

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

Felipe Augusto Nascimento de Jesus

**Caracterização de Sistema de Canalização em Solo Basáltico
através de ERT e GPR: Aplicação em área Agropastoril**

São Paulo
2020

FELIPE AUGUSTO NASCIMENTO DE JESUS

Caracterização de Sistema de Canalização em Solo Basáltico
através de ERT e GPR: Aplicação em área Agropastoril

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Dissertação apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geofísica.
Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani.

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Jesus, Felipe Augusto Nascimento de
Caracterização de Sistema de Canalização em Solo
Basáltico através de ERT e GPR: Aplicação em área
Agropastoril / Felipe Augusto Nascimento de Jesus;
orientador Jorge Luis Porsani. -- São Paulo, 2020.
78p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Geofísica) -- Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo,
2020.

1. Geofísica Aplicada. 2. Geomorfologia. 3.
Canalização em Subsolo. 4. Eletroresistividade. 5.
Radar de Penetração do Solo. I. Porsani, Jorge Luis,
orient. II. Título.

Dedico este trabalho à Preta Augusta (in memoriam) e Piroclasto Augusto (in memoriam).

"De tudo por tudo, sempre valeu a pena!."

- Maria das Graças do Nascimento

Agradecimentos

Os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas, instituições de pesquisa e empresas que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, e em especial agradeço:

Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG), pela oportunidade e apoio para realizar esta pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro e concessão da bolsa de estudos essencial para realização desta pesquisa.

Ao amigo e Prof. Dr. Jorge Luis Porsani (USP), pela sua orientação, apoio, incentivos e oportunidades, que foram fundamentais ao longo de toda a pesquisa.

Ao Departamento de Geofísica do IAG, pelo apoio nos trabalhos de campo, cedendo os equipamentos de aquisição de dados e o veículo para realização das campanhas de aquisição.

A Secretária do Programa de Pós-Graduação do IAG, pela excelência no atendimento aos pós-graduandos.

Aos amigos e técnicos do departamento de Geofísica do IAG, Ernande Costa e Marcelo Stangari, pelas discussões técnicas e não-técnicas, ajuda nas campanhas de aquisição de dados, incentivos e risadas.

Ao amigo e Prof. Dr. Wellington Barbosa da Silva (UNICENTRO), pelas discussões técnicas, fornecimento de dados de sondagem e topografia da área, referências bibliográficas, ajuda nas campanhas de aquisição de dados e pela excelente estadia em sua casa durante a segunda campanha.

Ao Prof. Dr. Renato Luiz Prado (USP), pela leitura crítica do texto e pelas valiosas sugestões, enriquecendo esta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça (USP), pela confiança depositados em mim para auxiliá-lo, como monitor, na condução da disciplina de Inversão de Dados Geofísico.

Aos amigos e geofísicos Vinicius Rafael, Marcelo Caetano e Túlio Bicudo pelas discussões técnicas e não-técnicas e pelas diversas atividades de campo que pude participar junto de vocês.

Ao Grupo da Aplicada pela discussões e sugestões que enriqueceram esta pesquisa.

Ao meu amigo e geofísico Pedro Chibane, pela parceria, discussões técnicas e pela ajuda na formatação da versão final da dissertação.

À Tecnohidro Consultoria e Engenharia Ambiental, representada pelo diretor Dr. Alexandre Maximiano, pelas oportunidades e todos os amigos que lá eu fiz durante o período de realização desta pesquisa.

Ao meu grande amigo e geólogo Guilherme Navarro, pelo incentivo e parceria desde sempre.

Aos meus irmãos, Laisa, Lucas e Ana, que sempre me apoiaram e pelos constantes in-

centivos que me conduziram à buscar a excelência no desenvolvimento desta pesquisa e na vida.

Ao meu avô Milton e minha dinda Anita, que sempre me apoiaram, por serem exemplos e pelos incentivos que me conduziram à buscar a excelência no desenvolvimento desta pesquisa e na vida.

À minha noiva, Bruna da Luz Farias, que compreendeu a importância deste desafio acadêmico e suportou meus nervosismos e ausências, pelo apoio, incentivo e equilíbrio espiritual, fundamentais para a realização desta pesquisa.

Finalmente, eu não poderia deixar de agradecer aos meus pais, Maria das Graças do Nascimento e Christian de Jesus, pelo apoio incondicional, incentivo e suporte financeiro essencial para a realização desta pesquisa e por serem meus exemplos e guias em tudo que busco realizar ao longo da minha vida, incluindo esta pesquisa.

Resumo

JESUS, F. A. N. **Caracterização de Sistema de Canalização em Solo Basáltico através de ERT e GPR: Aplicação em área Agropastoril.** 2020. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Nesta pesquisa foram empregadas a Tomografia Elétrica (*Electrical Resistivity Tomography* – ERT) e o Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR) para caracterizar um sistema de erosão em túneis no solo basáltico, visando estimar a cobertura do solo sobre a estrutura, a distribuição dos canais em subsuperfície e delimitar potenciais áreas para o colapso. A região de estudos localiza-se no município de Candói, estado do Paraná, sul do Brasil, onde foi identificado um sistema de erosão em túneis no subsolo. Esta região tem por característica socioeconômica a predominância de atividades de agricultura e pecuária. O sistema de túneis no subsolo corresponde a uma estrutura associada a um estágio de evolução de processos erosivos do terreno que tendem a aumentar no tempo. O crescimento do sistema de túneis resulta em instabilidade no terreno e na possibilidade de colapso. O evento de colapso deste tipo de estrutura pode ser adiantado por fatores externos, como sobrecarga de máquinas agrícolas e animais que circulam pelo local, o que pode implicar em prejuízos com a perda de maquinários e morte de animais, ou ainda, até mesmo risco à segurança de trabalhadores. De forma geral, os sistemas de erosão em túnel no subsolo são identificados por métodos de superfície que não fornecem parâmetros como forma, distribuição e profundidade. Para o mapeamento e a caracterização dessas estruturas foram adquiridos sete perfis de ERT utilizando o arranjo dipolo-dipolo e vinte e um perfis de GPR com antena de 200 MHz, cobrindo uma área de 900 m². Os resultados foram combinados em um bloco 3D e a análise dos produtos gerados permitiu: i) identificar a distribuição e direção dos canais subterrâneos; ii) delimitar uma área afetada pela presença do sistema de túneis com risco de colapso; iii) estimar o volume de solo erodido e iv) estimar o volume de solo erodível após o eventual colapso da estrutura. Os resultados sugerem a possível identificação de conexões entre os canais secundários e o canal principal do sistema de túneis em subsuperfície.

Palavras-chave: Tomografia Elétrica; Radar de Penetração no Solo; sistema de erosão em túneis; solo basáltico.

Abstract

JESUS, F. A. N. **Soil Pipe System Characterization in Basaltic Soil by ERT and GPR: Farming area Application** 2020. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

In this research, Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Ground Penetrating Radar (GPR) were used to characterize a channeling system in basaltic soil, aiming to estimate the ground cover over the structure, the distribution of the channels in the subsurface and delimit potential areas for collapse. The study region is located in Candói city, Paraná state, southern Brazil, where a soil pipe system was identified. This region has the socio-economic characteristic of farming (agricultural and cattle) activities. The soil pipe system corresponds to a structure associated with a stage of evolution of erosive processes that tend to increase over time. The growth of the soil pipe system results in instability on the ground and the possibility of collapse. The collapse event of this type of structure can be accelerated by external factors, such as overload of agricultural machinery and animals that circulate around the site. The collapse can result in damage due to the loss of machinery and death of animals, or even, even risk to worker safety. In general, soil pipes systems are identified by surface methods that do not provide relevant parameters such as shape, distribution and depth. For the mapping and characterization of these structures were acquired: seven ERT profiles using the dipole-dipole array and twenty-one GPR profiles with a 200 MHz antenna, covering an area of 900 m^2 . The results were combined in a 3D block and the analysis of the generated products allowed: i) to identify the distribution and direction of the underground channels; ii) delimit an area affected by the presence of the soil pipe system at risk of collapse; iii) estimate the volume of eroded soil and iv) estimate the volume of erodible soil after the eventual collapse of the structure. Additionally, the results suggest the possible identification of connections between the secondary channels and the main channel of the subsurface system.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography; Ground Penetrating Radar; soil pipe system; basaltic soil.

Sumário

Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas	vi
1. Introdução e objetivos	1
2. Área de Estudo	5
2.1. Contexto Geológico	5
2.2. Geometria do Alvo	8
2.3. Sondagens	9
3. Fundamentos Teóricos	12
3.1. Erosão em Túneis no Subsolo	12
3.2. Métodos Geofísicos	16
3.2.1 Propriedades Elétricas dos Materiais	17
3.2.2 Método da Eletrorresistividade	18
3.2.3 Método do Radar de Penetração no Solo	21
3.3. Assinatura Geofísica de Cavidades	26
4. Aquisição e Processamento dos dados	29
4.1. Eletrorresistividade	29
4.2. Radar de Penetração no Solo	34
4.3. Modelagem dos dados de Radar de Penetração no Solo	38
4.4. Análise Tridimensional e Estimativa de Solo Erodido	40
5. Resultados e Discussão	41
5.1. Resultados da Eletrorresistividade	41
5.1.1 Seções Geométricas	41
5.1.2 Horizontes Geométricos	46
5.2. Resultados do Radar de Penetração no Solo	49
5.3. Análise Tridimensional	51
6. Conclusões	54
Referências	56
Anexos	62

Lista de Figuras

Figura 1.1:	Máquina agrícola que foi ‘engolida’ pelo solo em uma lavoura de milho na Bahia. Fonte: adaptado de Bertolancini e Popov (2017).	2
Figura 2.1:	Mapa de localização da área de estudo.	5
Figura 2.2:	a) Fotografia destacando o local do estudo e b) modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo destacando a morfologia do terreno com vales em forma de “U”.	6
Figura 2.3:	Fotografias na área de estudo, destacando cristais de calcedônia em blocos segregados em a) e b) e em basalto aflorante em c).	7
Figura 2.4:	a) Fotografia com destaque da variação de coloração do solo. b) Horizontes de acúmulo de óxidos de ferro em contato direto com camadas de material psamítico.	7
Figura 2.5:	a) Fotografia do canal principal com escala. b), c) e d) Fotografias destacando diferentes canais secundários no interior da cavidade.	8
Figura 2.6:	a) Croqui da “entrada” do canal principal. b) Fotografia da “entrada” do canal principal. c) Croqui da “saída” do canal principal. d) Fotografia da “saída” do canal principal.	9
Figura 2.7:	Mapa de localização das sondagens feitas na área de estudo, com destaque em amarelo para as sondagens utilizadas nesta pesquisa.	10
Figura 2.8:	Sondagens T9, T10, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T35 e T36.	11
Figura 3.1:	Evolução da encosta afetada pela presença de erosão em túneis. a) Ocorre a formação incisão erosiva na baixa encosta ao mesmo tempo que fendas verticais e horizontes de migração proporcionam o fluxo de água, nesse momento a subsidência já afeta a encosta. b) Ocorre avanço da erosão na incisão, a subsidência atinge maior proporção e há conexão entre o túnel e a superfície através de estruturas de abatimento. c) Ocorre evolução generalizada na erosão em voçoroca e túneis, estruturas de abatimento atingem maiores dimensões. Fonte: retirado de Camargo (1998).	14
Figura 3.2:	Mecanismos de erosão e formação de túneis em subsolo. Fonte: retirado de Camargo (1998).	15

