geográficas. Neste processamento, geram-se modelos tridimensionais pela interpolação dos dados com o método de krigagem (Figura 6.6).

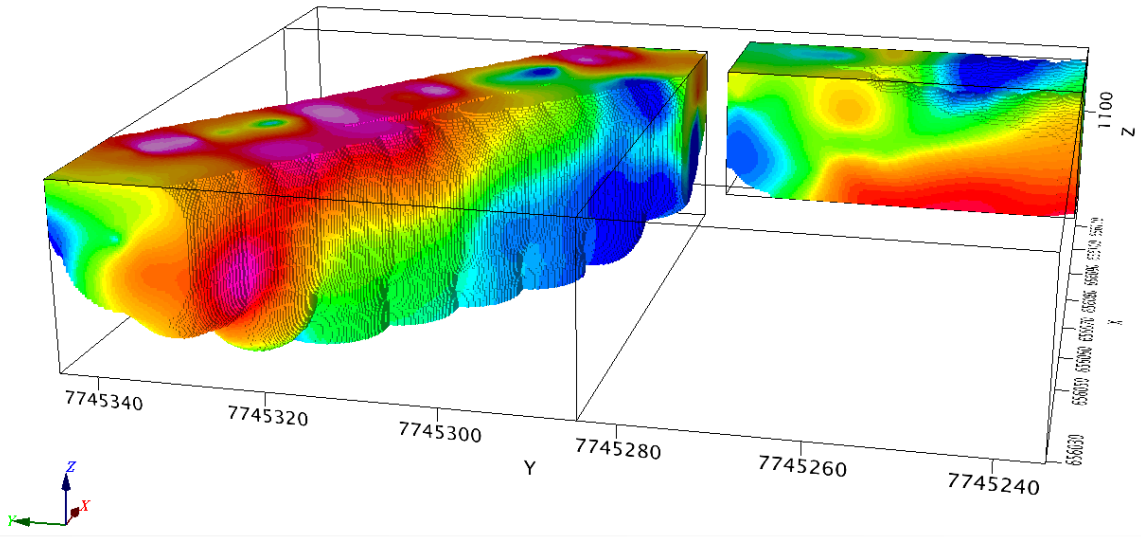



**Figura 6.6** - Modelo tridimensional de resistividade gerado a partir do *software Oasis Montaj*.

# CAPÍTULO 7

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta as interpretações realizadas a partir dos resultados obtidos dos levantamentos aerofotogramétricos e eletrorresistivo. Para isso, os dados foram trabalhados isoladamente e em conjunto, a fim de obter a melhor interpretação.

Existem duas hipóteses de resultados da eletrorresistividade para o possível túnel, ou este está preenchido por água ou está preenchido por ar, ou seja, a resposta elétrica seria altamente resistiva ou altamente condutiva, respectivamente. Assim, a interpretação vai ser balizada na geometria do provável túnel.

A análise da eletrorresistividade é feita em pares de linhas. Desta forma, o Bloco 1 refere-se à interpretação conjunta das Linhas 1 e 2 e o Bloco 2, das Linhas 3 e 4. Ressalta-se que o levantamento das Linhas 1 e 2 foram realizados com espaçamentos de 5 e 10 metros, enquanto as Linhas 3 e 4, com espaçamento de 5 metros.

A Figura 7.1 ilustra a seção invertida das Linha 1 e 2 com espaçamento de 5 metros. Observa-se que as anomalias resistivas existentes nas seções invertidas não possuem continuidade entre as linhas. Desta forma, estas anomalias não devem representar o túnel, principalmente quando se analisa nestas linhas os dados de espaçamento de 10 metros (Figura 7.2)

A interpolação dos dados das Linhas 1 e 2 (método de krigagem) gera o Bloco 1 (Figura 7.3). A análise deste bloco permite concluir que não existe uma continuidade das anomalias resistivas, não sendo, portanto, interpretadas como o possível túnel. Em suma, pode-se afirmar, que até à profundidade investigada (17 m), não existe túnel.

.

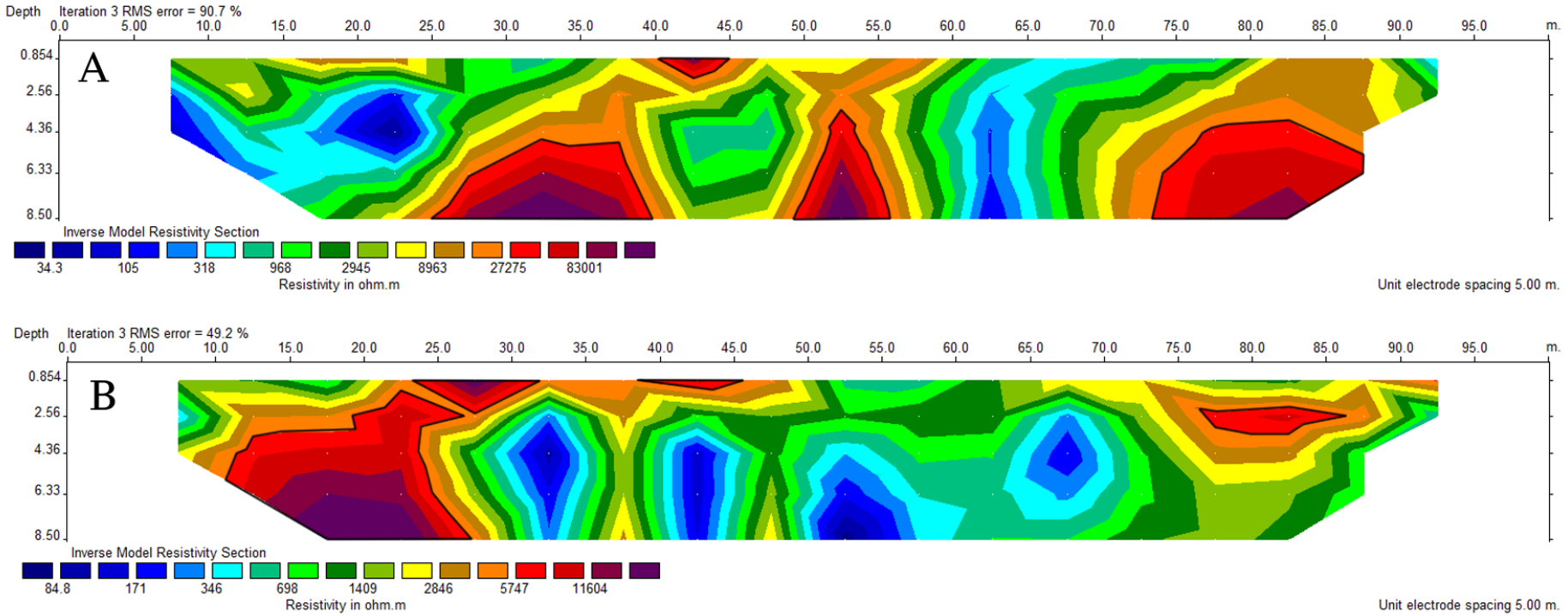



**Figura 7.1** - Perfis de resistividade referentes às Linhas 1 (A) e 2 (B) com espaçamento de 5 metros. Destacadas em preto estão as respostas geofísicas de alta resistividade.

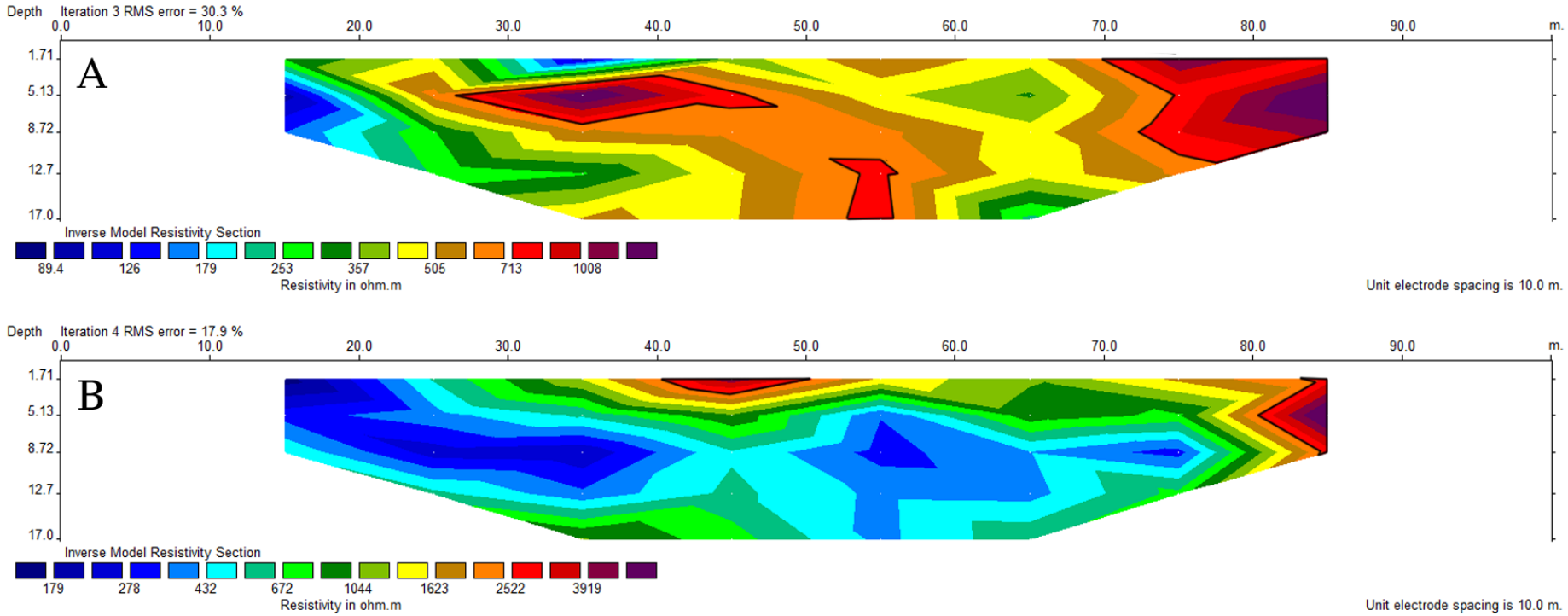



**Figura 7.2** - Perfis de resistividade referentes às Linhas 1 (A) e 2 (B) com espaçamento de 10 metros. Destacadas em preto estão as respostas geofísicas de alta resistividade..