Figura 3.3:	Fases da evolução de um túnel em subsolo. a) Horizonte com retenção de água. b) Aumento dos poros. c) Aumento de conexão de poros e condutividade hidráulica. d) Aumento vertical do túnel neoformado. e) Expansão lateral. f) Perda de sustentação do teto. g1) Perda de sustentação lateral e rebaixamento da superfície. g2) Perda de materiais do teto. h) Formação de depósitos na base do túnel. i) desabamento completo do teto. Fonte: retirado de Silva (2017).	16
Figura 3.4:	Distribuição de linhas de potencial e corrente em um plano vertical ao longo da linha de eletrodos. Fonte: adaptado de Cook e Van Nosttrand (1954).	19
Figura 3.5:	Arranjo de eletrodos para um Caminhamento Elétrico e a sequência de medições usadas para criar uma pseudo-seção. Fonte: adaptado de Loke (2004)	20
Figura 3.6:	Arranjos convencionais com quatro eletrodos para medir a resistividade em subsuperfície. Fonte: adaptado de Loke (2004).	21
Figura 3.7:	Decaimento exponencial do pulso eletromagnético se propagando em r ao longo do tempo. Fonte: adaptado de Jol (2008).	23
Figura 3.8:	Faixa de frequência transmitida pela antena do GPR. Fonte: adaptado de Davis e Annan (1989).	24
Figura 3.9:	a) resolução do sinal do GPR dividida em duas componentes. b) resolução vertical, em relação a dois alvos alinhados na vertical. c) resolução lateral (ou angular) em relação à dois alvos posicionados lado a lado. Fonte: adaptado de Jol (2008).	24
Figura 3.10:	Principais arranjos utilizados para aquisição de dados de GPR. Fonte: adaptado de Neal (2004).	25
Figura 3.11:	Ilustração esquemática de um perfil GPR. a) perfil de aquisição com arranjo de afastamento comum sobre uma interface de contato de solo-rocha e sobre um alvo de característica pontual. b) radargrama resultante da aquisição em (a). Fonte: adaptado de Jol (2008).	26
Figura 4.1:	Fotografia da aquisição de dados de ERT realizada na segunda campanha de aquisição de dados e destaque para o sistema de aquisição: à esquerda o Elrec Pro (receptor), ao centro o Syscal R2 e um conversor de voltagem (transmissor) e à direita uma bateria de 12 V (fonte).	30
Figura 4.2:	Mapa indicando a disposição de todos os perfis de ERT adquiridos nesta pesquisa.	31
Figura 4.3:	Fluxograma de processamento dos dados de ERT.	32

Figura 4.4:	Exemplo de conjunto de amostras de um perfil de ERT com valores negativos de resistividade aparente destacados em vermelho.	32
Figura 4.5:	Exemplo de conjunto de amostras de um perfil de ERT após a filtração de valores negativos de resistividade aparente.	33
Figura 4.6:	Fotografia da aquisição de dados de GPR realizada na segunda campanha de aquisição de dados e destaque para o módulo de aquisição SIR3000 e para a antena de 200 MHz.	35
Figura 4.7:	Mapa indicando a disposição de todos os perfis de GPR adquiridos nesta pesquisa.	36
Figura 4.8:	Fluxograma de processamento dos dados de GPR.	36
Figura 4.9:	Exemplo do filtro passa-banda aplicado no processamento dos dados após edição. a) Espectro de frequência do radargrama antes da aplicação do filtro. b) Filtro trapezoidal com limites em 100 e 300 MHz. c) Espectro de frequência do radargramas depois da aplicação do filtro trapezoidal.	37
Figura 4.10:	Primeiro modelo simulando meio resistivo ideal para aplicação do GPR.	39
Figura 4.11:	Segundo modelo simulando meio condutivo não ideal para aplicação do GPR.	39
Figura 5.1:	Seções geoeletricas do perfil ERT-2 com espaçamento variável entre os eletrodos. a) 1 m, b) 2 m e c) combinado (1 e 2 m).	42
Figura 5.2:	Seção geoeletrica do perfil de <i>background</i>	43
Figura 5.3:	Seções geoeletricas com espaçamento de eletrodos combinados dos perfis: a) ERT-1, b) ERT-2, c) ERT-3, d) ERT-4, e) ERT-5, f) ERT-6 e g) ERT-7.	44
Figura 5.4:	Estrutura de abatimento próxima à aquisição do perfil ERT-5.	45
Figura 5.5:	Horizontes geoeletricos obtidos a partir da interpolação dos perfis de ERT para diferentes profundidades. a) 1 m, b) 1,25 m, c) 1,5 m, d) 1,75 m, e) 2 m, f) 2,25 m e g) 2,5 m.	46
Figura 5.6:	Horizonte geoeletrico correspondente a profundidade de 0,75 m obtido da interpolação dos perfis ERT georreferenciados com a superposição das sondagens T-18, T-19 e T-36.	47
Figura 5.7:	Horizonte geoeletrico correspondente a profundidade de 1,5 m obtido da interpolação dos perfis ERT georreferenciados com a superposição das sondagens T-18, T-19 e T-36.	48
Figura 5.8:	Horizonte geoeletrico correspondente a profundidade de 2 m obtido da interpolação dos perfis ERT georreferenciados com a superposição das sondagens T-18, T-19 e T-36.	48

Figura 5.9: Limite traçado para área impactada pelo sistema de túneis no subsolo, destacado pela linha tracejada vermelha.	49
Figura 5.10: Radargramas. a) Perfil GPR-1 observado de 200 MHz após a rotina de processamento. b) Perfil GPR sintético de 200 MHz correspondente à simulação de uma cavidade inserida num meio resistivo (ver Figura 4.10). c) Perfil GPR sintético de 200 MHz correspondente à simulação de uma cavidade inserida num meio condutivo (ver Figura 4.11).	50
Figura 5.11: Bloco tridimensional de resistividade resultante da interpolação dos perfis geoeletricos.	52
Figura 5.12: Bloco tridimensional de resistividade resultante da interpolação dos perfis geoeletricos com destaque para a interface correspondente ao isovalor de 600 Ωm	53
Figura 5.13: Bloco tridimensional de resistividade resultante da interpolação dos perfis geoeletricos com destaque para a interface correspondente ao isovalor de 250 Ωm	53

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Variedade de mecanismos causadores de diferentes tipos de <i>pipings</i>	13
Tabela 3.2: Assinatura geofísica de cavidades preenchidas por ar retirada de diversas referências bibliográficas.	18
Tabela 3.3: Assinatura geofísica de cavidades preenchidas por ar retirada de diversas referências bibliográficas.	27
Tabela 4.1: Parâmetros de aquisição dos dados de ERT.	30
Tabela 4.2: Parâmetros de aquisição dos dados de GPR	35

1. Introdução e objetivos

No município de Candói, na porção central do estado Paraná, caracterizado como região predominante agrícola, com mais de 50% da área territorial plantada (IPEADATA, 2020), foram identificadas estruturas reconhecidas como canalizações ou erosões em túneis no subsolo (Camargo, 1998; Silva, 2017), tradução livre do termo *Soil Pipes*. Os túneis são decorrentes de processos erosivos em subsuperfície de regiões de solos de gênese basáltica do Grupo Serra Geral. Correspondem a cavidades com formatos similares ao de túneis enterrados que por vezes são evidenciadas através de estruturas de abatimento e subsidência nos terrenos (Mathias e Silva, 2014).

A erosão do solo não é apenas um processo geomorfológico natural, mas também corresponde à um processo de degradação do solo que pode causar danos ambientais que afetam a vida das pessoas (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018). Os processos erosivos do solo ocorrem em quase todas as regiões do mundo afetando a evolução da paisagem, alterando a hidrologia a estabilidade do terreno e são controlados por vários fatores que incluem: clima; propriedades físicas e químicas do solo; topografia e o uso e ocupação do solo (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018).

A erosão subterrânea do solo, conhecida pelo termo “*piping*”, atua como fonte significativa ou mesmo a principal fonte de transporte de sedimentos (Verachtert et al., 2011). Estimativas de volume de solo erodido por túneis em subsolo e seus respectivos colapsos apresentam taxas médias de perda de solo ao menos uma ordem de magnitude superior a taxas de erosão de processos superficiais. Além disso, a erosão subterrânea pode ser aumentada pela interação com outros processos de erosão, como erosão de ravinas e deslizamentos de terra, e dada a sua significância deve ser considerada ao avaliar as perdas de solo para uma determinada região, com tipos de solo e topografia suscetíveis à ocorrência de túneis em subsolo.

Em regiões agrícolas são encontrados relatos de problemas associados ao colapso de túneis em subsolo antes de 1900 (Fletcher e Harris, 1952). Todavia, mais recentemente no Brasil, foram verificados relatos de donos de propriedades rurais informando que animais de criação e até maquinários foram “engolidos pela terra” (Bertolancini e Popov, 2017). Essas ocorrências estão associadas ao colapso de sistemas de túneis em subsolo que não foram localizados previamente. Os sistemas de túneis em subsolo, através do processo de evolução natural, formam camadas pouco espessa de solo em superfície, que ao serem expostas diante do peso exercido por animais de grande porte ou máquinas agrícolas cedem, conforme exemplo visto na Figura 1.1



Figura 1.1: Máquina agrícola que foi ‘engolida’ pelo solo em uma lavoura de milho na Bahia. Fonte: adaptado de Bertolancini e Popov (2017).

Atualmente a maioria das pesquisas voltadas ao estudo de erosões em túneis no subsolo utiliza métodos de superfície na detecção e caracterização dos canais em subsuperfície (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018), embora os sistemas de túneis ocorram em consequência de processos de erosão subsuperficial. Alguns exemplos de métodos superficiais utilizados são: mapeamento geomorfológico de estruturas de colapso, aerofotogrametria, análise de modelo digital de elevação (MDE), etc.

Métodos de superfície de mapeamento geomorfológico podem subestimar a dimensão dos canais em subsuperfície e, conseqüentemente, subestimar as áreas afetadas pelos sistemas de túneis em subsolo (Holden et al., 2002; Leslie e Heinse, 2013; Bernatek-Jakiel e Kondracka, 2016; Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018). Portanto, a investigação dos túneis em subsolo exige soluções que, através de metodologias aprimoradas, permitam melhores condições de: caracterização geométrica dos canais; identificação de conectividade entre os canais; controle do desenvolvimento do sistema de túneis em subsolo e detecção de áreas afetadas.

Ao longo dos anos a Geofísica vem contribuindo na detecção de cavidades em subsuperfície, consagrando-se entre as melhores ferramentas de localização deste tipo de estrutura (Cardarelli et al., 2006). Historicamente, o uso da Geofísica Aplicada na detecção de cavidades (naturais ou artificiais) ganhou destaque através dos métodos de Sísmica de Reflexão (Cook, 1965), Eletroresistividade (Miltzer et al., 1979), Gravimetria (Butler, 1984) e Radar de Penetração no Solo (Benson, 1995), dentre outros. Entretanto, a aplicação de métodos geofísicos na localização, caracterização e monitoramento de sistemas de erosão em túneis no subsolo permanecem em estado experimental devido à escassez de pesquisa nessa temática (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018).