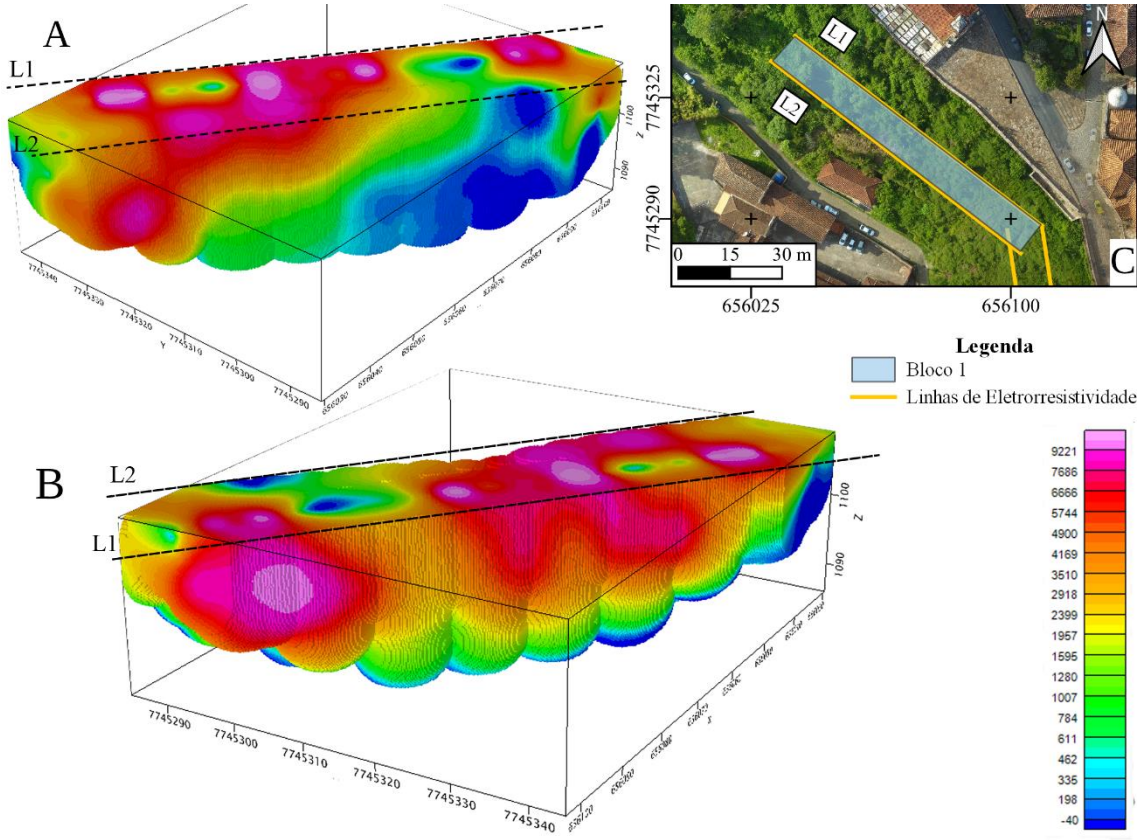



**Figura 7.3** - Modelo tridimensional de resistividade do Bloco 1, com visões frontal (A) e posterior (B) e mapa de localização (C).

A Figura 7.4 ilustra as seções invertidas das Linhas 3 e 4 com espaçamento de 5 metros. Observa-se que a anomalia resistiva existente nas seções invertidas possui continuidade entre as linhas, além de dispor de um formato arredondado bem definido. Desta forma, considerando essas caraterísticas, a anomalia pode representar o suposto túnel.

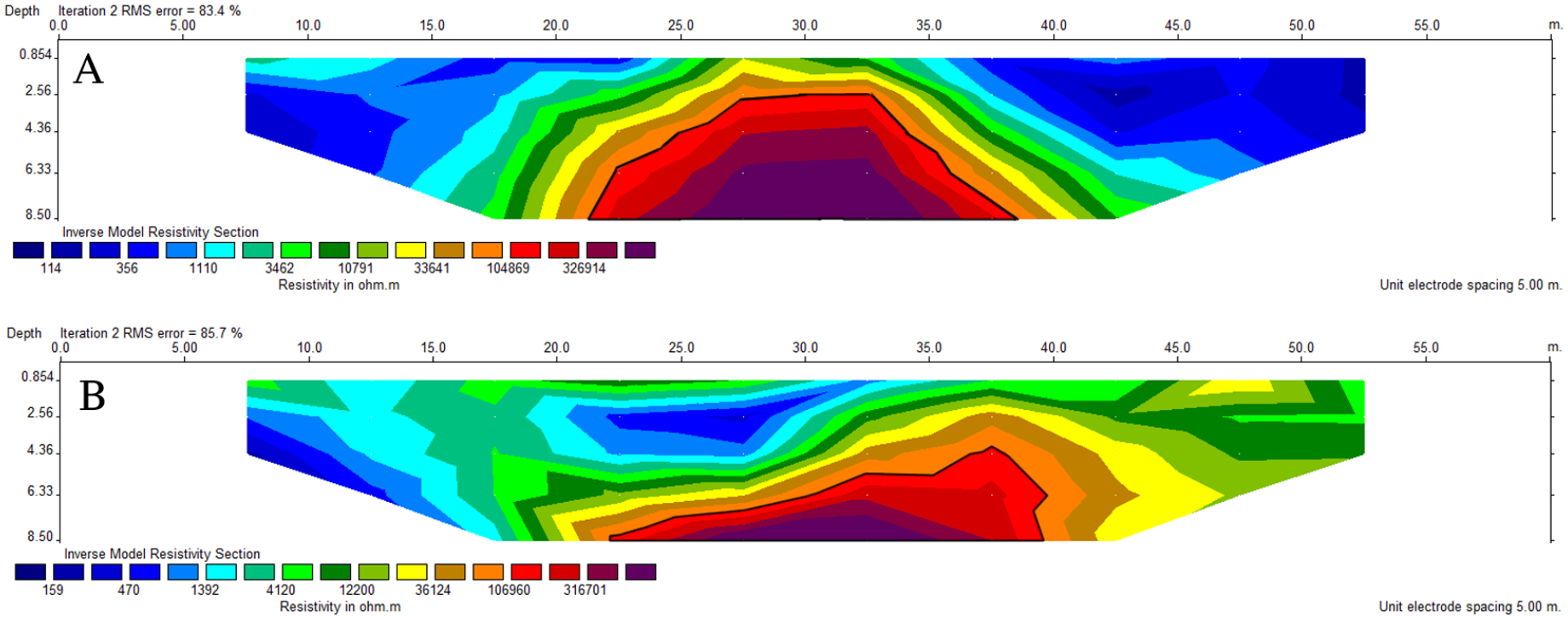



**Figura 7.4** - Perfis de resistividade referentes às Linhas 3 (A) e 4 (B) com espaçamento de 5 metros. Contornadas em preto estão as respostas geofísicas de alta resistividade com geometria arredondada que combinam com o suposto túnel.