Os métodos geofísicos aplicados na investigação de cavidades baseiam-se no contraste das propriedades físicas das cavidades e do meio no qual essas se encontram. No trabalho feito por Greenfield (1979), o autor abordou os princípios e as limitações dos métodos geofísicos na localização de cavidades, discutindo sobre a dificuldade de alguns métodos localizarem os alvos devido as assinaturas anômalas dos alvos estarem situadas na ordem de grandeza de ruído do sinal. O autor associa a falta de contraste da assinatura geofísica do alvo às dimensões das cavidades investigadas e da capacidade de detecção dos equipamentos.

Em consequência da heterogeneidade dos terrenos onde se localizam as cavidades e a própria complexidade do alvo (preenchimento, formato, profundidade, etc.) não existe uma abordagem única que indique qual método geofísico é o mais adequado para a detecção (Butler, 1984; Dourado et al., 2001). Todavia, diversos estudos têm mostrado que a integração de mais de um método geofísico torna-se uma boa solução para localizar e caracterizar cavidades (Dourado et al., 2001; El-Qady et al., 2005; Şeren et al., 2012; Orlando, 2013; Bernatek-Jakiel e Kondracka, 2016).

O uso de mais de um método geofísico para solucionar problemas de ambiguidade, no âmbito de localização e caracterização de cavidades, é apoiado pela discussão feita por Schrott e Sass (2008), onde os autores sugerem a combinação de até três métodos para melhores interpretações. Dentre os exemplos encontrados de aplicação da Geofísica Aplicada em pesquisas de investigação de sistemas de erosão em túneis no subsolo podem ser citados os trabalhos de Holden et al. (2002), Holden (2004), Leslie e Heinse (2013) e Bernatek-Jakiel e Kondracka (2016).

Holden et al. (2002) verificaram que o Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar - GPR*) mostrou bons resultados para antenas de 100 MHz e 200 MHz na detecção de túneis em subsolo. Segundo os autores, o menor alvo identificado possuía 0,09 m de diâmetro e as profundidades estimadas para os alvos mais profundos, com cerca de 2 m, apresentaram incertezas inferiores a 0,3 m. Além disso, através dos resultados, os autores verificaram uma densidade de canais superior a estimada inicialmente através de técnicas de mapeamento superficial. Holden (2004) utilizou o GPR, de forma bem-sucedida, para determinar indiretamente a conectividade entre os canais de um sistema de erosão em túneis no subsolo. Segundo o autor, além da conectividade foi possível estimar o diâmetro dos canais preenchidos por água.

Leslie e Heinse (2013), utilizando a Eletroresistividade (ER), através da técnica de Tomografia Elétrica (*Electrical Resistivity Tomography - ERT*), caracterizaram a distribuição espacial e a conectividade dos túneis em subsolo de 0,04 m de diâmetro em uma encosta localizada na floresta experimental da Universidade de Idaho, Estados Unidos. Os autores montaram um bloco tridimensional a partir de seções geoeletricas adquiridas com espaçamentos entre eletrodos de 0,22 m e 1 m. No entanto, a falta de contraste entre os canais e a camada subjacente em conjunto com a pouca cobertura de dados nas proximidades de

canais maiores limitaram a caracterização efetiva dos alvos. Ao final, os autores concluíram que o uso da ERT seria adequado para detectar túneis de maior porte em meios com maior contraste de resistividade.

Bernatek-Jakiel e Kondracka (2016) combinaram técnicas de mapeamento geomorfológico com ERT e GPR para caracterizar sistemas de túneis em subsolo nas áreas montanhosas do sudeste da Polônia. Segundo os autores, os dados de GPR sugeriram uma densidade de canais, superior à quantidade estimada inicialmente pelas técnicas superficiais, e através dos dados de ERT verificaram que os túneis na área de estudo, correspondentes as zonas de alta resistividade, se desenvolveram no contato entre o solo e o leito rochoso. Ao final, os autores concluíram que a integração dos métodos geofísicos teve papel importante para estabelecer a densidade e a distribuição do sistema de túneis, detectar a região de ocorrência dos processos erosivos responsáveis pela formação dos canais e reconhecer a estrutura interna dos materiais subjacentes ao sistema de túneis.

No caso de acidentes envolvendo colapso de túneis em subsolo em regiões agrícolas, assim como Candói, a detecção e isolamento de áreas afetadas pelo sistema de túneis, através de estudos geofísicos de reconhecimento e caracterização dos canais em subsolo, podem reduzir os riscos de acidentes perigosos envolvendo animais e maquinários de grande porte. O sistema de túneis no subsolo, verificado na área de estudo deste trabalho, apresenta feições de estágios de evolução intermediário, avançado e final, correspondentes a zonas de subsidência, abatimento do teto e voçoroca, respectivamente. No interior do sistema, foram verificados canais secundários e partições do canal principal inacessíveis, o que impossibilitava a determinação de suas respectivas extensões e dimensões.

Neste sentido, a presente pesquisa teve como objetivo mapear e caracterizar o sistema de túneis em subsolo encontrado em Candói, bem como delimitar áreas afetadas pela presença deste, através da integração da ERT e do GPR. Especificamente, buscou-se identificar a presença de possíveis canais secundários não rastreados em observações de campo e determinar a geometria do sistema de túneis, incluindo: profundidade dos canais; extensão dos canais; direção de cada canal identificado e diâmetro aproximado de cada canal. Além da caracterização, buscou-se quantificar o volume de solo perdido em função do sistema de túneis em subsolo e estimar o potencial volume de erosão de solo após um eventual colapso da estrutura.

2. Área de Estudo

A área de estudo está localizada a 4 km da rodovia PR-277, em setor de baixa encosta à margem esquerda do rio Boca Apertada, afluente do rio Cavernoso, na zona rural do município de Candó, região Centro Sul do estado do Paraná (Figura 2.1).

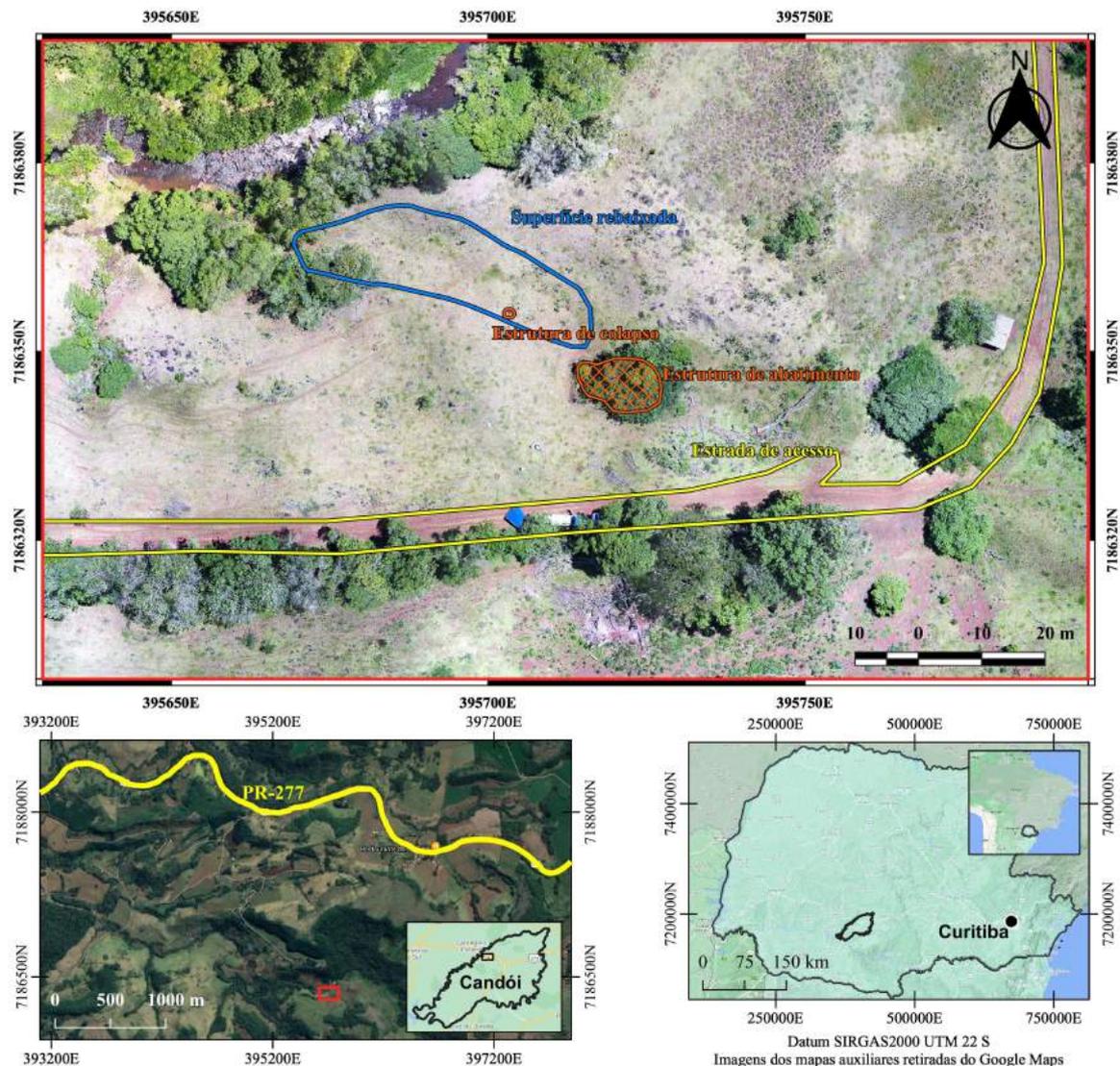


Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo.

2.1. Contexto Geológico

A região é dominada por morros e serras baixas com declividades que variam entre 15 e 35°, sendo caracterizada predominantemente por rochas extrusivas do tipo basalto com aspecto maciço e intensamente fraturadas do Grupo Serra Geral, Bacia Sedimentar do Paraná, com idades entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior (Arioli e Licht, 2006).

No terreno predominam topos alongados e isolados, vertentes convexas e convexo-côncavas e vales em “U” aberto (Figura 2.2). Associados aos vales notam-se a ocorrência de erosão laminar associada à exposição de blocos rochosos e pontos de erosão linear decorrentes da passagem de gado.