A interpolação dos das Linhas 3 e 4 geram o Bloco 2 (Figura 7.3). A análise do bloco permite definir com clareza a continuidade das anomalias apontadas na Figura 7.4.

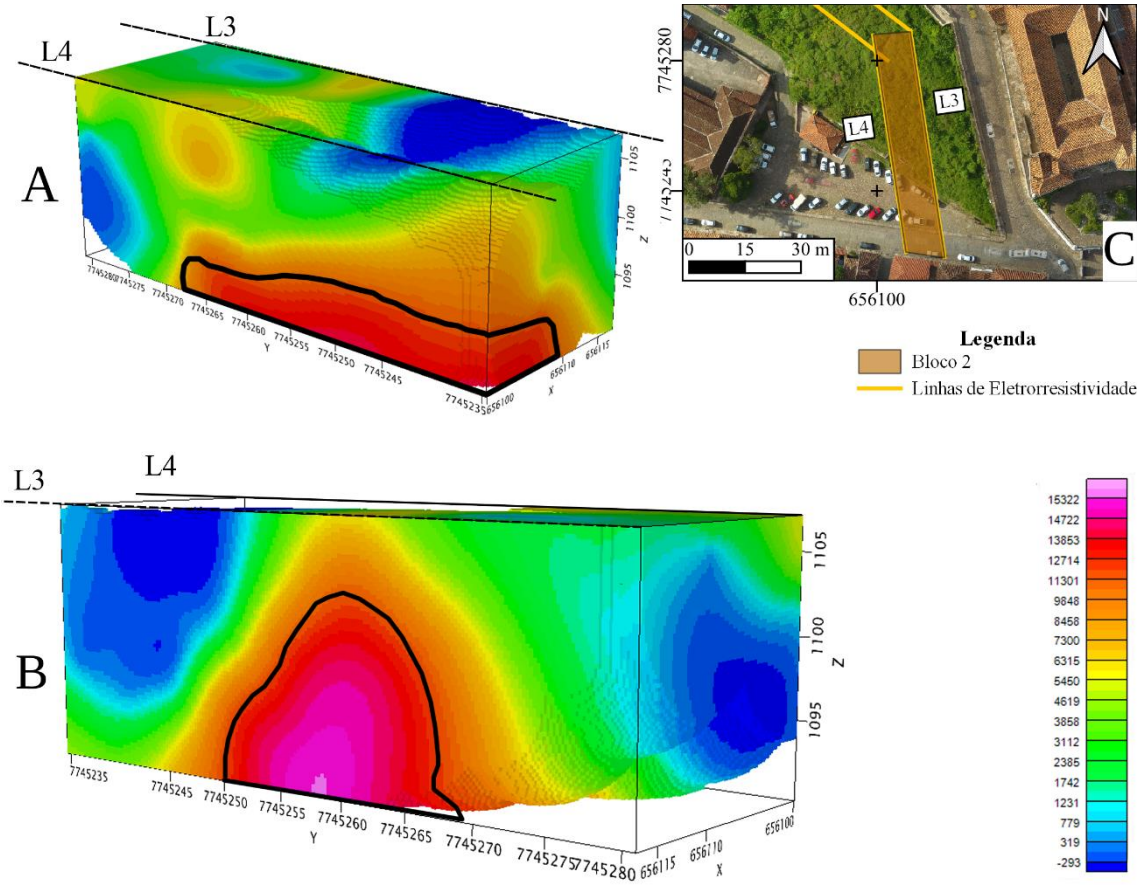



**Figura 7.3** - Modelo tridimensional gerado a partir da interpolação dos dados das Linhas 3 e 4. **A)** Visão frontal do bloco, com destaque para a zona de alta resistividade; **B)** Visão posterior do bloco, com destaque para a zona de lata resistividade de formato arredondado; **C)** Mapa de localização do Bloco 2.

Sendo assim, foi utilizada uma ferramenta do *software Oasis Montaj* que permitiu a exibição de faixas de resistividades pré-definidas. Essa ferramenta foi usada para analisar as diferentes respostas geofísicas em todo o bloco. Foram categorizadas três diferentes faixas para análise:

- Zona de baixa resistividade: inferior a 6000 Ω.m;
- Zona de resistividade intermediária: de 6000 Ω.m até 10700 Ω.m;
- Zona de alta resistividade: superior a 10700 Ω.m.

A Figura 7.4 representa a zona de baixa resistividade. Observa-se que essa faixa de resistividade está concentrada ao longo da superfície do bloco e contornando um espaço vazio, destacado em preto, em seu centro, com geometria alongada ao longo do modelo. É possivel

interpretar que essa porção superfical de alta condutividade esteja relacionada com a cobertura de solo úmido do local.

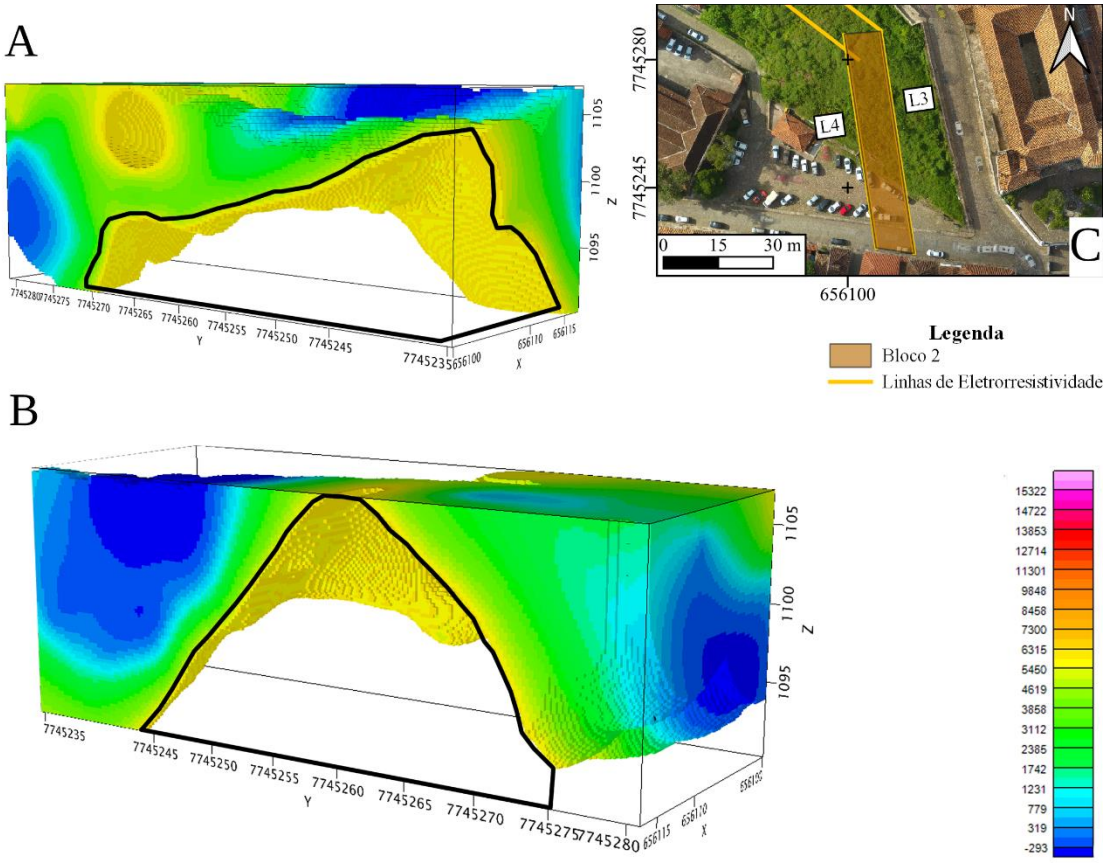



**Figura 7.4** - Resposta geofísica de baixa resistividade — até 6000 Ω.m — do Bloco 2. **A)** Visão frontal do bloco, com destaque para a área vazia, referente às zonas de maior resistividade; **B)** Visão posterior do bloco, com destaque para a área referente às zonas de maior resistividade; **C)** Mapa de localização do bloco.

Seguindo o mesmo processo de análise, a Figura 7.5 apresenta a zona de resistividade intermediária. Nela, observa-se que essa faixa de resistividade se encontra mais internamente no bloco contornando a área vazia que representa a zona de maior resistividade. Esse vazio, contornado em preto, apresenta, assim como na figura anterior, uma continuidade ao longo do modelo. É possível interpretar esse resultado como uma região intermediária de rocha e solo, com menor umidade.

.