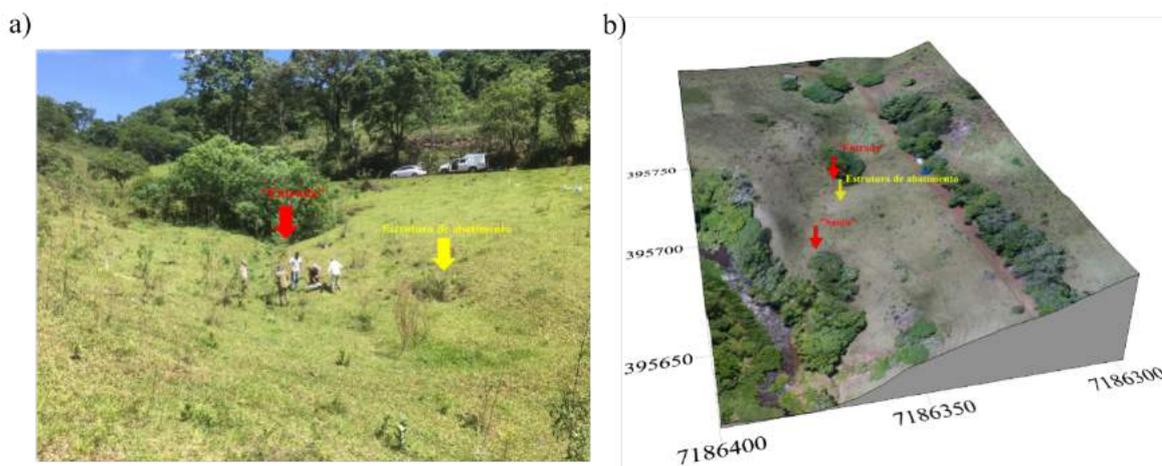


Figura 2.2: a) Fotografia destacando o local do estudo e b) modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo destacando a morfologia do terreno com vales em forma de “U”.

Na área são encontrados basaltos toleíticos com estrutura amigdaloidal, de matriz afa-nítica para fanerítica, coloração mesocrática e muito intemperizada, com presença de feno-cristais de quartzo e amígdalas preenchidas por calcedônia, ambos com maior resistência ao intemperismo (Figura 2.3).

A descrição dos afloramentos é compatível com as características do Membro Foz do Areia pertencente a Formação Candói, associados à derrames tabulares espessos de basalto fanerítico cinza, sem evidências de hidrotermalismo pervasivo, zona vesicular de topo del-gada e descontínua, com preenchimentos de quartzo, calcita e zeólita, disjunção colunar e entablamento sigmoidal bem desenvolvidos, com níveis de brecha hidrovolcanoclástica so-mente na base da sequência (Arioli e Licht, 2014).

Devido a ação do intemperismo na rocha de característica básica (com minerais como olivina, piroxênio e feldspato plagioclásio) são encontrados solos argilosos com elevado con-teúdo em óxidos e hidróxidos de ferro (Tremocoldi, 2003).

O solo é caracterizado como cambissolo com pedogênese relacionada a ciclos alterna-dos de umedecimento e secagem (Mascarello e Camargo Filho, 2006; Silva, 2017). Possui textura que varia de arenosa à argilosa de forma gradativa e por intercalações. Apresenta co-loração vermelha-acastanhada que varia para acinzentada conforme maior proximidade da rocha fonte (Figura 2.4a).

Adicionalmente, Silva (2017) descreve a ocorrência de horizontes de acúmulo de óxidos de ferro em contato abrupto com camadas de material psamítico, ou seja, um solo arenoso

com dificuldade de retenção de umidade ao longo da encosta (Figura 2.4a).



Figura 2.3: Fotografias na área de estudo, destacando cristais de calcedônia em blocos segregados em a) e b) e em basalto aflorante em c).



Figura 2.4: a) Fotografia com destaque da variação de coloração do solo. b) Horizontes de acúmulo de óxidos de ferro em contato direto com camadas de material psamítico.

2.2. Geometria do Alvo

Na área de estudo são verificadas estruturas de abatimento e uma voçoroca que expõe o canal principal e os canais secundários do sistema de erosão em túneis no solo (Figura 2.5). Mathias e Silva (2014) descreveram os canais secundários como feições que aparecem em sentido transversal ou mesmo sentido ao canal principal, formados posteriormente.



Figura 2.5: a) Fotografia do canal principal com escala. b), c) e d) Fotografias destacando diferentes canais secundários no interior da cavidade.

Em atividade de campo foram coletadas medidas referentes à altura, largura e profundidade das porções expostas do canal principal do sistema de túneis em subsolo, chamadas de “entrada” e “saída” em referência ao fluxo de água por meio dos canais. A partir das medidas descritas, foi desenhado um croqui para referência (Figura 2.6).

A distância entre topo e base da “entrada” é de 1,30 m. A distância de uma parede à outra, isto é, a largura é de 1,40 m. A espessura da cobertura de solo, isto é, a distância entre o ponto superficial projetado sobre o meio do canal (em relação à horizontal) e topo da face exposta é de 1,70 m.

Na “saída” do túnel, a distância entre topo e base não foi delimitada devido a presença de uma lâmina d’água, entretanto foi feita a medida da lâmina d’água até o teto da face exposta,

a altura resultante dessa medida foi de 1,00 m. A espessura da cobertura de solo é de 1,20 m e a largura de 0,30 m.

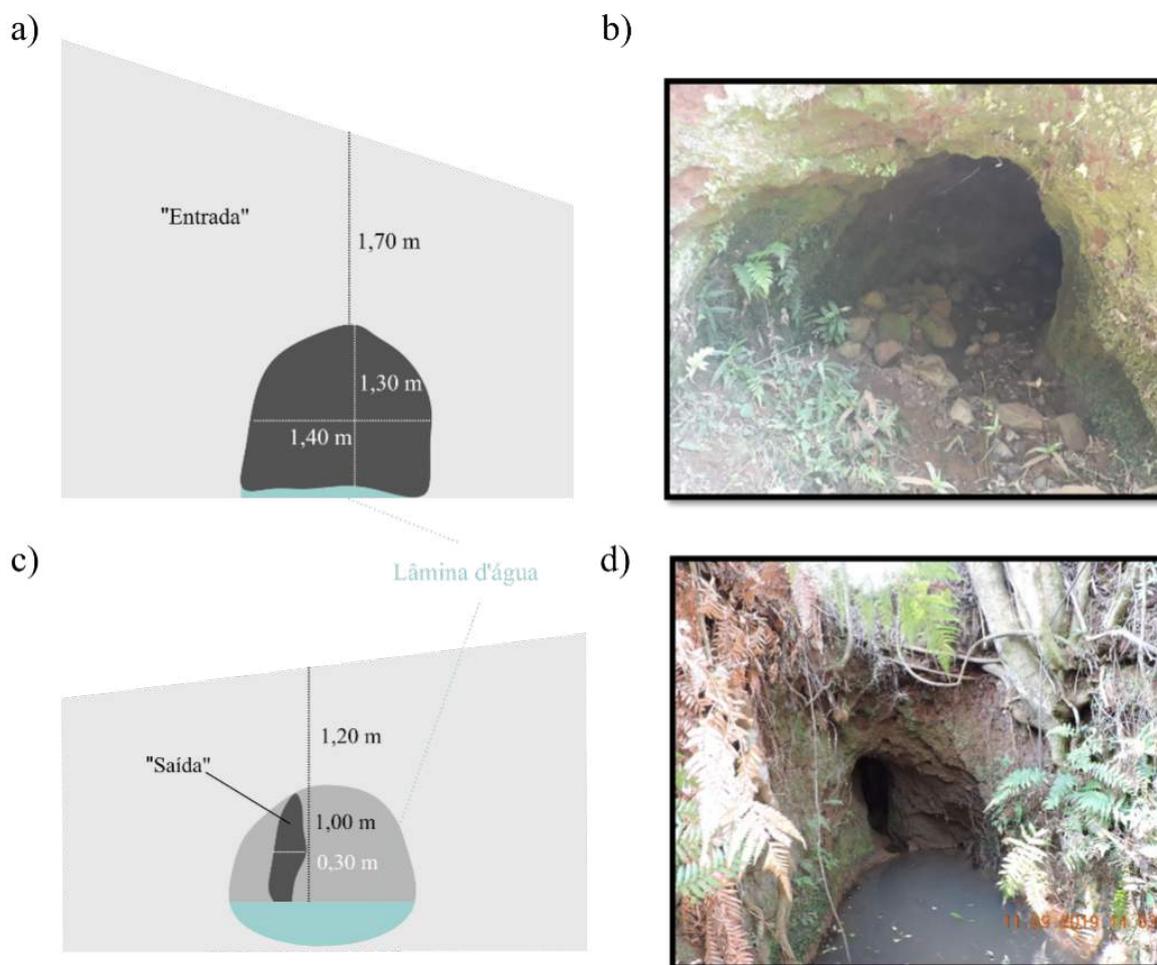


Figura 2.6: a) Croqui da “entrada” do canal principal. b) Fotografia da “entrada” do canal principal. c) Croqui da “saída” do canal principal. d) Fotografia da “saída” do canal principal.

2.3. Sondagens

Na área de estudo foi localizada uma malha de sondagens (Figura 2.7), realizadas no trabalho de Silva (2017), da qual foram selecionadas as sondagens T9, T10, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T35 e T36, apresentadas na Figura ??, devido à proximidade ou sobreposição com a malha de aquisição dos dados geofísicos. Abaixo, são apresentadas as principais descrições de cada sondagem, adaptadas a partir do trabalho de Silva (2017), que podem ser consultadas com mais detalhe nos 6.

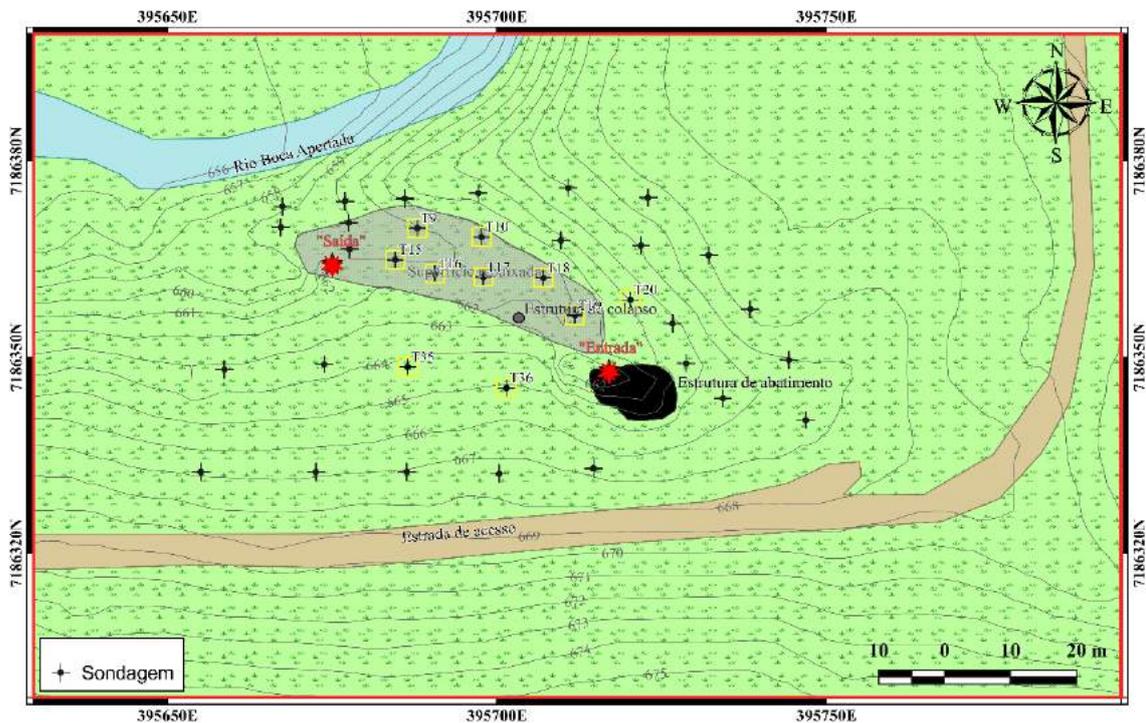


Figura 2.7: Mapa de localização das sondagens feitas na área de estudo, com destaque em amarelo para as sondagens utilizadas nesta pesquisa.