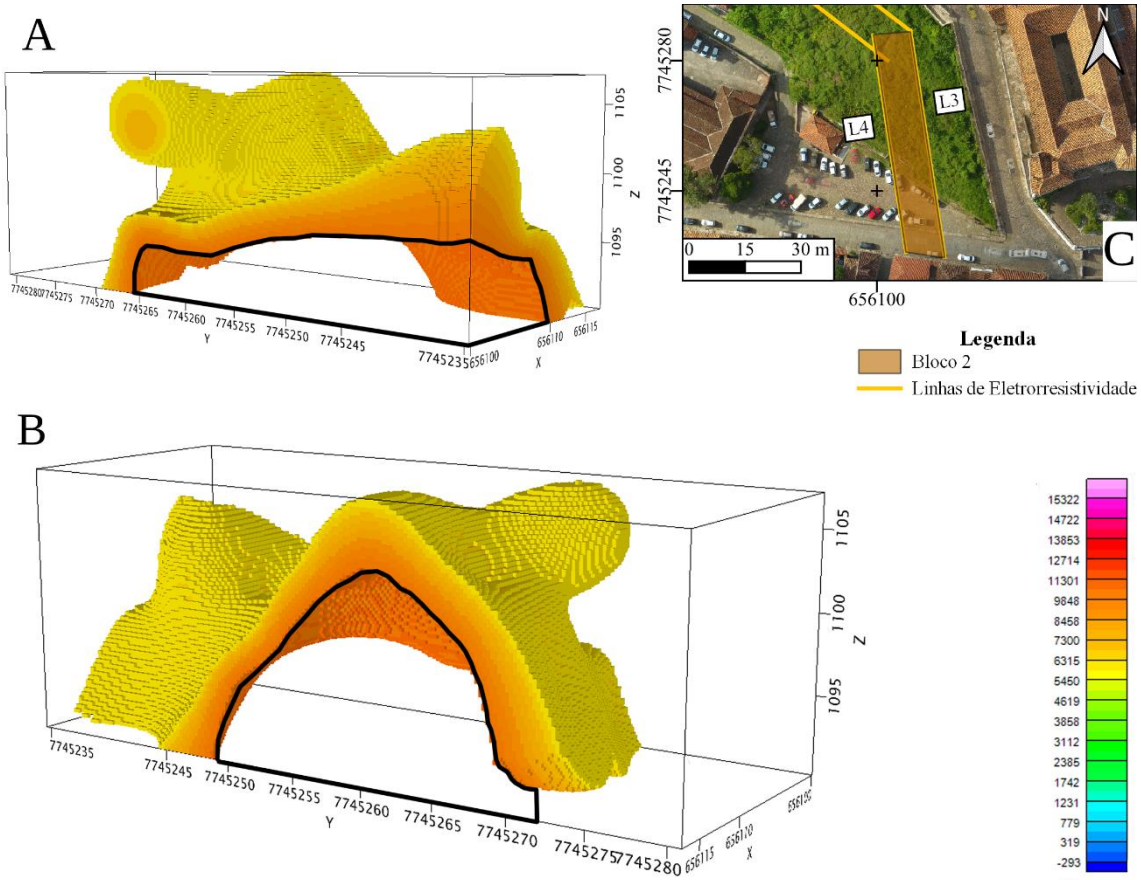



**Figura 7.5** - Zona de resistividade intermediária — de 6000 à 10700 Ω.m — do Bloco 2. **A)** Visão frontal do Bloco, com contorno em preto da área vazia, de alta resistividade; **B)** Visão posterior do Bloco, com destaque para a forma do espaço vazio referente à zona de alta resistividade; **C)** Mapa de localização do bloco.

A Figura 7.6, ilustra a zona de maior resistividade. Observa-se que essa faixa de resposta resistiva preenche o espaço vazio destacado nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7. Além disso, destaca-se seu formato contínuo ao longo do bloco e o crescimento concêntrico da resistividade da borda para o centro (B).

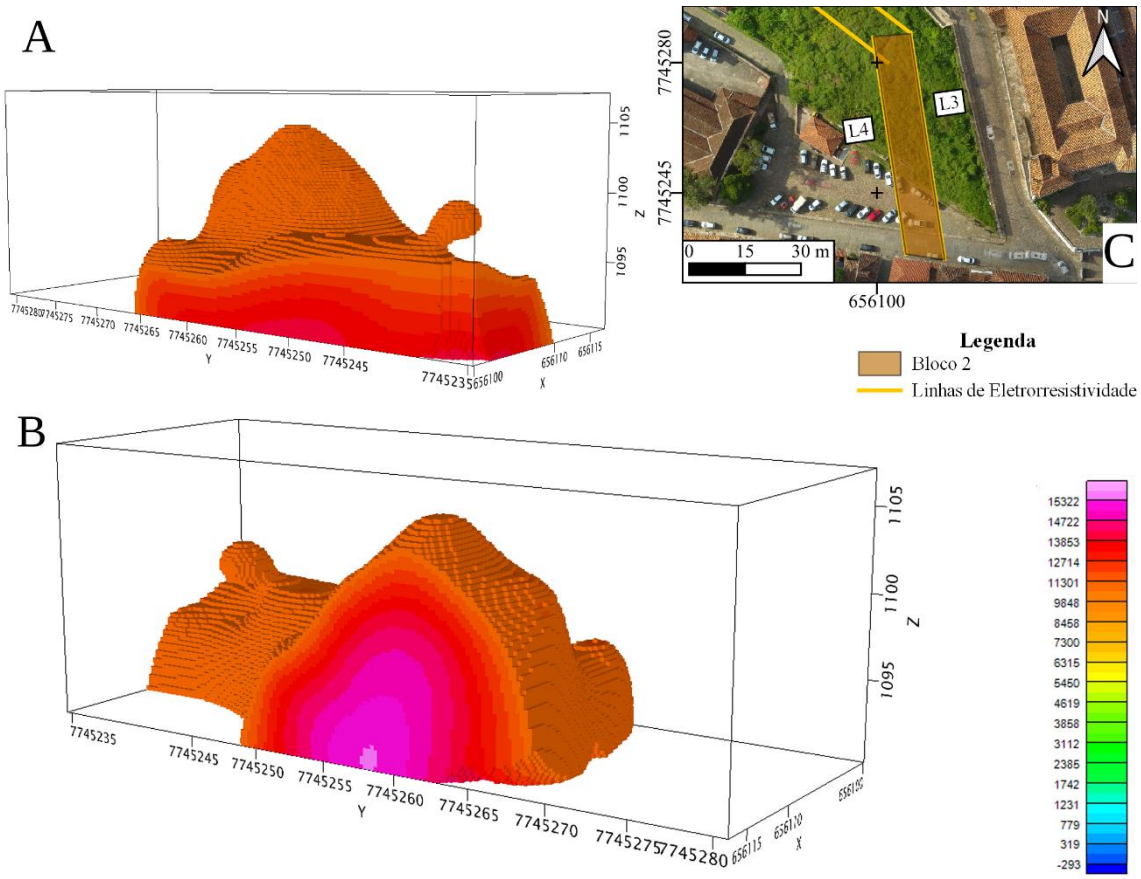



**Figura 7.6** - Zona de alta resistividade — acima de 10700 Ω.m — do Bloco 2. **A)** Visão frontal, a partir da Linha 4; **B)** Visão posterior, a partir da Linha 3, com uma zona de alta resistividade, circular e contínua em direção à Linha 4; **C)** Mapa de localização do bloco.

Diante do resultado apresentado, é possível determinar a real possibilidade da presença do túnel preenchido por ar entre a profundidade de 6,5 e 8,5 metros, com abertura de, aproximadamente, 3 a 4 metros, devido ao seu formato contínuo de alta resistividade. Além disso, a morfologia do modelo, com mergulho na mesma direção da rua e em direção ao Museu Casa dos Contos, sustentam a perspectiva da presença do túnel. Outra possibilidade plausível seria a presença de um bloco de rochas fresca, no entanto, acredita-se que a existência de uma rocha com com volume aproximado de 2800 m³ em meio ao filito seja improvável.

Para uma resposta mais definitiva, recomenda-se uma nova atividade de campo utilizando a mesma metodologia adotada, levantando dados de novas linhas paralelas às Linhas 3 e 4, sentido SW. Esses dados podem ser interpolados juntamente com os apresentados neste trabalho, com objetivo de definir se a anomalia encontrada possui continuidade ao longo da Rua das Flores. A Figura 7.9 apresenta uma alternativa de levantamento, sugerindo-se três novas linhas na área de estacionamento. Para melhor definição das linhas, definiu-se no mapa a localização da anomalia vista na Figura 7.8, desenhada em planta.

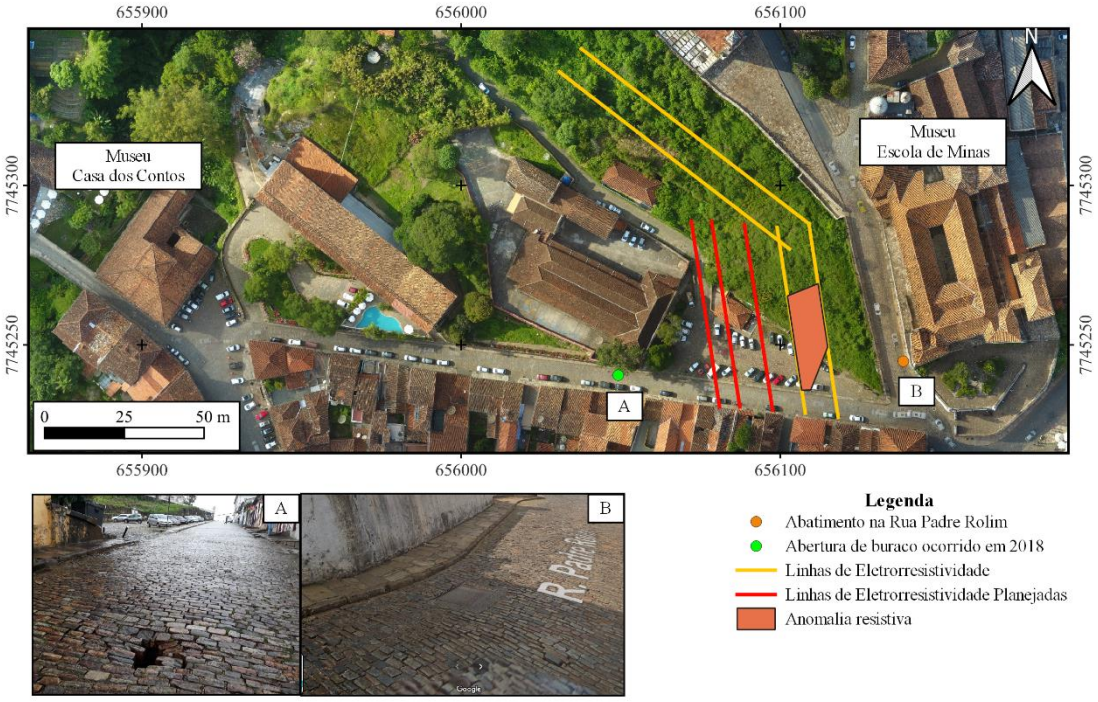



**Figura 7.7** - Mapa com um possível planejamento de campo para novos levantamento geofísicos de eletrorresistividade. **A)** Buraco aberto na Rua das Flores em período chuvoso em novembro de 2018; **B)** Rua Padre Rolim, ao lado do Museu da Escola de Minas, com um abatimento visível ao lado da calçada.

Paralelamente, a identificação da possível estrutura permite que novos trabalhos estudem a relação causa e efeito com o evento da abertura do buraco na Rua das Flores, ocorrido em novembro de 2018 e também ao abatimento da Rua Padre Rolim, localizada ao lado do Museu da Escola de Minas.

# CAPÍTULO 8

# CONCLUSÕES

Entendendo a importância dos estudos arqueológicos para o desenvolvimento da sociedade, este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo identificar possíveis estruturas antrópicas, como túneis ou *bunkers*, que possivelmente ligam o Museu da Escola de Minas e o Museu Casa dos Contos com a utilização do método geofísico de eletrorresistividade para investigação da área.

Utilizou-se a aerofotogrametria para análise topográfica do local e eletrorresistividade para investigação em subsuperfície. Com os produtos gerados foram realizadas análises acerca das características da área e sobre a existência das estruturas.

Os principais produtos gerados pela aerofotogrametria foram o ortofotomosaico e o modelo digital de superfície, utilizados para planejar o levantamento geofísico, analisar as condições da topografia e do relevo da área entre os museus e utilizá-las em conjunto com os dados de resistividade.

Para o levantamento geofísico de eletrorresistividade, foram definidos o uso do método de caminhamento elétrico ao longo de quatro linhas, duas com 100 m de comprimento e duas com 60 m, paralelas entre si. Além disso, foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo por conta de sua melhor precisão posicional e resolução.

Os dados de resistividade coletados foram processados no *software RES2DINV* com objetivo de criar perfis invertidos das quatro linhas de levantamento. Observou-se nos perfis os zonas de interesse com características de alta resistividade. Em seguida, os dados foram interpolados tridimensionalmente no *software* Oasis Montaj, com objetivo de observar a continuidade das anomalias encontradas nos perfis invertidos. No programa, o modelo tridimensional foi trabalhado a partir de diferentes faixas de resistividade para uma análise mais precisa das características do terreno.

A análise conjunta dos modelos permitiu identificar um alvo em potencial com resposta geofísica e continuidade entre as Linhas 3 e 4, Bloco 2. A estrutura encontrada apresenta uma morfologia alongada e arredondada com cerca de 5 metros de comprimento, além de uma alta resistividade, compatível com o esperado de um túnel preenchido por ar. No entanto, a ausência de dados diretos não permite definir com certeza a existência da estrutura, apesar de ser um indicador de alto potencial.