A sondagem T9 possui 2,45 m e nela, por quase todo perfil amostrado, foram encontrados materiais grosseiros heterogêneos, com clastos variando dos tamanhos grânulos a calhaus. Entre 1,32 a 1,56 m de profundidade, foi identificada a linha de pedra. Na sondagem T10, com profundidade de 1,20 m, foram encontrados acúmulos de seixos e grânulos. Todo esse material foi encontrado misturado a materiais argilosos.

A sondagem T15, com 0,60 m de profundidade, apresentou materiais com texturas grosseiras espalhadas em matriz areno-argilosa no topo que gradam para texturas mais finas com seixos espalhados. Na sondagem T16, com profundidade de 0,50 m, foram identificados materiais grosseiros, similar ao identificado na T15.

A sondagem T17 com 0,72 m de profundidade, apresentou materiais grosseiros em sua parte superior e materiais de texturas mais finas nas subdivisões em maior profundidade. Na sondagem T18, com 0,84 m de profundidade, foi verificada textura areno-argilosa com raízes em sua parte superior e grânulos no restante do perfil. Já a sondagem T19, com 0,68 m de profundidade, apresentou material grosseiro por todo o perfil, com a presença de duas linhas de pedra.

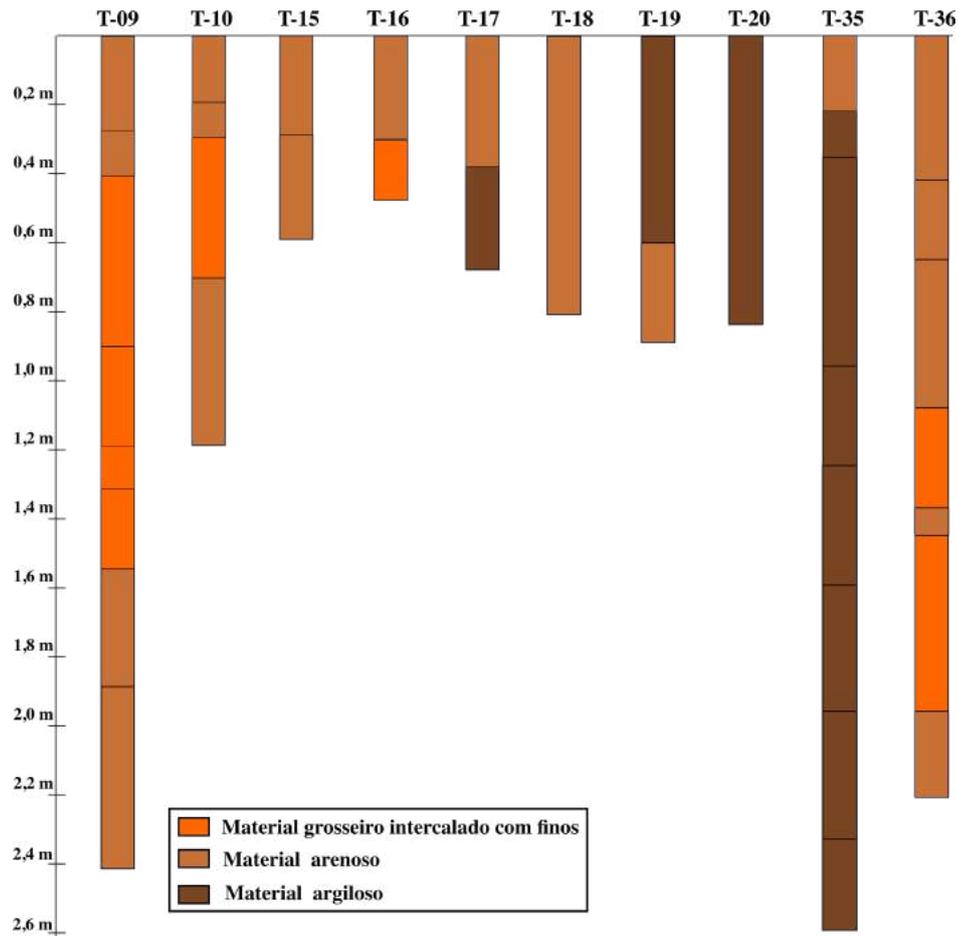


Figura 2.8: Sondagens T9, T10, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T35 e T36.

A sondagem T20, com 1,10 m de profundidade, apresentou material grosseiro por todo o perfil, com a identificação de duas linhas de pedra, similar ao observado na sondagem T19. Na sondagem T35, com profundidade de 2,61 m, foram identificados materiais de textura grosseira em matriz argilo-arenosa.

A sondagem T36, com 2,21 m de profundidade, apresentou material com textura areno-argilosa nas porções superiores. Entre 0,65 e 1,37 m, foram identificados fragmentos de quartzo do tamanho de seixos e linhas de pedra com matriz argilosa. Entre 1,45 m e 1,96 m, foram novamente identificadas linhas de pedra em matriz argilosa.

3. Fundamentos Teóricos

Neste item são apresentados os conceitos teóricos utilizados como base para o desenvolvimento desta pesquisa. Os conceitos são apresentados através de três sub-itens que contemplam uma revisão bibliográfica a respeito da temática de Erosão em Túneis, Métodos Geofísicos e Assinatura Geofísica de Cavidades.

3.1. Erosão em Túneis no Subsolo

Erosão em túneis no subsolo, ou “*Soil Pipes*” (Canalizações em solo), são cavidades lineares formadas por processos erosivos associados ao fluxo de água em solos ou depósitos não consolidados (Jones, 2004). A evolução deste tipo de estrutura está atrelada ao processo erosivo “*Piping*”, descrito no trabalho de Fletcher e Harris (1952), onde o autor aponta para cinco condições essenciais para a presença deste tipo de erosão:

- Necessidade de uma fonte de água;
- Taxa de infiltração deve exceder a permeabilidade das camadas em subsolo;
- Presença de camada suscetível à erosão acima de uma camada resistente a esse processo;
- Água acima da camada resistente deve estar sob ação de um gradiente hidráulico;
- Zona de escape para o fluxo de água.

Os mesmos apontamentos feitos por Fletcher e Harris (1952) são descritos de forma concisa por Jones (2004), ao descrever fatores essenciais para a ocorrência das erosões em túneis:

- Suprimento de água suficiente para gerar tensão nos poros das camadas infiltradas;
- Gradiente hidráulico acentuado.

Com relação ao desenvolvimento dos túneis em subsolo, segundo Jones (2004), este está atrelado a dois processos. O primeiro processo está associado à força produzida pela infiltração da água. Essa força precisa ser suficiente para transportar uma parcela do material do estrato infiltrado até o ponto de descarga, que pode ser em uma encosta de uma colina, a face de um penhasco, ou a margem de um rio (como é no caso da área de estudo desta pesquisa) formando um túnel. O segundo processo envolve a expansão progressiva do túnel formado (também chamado de conduto) através da tensão exercida pela água corrente.

Entretanto, relatos de ocorrências desses canais em quase todas as regiões do mundo demonstram que não há um único conjunto de fatores iniciais e de desenvolvimento associado

à origem e evolução dessas estruturas. Abaixo, a Tabela 3.1, retirada do trabalho de Pierson (1983), apresenta alternativas para os principais mecanismos formadores de “*Soil Pipes*”.

Tabela 3.1: Variedade de mecanismos causadores de diferentes tipos de *pipings*.

Mecanismo de formação dos túneis em subsolo	Fonte bibliográfica
Erosão fluvial subsuperficial retrogressiva promovida por infiltração concentrada com gradiente hidráulico íngreme e baixa força agregada do solo.	Fletcher et al. (1954); Krynine et al. (1957); Zaslavsky e Kassiff (1965); Berry (1970); Jones (1971)
Rachadura por dissecação do perfil do solo superior, seguido de alargamento no fundo das fissuras por erosão fluvial.	Jones (1971); Newson (1976); Laffan e Cutler (1977); Bryan et al. (1978); Rodda (1978)
Penetração do solo por raízes crescentes que, após a morte e deterioração, deixam a passagem tubular aberta.	Lutz e Griswold (1939); Hursh e Hoover (1942); Reeve e Kirkham (1951); Gaiser (1952); Hoover (1962); Whipkey (1965); Aubertin (1971); Chamberlin (1972); Beasley (1976); De Vries e Chow (1978)
Ação de vermes, insetos e pequenos mamíferos.	Anthony (1916); Ellison (1946); Hoover (1962); Whipkey (1965); Aubertin (1971); Price (1971); Beasley (1976); Newson (1976); Lundgren (1978); Rodda (1978); Thorn (1978)

Fonte: retirado de Pierson (1983).

Devido as particularidades nas formações das túneis associadas ao ambiente de ocorrência e mecanismos de formação e desenvolvimento, foram verificadas as características específicas dos canais na área de estudo através da revisão dos trabalhos de Camargo (1998), Mathias e Silva (2014) e Silva (2017).

Camargo (1998), em seu trabalho sobre a ocorrência de erosões em túneis no Estado do Paraná, descreve em detalhes sua evolução e associando-as ao aparecimento de estruturas de abatimento ao longo dos canais subsuperficiais e a instalação de voçorocas em encostas

(Figura 3.1). A autora categoriza três estágios de evolução de sistemas encontrados em partes baixas de encostas na região central do Paraná: subsidência do teto do túnel (intermediário); estrutura de abatimento (avançado); incisão com formação de sulcos, ravinas ou voçorocas (final).