No intuito constatar a presença do provável túnel, indica-se uma perfuração a trado mecanizado e novos levantamentos geofísicos de eletrorresistividade paralelamente às Linhas 3

e 4, seguindo a mesma metodologia. Esse procedimento permitirá identificar se a anomalia de alta resistividade encontrada possui continuidade em direção ao Museu Casa dos Contos, assim como auxiliar em futuros estudos arqueológicos e geotécnicos do local.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Alkmin, F. F., Marhak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. Precambrian Research, 90: 29-58.

Alkmim, F. F.; Martins-neto, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33:127–139.

Antonil A. A. 1711. *Cultura e opulência do Brasil, por suas drogas e minas. Lisboa*. 205 p. Disponível em: <http://acervo.bndigital.bn.br/sophia/index.html>. Acesso em 03/03/2020.

Aspiazú C., Alves L. M., Valente O. F. 1990. Modelos digitais de terrenos conceituação e importância. Boletim de Pesquisa Florestal, v. 21, n. 1, p. 27-36.

Baltazar, O. F.; Zucchetti, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. Ore Geology Reviews, 32: 471–499.

Braga, A.C.O.B. 2016. Geofísica Aplicada: Métodos Geoelétricos em Hidrogeologia. São Paulo: Oficina de Textos, 160 p.

Braga, A. C.O. 2006. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p. 126.

Cândido A. K. A. A. et al. 2014. Modelo Digital de Superfície gerado a partir de imagens de VANT. Anais 5º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal.

Carraza, L. P. 2016. Identificação De Cavidades Em Voçoroca Por Meio Da Aplicação Do Método Geofísico Da Eletrorresistividade. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p.67.

Chemale Jr, F. A. R. I. D., Rosiére, C. A., & Endo, I. 1991. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Um modelo. Pesquisas em Geociências, 18(2), 104-127.

Cintra M. 2008. Paradigmas tributários: do extrativismo colonial à globalização na era eletrônica." Curso de Direito Tributário e Finanças Públicas, São Paulo. Editora Saraiva. 15 p.

Costa L. F., Rocha M. M., Sousa R. M. 2003. O ouro do brasil: transporte e fiscalidade (1720-1764). Anais do V Congresso Brasileiro de História Econômica e 6ª Conferência Internacional de História de Empresas, Associação Brasileira de Pesquisadores em História Econômica, 23 p.

Cruz C. B. M., Barros R. S., Cardoso P. V., Reis R. B., Rosário L. S., Barbosa S. S., Rabaco L. M. L., Lourenço J. S. Q. 2011. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba: INPE, v. 2011, p. 5463.

Doria, P. 2013. 1789: a história de Tiradentes, contrabandistas, assassinos e poetas que sonharam a Independência do Brasil. Rio de Janeiro. Nova Fronteira, 238p.

Dorr J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil (No. 641-A, pp. A1-A110). US Government Printing Office.

Dussin I.A. & Dussin T.M. 1995. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. Geonomos, 3(1).

Dourado J. C.; Malagutti Filho, W.; Braga, A. C.O. 2001. Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. *Revista Brasileira de Geofísica*, p.14.

Duque T.R.F. 2018. O grupo Itacolomi em sua área tipo: estratigrafia, estrutura e significado tectônico. MS Dissertation, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 102 p.

Endo, I., Castro, P.T.A., Gandini, A.L. 2020. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto, 480 p.

Franzini I. T. 2015. *Identificação de cavidades naturais por meio de eletrorresistividade na região de São Pedro (SP)*, Monografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p.48.

Gamarra R.M. 2020. Drones: guia básico para mapeamento aéreo. Campo Grande, Editora UFMS, 61 p.

Gandolfo O. C. B. 2007. *Um estudo do imageamento geoelétricos na investigação rasa*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.234.

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

Garcia A.J.V. & Uhlein A. 1987. Sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço na região de Diamantina (MG). In: Simpósio sobre Sistemas Deposicionais no Pré-Cambriano. Ouro Preto, p. 113-135.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2009. Geofísica de exploração. Oficina de Textos, São Paulo, 438 p.

Ladeira E.A. & Roeser H.M. P. 1983. Petrography of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Zentralblatt Geologie Palaeontologie, 3/4:430-450.

Lopes T. 2019. *Avaliação do uso de RPA quadrimotor para aplicações de mapeamento*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 128 p.

Medeiros M. C.; Surya L. 2009. A Importância da educação patrimonial para a preservação do patrimônio. XXVI Simpósio Nacional de História. São Paulo, p.9

Netto, C. C. X. A., Souza, A. J. 2010. A importância da cultura material e da Arqueologia na construção da História. História Unisinos, 14(1), 62-76 p.

Rangel, A. P. S. 2005. Aspectos da demografia escrava de Vila Rica – 1755-1815. Anais do I Colóquio do LAHES. Juiz de Fora, 14p.

Redweik P. 2015. Fotogrametria aérea, Universidade de Lisboa, Lisboa, p.38.

Renger, F. 2006. O quinto do ouro no regime tributário nas Minas Gerais. *Revista do Arquivo Público Mineiro*, 42(2), 90-105.

Roeser, H. M. P.; Roeser, P. A. 2010. O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: Aspectos Sobre Sua História, Seus Recursos Minerais E Problemas Ambientais Relacionados. Geonomos, 33-37p.

Silva D. C.; Costa G. C. 2010. Aerofotogrametria em projetos de estradas, III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p.13.

Souza M, B. 1961. A natureza jurídica do quinto do ouro. *Revista da Faculdade de Direito, Universidade de São Paulo*, v 56, p. 299-327.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

Tomasseli A. M. G. 2009. Fotogrametria Básica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, p.14.