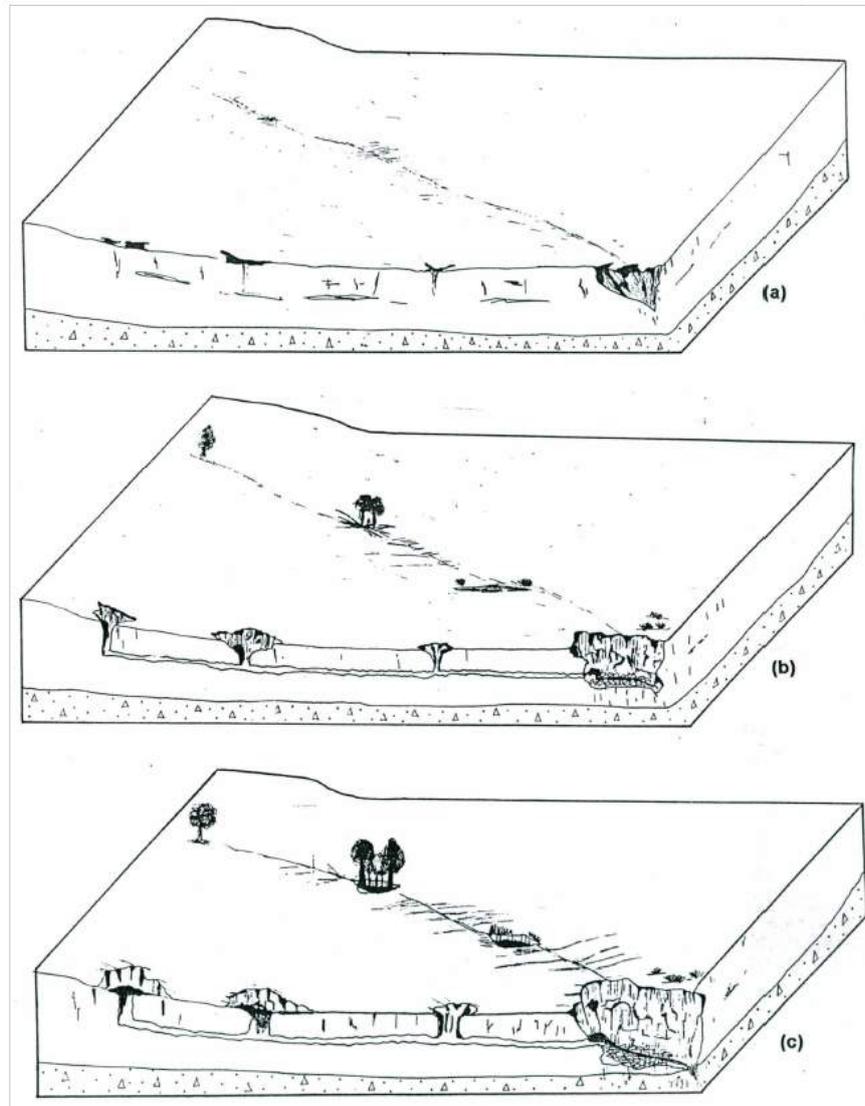


Figura 3.1: Evolução da encosta afetada pela presença de erosão em túneis. a) Ocorre a formação incisão erosiva na baixa encosta ao mesmo tempo que fendas verticais e horizontes de migração proporcionam o fluxo de água, nesse momento a subsidência já afeta a encosta. b) Ocorre avanço da erosão na incisão, a subsidência atinge maior proporção e há conexão entre o túnel e a superfície através de estruturas de abatimento. c) Ocorre evolução generalizada na erosão em voçoroca e túneis, estruturas de abatimento atingem maiores dimensões. Fonte: retirado de Camargo (1998).

Camargo (1998) também explica que a evolução dessas feições ocorre em consequência do fluxo constante de água que resulta na infiltração e posterior exfiltração de água nas faces expostas nas paredes e no teto do túnel (Figura 3.2). Com o aumento da quantidade

de água exfiltrada, ocorre aceleração do processo erosivo de expulsão de sedimentos mais finos. A expulsão de sedimentos finos implica em poros maiores e cada vez mais conectados, implicando no aumento da permeabilidade e originando um processo de expansão lateral.

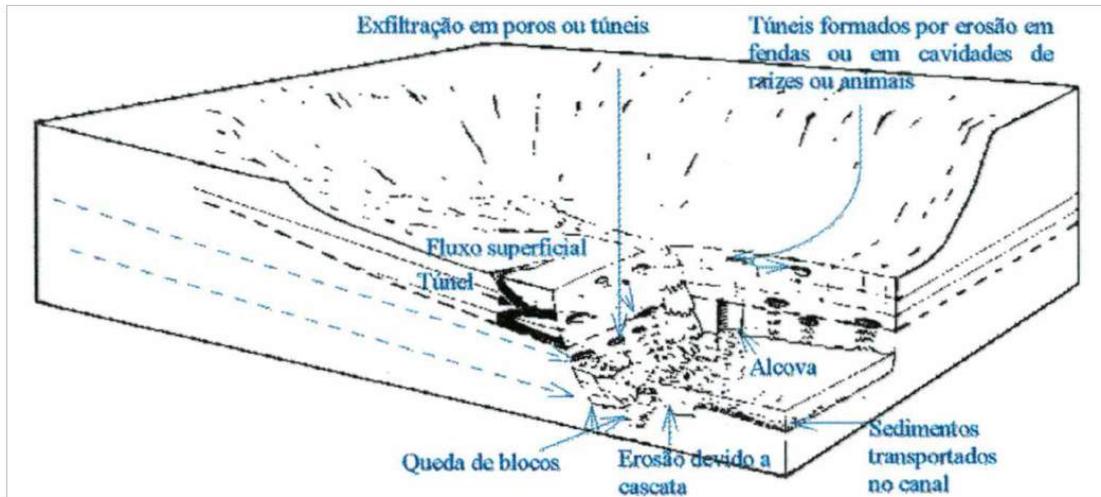


Figura 3.2: Mecanismos de erosão e formação de túneis em subsolo. Fonte: retirado de Camargo (1998).

Na ocorrência de erosões em túneis no subsolo em Candói, os canais se originam através da infiltração de água em estratos porosos presentes na subsuperfície, conhecido como mecanismo de “*seepage*”, e evoluem ao longo do tempo até o colapso do teto dessa estrutura (Mathias e Silva, 2014). Mathias e Silva (2014) apontam dois mecanismos associados com a gênese e a evolução dos túneis em subsolo da área de estudo:

- Erosão por percolação de fluídos, causada pela infiltração de água no sistema;
- Alargamento de macroporos através da aplicação de tensões cisalhantes em suas paredes.

A Figura 3.3 detalha as fases de evolução de um *pipe*. Inicialmente o canal secundário apresenta geometria arredondada tendo sua base erodida constantemente até se tornar um vale em “V” em sua fase intermediária. Ao final do processo de evolução ocorre a formação de um arco no teto. Durante a evolução e ao longo de sua existência, os canais secundários promovem a entrada extra de água no sistema de túneis e acelerando o processo de erosão até os estágios de subsidência, abatimento e incisão (Jones, 1987; Camargo, 1998; Silva, 2017; Bernatek-Jakiel et al., 2019).

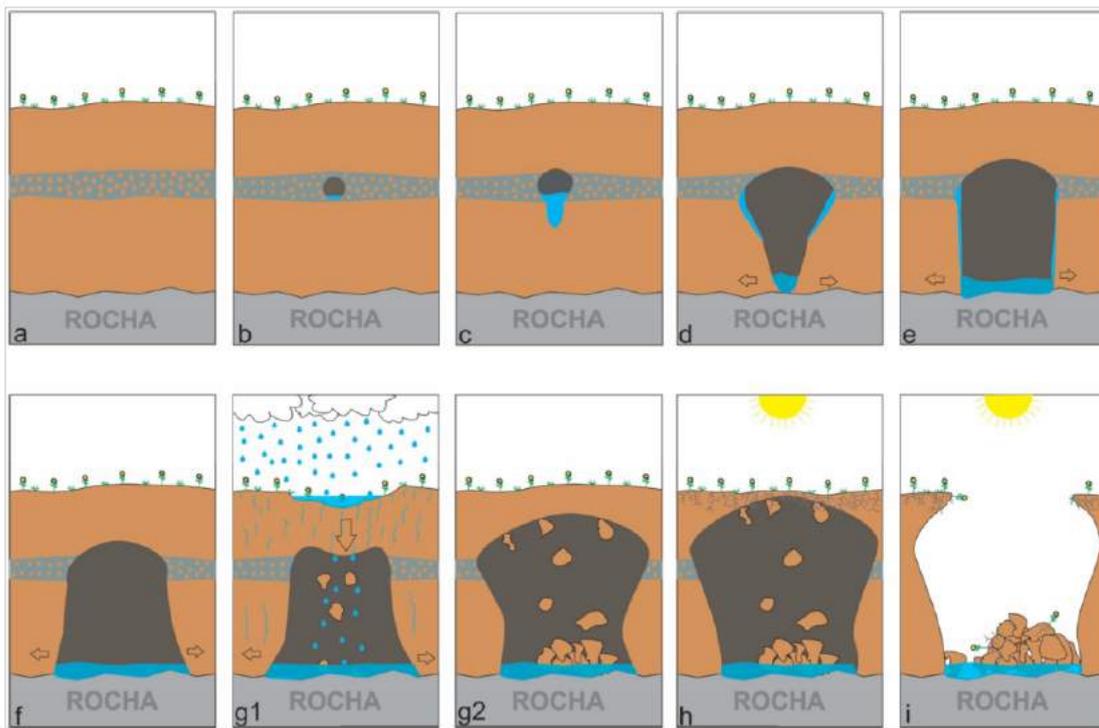


Figura 3.3: Fases da evolução de um túnel em subsolo. a) Horizonte com retenção de água. b) Aumento dos poros. c) Aumento de conexão de poros e condutividade hidráulica. d) Aumento vertical do túnel neoformado. e) Expansão lateral. f) Perda de sustentação do teto. g1) Perda de sustentação lateral e rebaixamento da superfície. g2) Perda de materiais do teto. h) Formação de depósitos na base do túnel. i) desabamento completo do teto. Fonte: retirado de Silva (2017).

3.2. Métodos Geofísicos

Nesta pesquisa foram empregados os métodos geofísicos: Eletrorresistividade (ER) e Radar de Penetração no Solo (GPR) com o objetivo de mapear e caracterizar túneis em sub-superfície no município de Candói, estado do Paraná. Portanto, neste capítulo são revisados os conceitos históricos e fundamentos teóricos de cada um dos métodos.

O método de ER tem sido utilizado há mais de um século para exploração de recursos naturais, incluindo mineração, exploração de petróleo e exploração geotérmica (Telford et al., 1990; Burger et al., 2006). A ER também tem sido usado para detecção e mapeamento de geologia superficial, zona de falhas, túneis, cavidades, plumas contaminantes e vazios em terrenos cársticos (Butler, 2005). Há registros na literatura de estudos abordando a localização de cavidades utilizando o ER datados de 1944 (Burger et al., 2006).

O método de GPR é um método geofísico relativamente novo. A história do GPR está entrelaçada com as diversas aplicações do método (Annan, 2002). O GPR tem o conjunto mais abrangente de aplicações de qualquer método geofísico. Como resultado, as escalas espaciais de aplicações e a diversidade de configurações de instrumentos são extensas. Inicialmente, o

GPR foi desenvolvido para prospecções em terrenos glaciais e passou a ser aplicado em solo a partir da década de 60 (Burger et al., 2006). Até hoje, a maioria das aplicações tem sido em materiais geológicos, e tem seu uso generalizado em ambientes antrópicos, como concreto, asfalto e outros materiais de construção (Annan, 2002).

Tanto a ER quanto o GPR estão inseridos na categoria de métodos geoeletricos artificiais (Braga, 2016). Ambos dependem das heterogeneidades nas propriedades físicas dos materiais em subsuperfície, mais especificamente, as propriedades elétricas: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

3.2.1. Propriedades Elétricas dos Materiais

As propriedades que definem o comportamento eletromagnético dos materiais geológicos são: condutividade elétrica σ ou sua inversa, resistividade elétrica ρ , permissividade dielétrica ε e permeabilidade magnética μ (BUTLER, 2005; LIMA, 2014). A partir das relações constitutivas (Equação 1, 3 e 5), são verificados os significados físicos de cada uma das propriedades citadas e suas relações com campos externos aplicados.

A permissividade dielétrica ε (Farads por metro – Fm) indica a proporção entre intensidade de campo elétrico externo \mathbf{E} e o deslocamento de corrente elétrica \mathbf{D} (Equação 1). Descreve a capacidade de um material armazenar carga elétrica e o seu grau de polarização sob influência de um campo elétrico. Para aquisições com GPR são utilizados valores adimensionais relativos ε_r (Equação 2), ou seja, em função da permissividade dielétrica do vácuo ε_0 ($8,89 \times 10^{-12}$).

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 \quad (2)$$

A condutividade elétrica σ (Siemens por metro – Sm) indica a proporção entre densidade de corrente \mathbf{J} e intensidade de campo elétrico \mathbf{E} (Equação 3). Descreve a capacidade de um material permitir a passagem de cargas elétricas através dele mesmo. Pode ser descrita como o inverso da resistividade ρ (Ohms por metro – Ωm) (Equação 4), ou seja, a capacidade de um material resistir a passagem de carga elétrica por ele mesmo. De todas as propriedades físicas dos materiais geológicos, a condutividade ou a resistividade, são as que possuem maior variabilidade, cobrindo cerca de 25 ordens de grandeza ao longo de sua variação.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\rho = 1 / \sigma \quad (4)$$

A permeabilidade magnética μ (Henrys por metro – H/m) representa a proporção entre intensidade de fluxo magnético \mathbf{B} e o campo magnético induzido \mathbf{H} (Equação 5). Descreve a orientação dos momentos magnéticos dos materiais geológicos. Para aquisições com GPR são utilizados valores adimensionais relativos μ_r (Equação 6), ou seja, em função da permeabilidade magnética do vácuo μ_0 ($1,26 \times 10^{-6}$).

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (5)$$

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad (6)$$

Devido a maioria dos materiais não possuir fortes assinaturas magnéticas, a permeabilidade magnética do meio é aproximada para o valor da permeabilidade magnética do vácuo, desta forma o valor da permeabilidade relativa é aproximado para 1.

Portanto, em suma, a condutividade elétrica (ou resistividade elétrica) expressa a facilidade do transporte de cargas elétricas livres por meio de um material. A permissividade dielétrica expressa a facilidade de polarização do material sob ação de um campo elétrico externo. Já a permeabilidade magnética expressa a facilidade com que um material é polarizado magneticamente sob ação de um campo magnético externo. A Tabela 3.2 apresenta valores dessas propriedades físicas comumente encontrados em alguns materiais geológicos.

Tabela 3.2: Assinatura geofísica de cavidades preenchidas por ar retirada de diversas referências bibliográficas.

Material/Propriedade física	ρ	ε_r
Ar	1×10^6	1
Água doce	10-100	81
Argila seca	100	7
Argila úmida	1	43
Solo seco (arenoso)	200	4
Solo úmido (arenoso)	10	30
Basalto	4×10^4	12

Fonte: adaptado de (Telford et al., 1990).

3.2.2. Método da Eletrorresistividade

No método de ER, uma corrente alternada de baixa frequência, tipicamente de 0,03 Hz a 3,0 Hz (Ward, 1990), é aplicada à terra por meio de um par de eletrodos transmissores, também chamados de eletrodos de corrente C_1 e C_2 , e uma diferença de potencial é medida na superfície entre um par separado de eletrodos receptores (Telford et al., 1990; Butler,

2005; Burger et al., 2006; Kearey et al., 2009), também chamados de eletrodos de potencial P_1 e P_2 (Figura 3.4). As variações nas diferenças de potencial esperadas para um meio homogêneo fornecem informações sobre as heterogeneidades das propriedades elétricas em subsuperfície (Telford et al., 1990; Kearey et al., 2009).

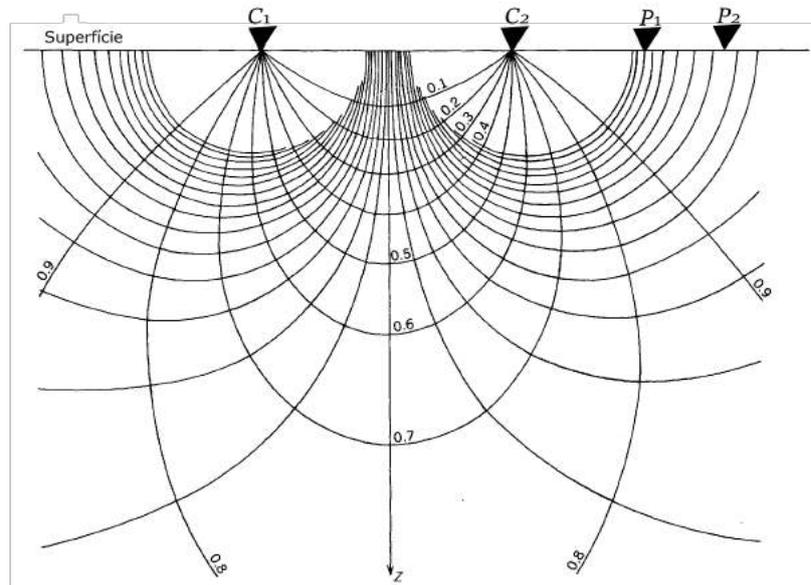


Figura 3.4: Distribuição de linhas de potencial e corrente em um plano vertical ao longo da linha de eletrodos. Fonte: adaptado de Cook e Van Nostrand (1954).

Nos materiais geológicos, a corrente elétrica se propaga através de três processos de condução: eletrônica, eletrolítica e dielétrica (Telford et al., 1990). Na condução eletrônica, a corrente flui pelo movimento de elétrons num meio condutor. Na condução eletrolítica, a corrente flui por meio do movimento de íons livres em meio líquido dirigidos por campos elétricos externos. Na condução dielétrica, a corrente flui pelo processo de polarização dielétrica, i.e., o deslocamento dos elétrons em relação aos núcleos dos átomos, em semicondutores ou materiais que não sejam totalmente isolantes sob a influência de um campo elétrico variável externo.

Os valores de potencial medidos podem ser convertidos em resistividade elétrica a partir do controle da disposição espacial dos eletrodos através da reformulação da Lei de Ohm em termos do arranjo de eletrodos (Koefoed et al., 1979), conforme descreve a Equação 7. Onde k é denominado como fator geométrico e depende da separação e disposição de eletrodos escolhidas na tomada de medidas, ΔV é a diferença de potencial entre P_1 e P_2 e I é a corrente injetada através de C_1 e C_2 .

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (7)$$

O conceito de resistividade aparente é referente aos valores de diferença de potencial

obtidos para a média das camadas presentes em subsuperfície no intervalo de profundidade medido, apresentado em pseudo-seções. Os valores de resistividade aparente devem ser posteriormente convertidos em valores de resistividade para o modelo quantitativo de camadas em subsuperfície, em seções geoeletricas. Essa conversão é feita através da inversão de dados, ou seja, obtenção de um modelo matemático cuja a curva de medidas se ajusta aos dados observados em campo. A inversão tem como objetivo recuperar a distribuição das propriedades físicas do meio que deram origem ao sinal medido (Butler, 2005). Assim, o modelo que produz uma curva ajustada as medidas observadas é assumido como o modelo mais acurado de representação das camadas em subsuperfície (Loke e Barker, 1996).

A profundidade de investigação do método depende do meio e da separação dos eletrodos. As maiores profundidades são investigadas quando se aumenta a extensão do arranjo. A adoção de arranjos crescentes e em sentidos opostos centrados num mesmo ponto configura o procedimento de investigação denominado Sondagem Elétrica Vertical (SEV) no qual a variação vertical de resistividade é investigada. Já a combinação de arranjos crescentes com o deslocamento horizontal dos arranjos caracteriza o procedimento de investigação por Caminhamento Elétrico (CE). No caso de um CE com grande densidade de dados, i. e., com muitas medidas realizadas sobre um mesmo perfil, a técnica passa a ser chamada de Tomografia Elétrica (ERT). A técnica de ERT permite mapear, com grande detalhamento, a variação lateral da resistividade elétrica combinada com a variação vertical (Figura 3.5).

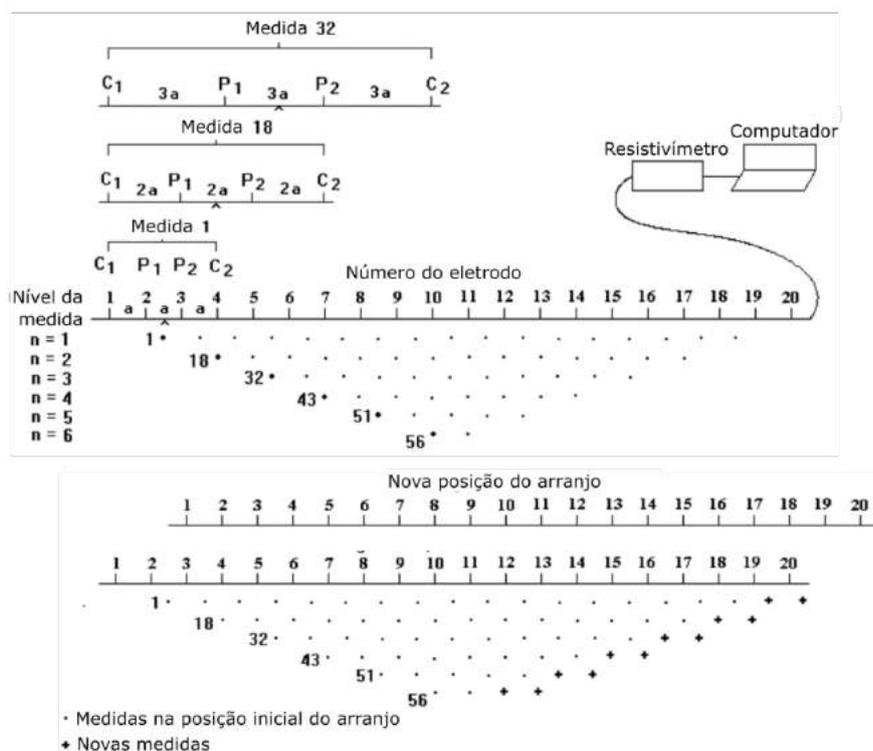


Figura 3.5: Arranjo de eletrodos para um Caminhamento Elétrico e a sequência de medições usadas para criar uma pseudo-seção. Fonte: adaptado de Loke (2004)

De acordo com Loke (2004) e Braga (2016), para o desenvolvimento da ERT podem ser aplicados diversos tipos de arranjo, alguns exemplos são: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, dentre outros como apresenta a Figura 3.6 .

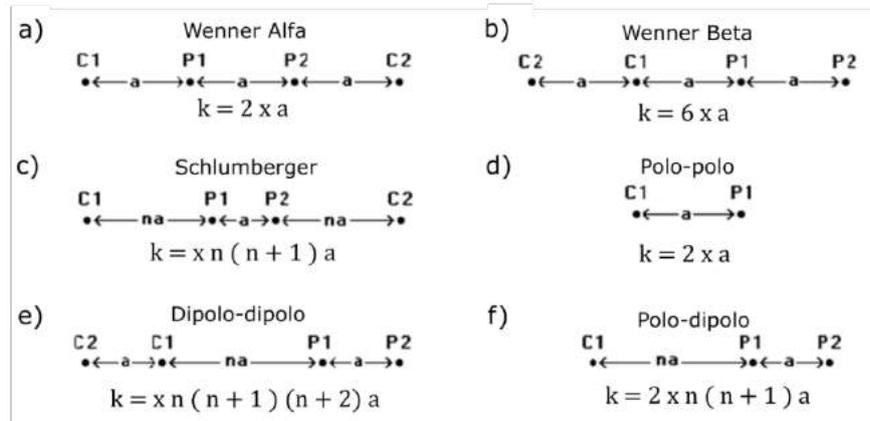


Figura 3.6: Arranjos convencionais com quatro eletrodos para medir a resistividade em subsuperfície. Fonte: adaptado de Loke (2004).

Com relação aos tipos de arranjo, o trabalho de Putiška et al. (2012) faz a comparação entre a capacidade de detecção de cavidades para diferentes tipos de arranjos de eletrodos na ERT através da abordagem de modelagem numérica. Os autores consideram cavidades preenchidas por ar como alvos de resistividade elétrica próxima ao infinito. Para a modelagem os autores definiram como resistividade padrão para alvos preenchidos com ar o valor de $10^6 \Omega m$. Foram testados os arranjos dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner e Schlumberger. Após as simulações de aquisição e inversão de dados, os autores concluíram que os arranjos com maior sensibilidade para a detecção e caracterização geométrica de cavidades no subsolo são os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo, o que reforça a empregabilidade destes arranjos para esta finalidade.

3.2.3. Método do Radar de Penetração no Solo

O método de GPR consiste em um método de imageamento de alta resolução da subsuperfície rasa (Butler, 2005). O método funciona através da transmissão de ondas eletromagnéticas em altas frequências, entre 10 MHz e 2,6 GHz, que por sua vez são repetidamente radiadas em direção ao terreno por uma antena transmissora em superfície (Davis e Annan, 1989; Porsani, 1999; Daniels, 2005; Jol, 2008; Utsi, 2017). As variações nas propriedades elétricas e geométricas em subsuperfície implicam na ocorrência dos fenômenos da reflexão, refração e difração das ondas eletromagnéticas. As ondas refletidas e difratadas em subsuperfície são captadas por outra antena em superfície, chamada de receptora. A energia captada é registrada em função do tempo duplo de ida e volta até a ponto de reflexão ou difração

que posteriormente é convertido para profundidade através da estimativa de velocidade de propagação do sinal no meio (velocidade da onda eletromagnética).

De forma geral, a propagação e a resolução do sinal eletromagnético do GPR dependem de três principais fatores: característica métrica do sinal, ou seja, a frequência de transmissão; características eletromagnéticas dos materiais; e a interação entre as duas características anteriores. A interação entre a métrica do sinal e as propriedades eletromagnéticas do meio resultam nos parâmetros de velocidade de onda eletromagnética, comprimento de onda e atenuação.

A velocidade de onda eletromagnética v descreve a velocidade com que os pulsos eletromagnéticos emitidos pelo GPR atravessam os materiais. Matematicamente, de acordo com a Equação 8, trata-se de uma função em termos da frequência de transmissão, velocidade da luz no vácuo, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética relativas do meio.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma/\omega\varepsilon)^2}}{2}}} \quad (8)$$

Onde c é a velocidade da luz e ω é a frequência angular, i. e., $\omega = 2\pi f$. Para os materiais geológicos, que de forma geral são caracterizados com materiais de baixa atenuação, a influência da condutividade sobre a faixa de frequência de transmissão do GPR é mínima e assume-se que o termo $\sigma/\omega\varepsilon$ é nulo (Davis e Annan, 1989; Reynolds, 2011). Além disso, como citado em 3.2.1, a permeabilidade magnética relativa μ_r dos materiais geológicos pode ser aproximada para 1. A partir dessas considerações a velocidade da onda eletromagnética v pode ser reescrita na forma da Equação 9.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (9)$$

Durante a propagação da onda eletromagnética, as discontinuidades nas propriedades eletromagnéticas dos meios geológicos implicam na reflexão de parte do sinal. A força dessa reflexão é proporcional à magnitude das mudanças das propriedades (Reynolds, 2011). A quantidade de energia refletida, em relação à amplitude do sinal, é dada pelo coeficiente de reflexão R , conforme apresentado pela Equação 10, onde v_1 e v_2 são velocidades de camadas subjacentes. Já direção da onda refletida é condicionada pela Lei de Snell (Equação 11), onde θ_i e θ_r são o ângulo de incidência e de reflexão, respectivamente.

$$R = \frac{\sqrt{v_1} - \sqrt{v_2}}{\sqrt{v_1} + \sqrt{v_2}} \quad (10)$$

$$\theta_i = \theta_r \quad (11)$$

Em relação a atenuação do sinal eletromagnético do GPR, à medida que a onda eletro-

magnética se propaga através de um meio, sua amplitude A mostra um declínio de forma exponencial em relação ao valor inicial A_0 à medida que percorre a distância r através de um meio com uma constante de atenuação α (Equação 12), como é exemplificado através da Figura 3.7.

$$A = A_0 e^{-\alpha r} \quad (12)$$

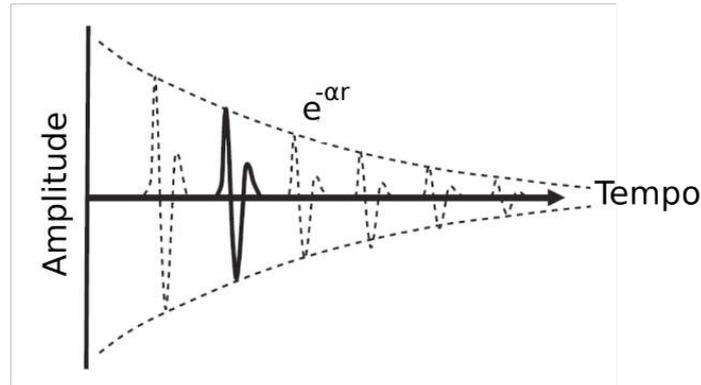


Figura 3.7: Decaimento exponencial do pulso eletromagnético se propagando em r ao longo do tempo. Fonte: adaptado de Jol (2008).

Para materiais geológicos a constante de atenuação pode ter seu valor aproximado em termos das propriedades elétricas do meio (Equação 13), porém, com maior influência da condutividade elétrica (Neal, 2004). Portanto, meios mais condutivos atenuam mais o sinal eletromagnético do que meios resistivos Burger et al. (2006).

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (13)$$

No que diz respeito a frequência de transmissão, de acordo com a Equação 14, frequências mais altas correspondem a comprimentos de ondas menores, e por consequência, implicam em um sinal de maior resolução. O inverso se aplica para frequências mais baixas, essas possuem maiores comprimentos de onda que implicam em um sinal de menor resolução, mas com maior alcance em relação à profundidade de penetração.

$$f_c = \frac{v}{\lambda_c} \quad (14)$$

Onde f_c corresponde à frequência central, ou seja, a frequência mais comum detectada pela antena receptora numa faixa de frequências Δf emitidas pela transmissora (Figura 3.8), que geralmente varia de um valor mínimo metade da f_c até um máximo três meios da f_c , e λ_c o comprimento de onda central.

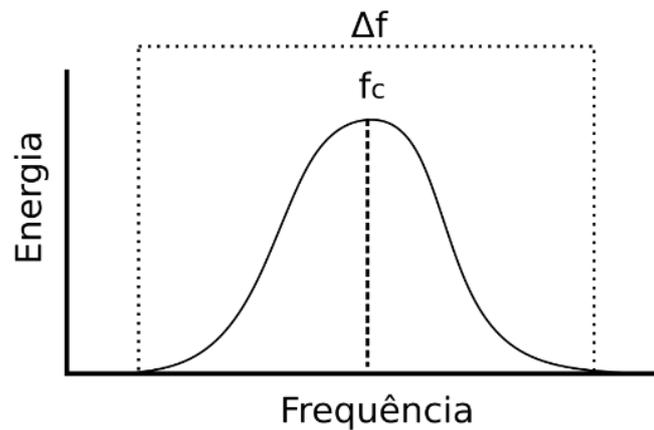


Figura 3.8: Faixa de frequência transmitida pela antena do GPR. Fonte: adaptado de Davis e Annan (1989).

A resolução do sinal de GPR é medida através de duas componentes (Jol, 2008) em função do comprimento de onda central: resolução vertical (também chamada de resolução radial) e a resolução horizontal (Figura 18).

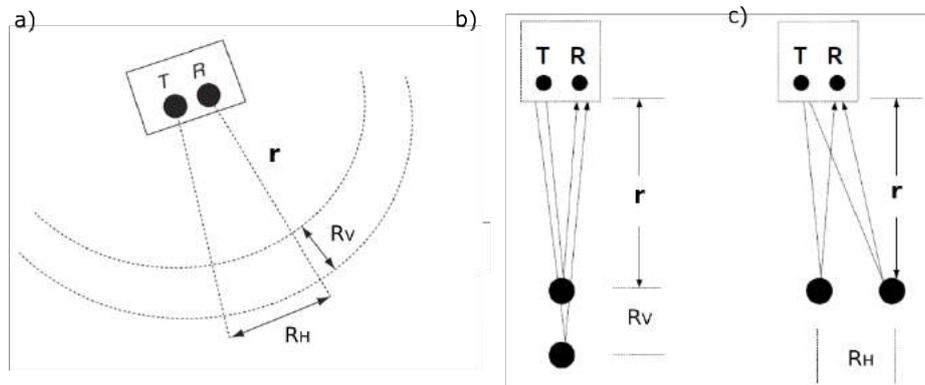


Figura 3.9: a) resolução do sinal do GPR dividida em duas componentes. b) resolução vertical, em relação a dois alvos alinhados na vertical. c) resolução lateral (ou angular) em relação à dois alvos posicionados lado a lado. Fonte: adaptado de Jol (2008).

A resolução vertical R_V (Equação 15) corresponde à menor distância entre interfaces que pode ser detectada pela frequência de transmissão. No vácuo o comprimento da resolução vertical independe da distância da fonte, mas na prática, a dispersão e a atenuação do pulso afetarão em profundidades maiores (Jol, 2008).

$$R_V = \frac{\lambda_c}{4} \quad (15)$$

A resolução horizontal R_H (Equação 16) corresponde à resolução de deslocamento angular da frente de onda, governada pela largura da primeira zona de Fresnel. Neste caso a

profundidade é importante porque a energia irradiada se expande lateralmente à medida que se propaga no meio, de modo que a resolução horizontal diminui conforme o sinal ganha profundidade (Neal, 2004).

$$R_H = \sqrt{\frac{r\lambda_c}{2}} \quad (16)$$

Para se adquirir perfis de dados GPR, as antenas transmissora e receptora são movidas ao longo de um perfil através de incrementos espaciais constantes, em uma ou nas duas antenas, o que proporciona diferentes arranjos de aquisição, conforme ilustra a Figura 19.

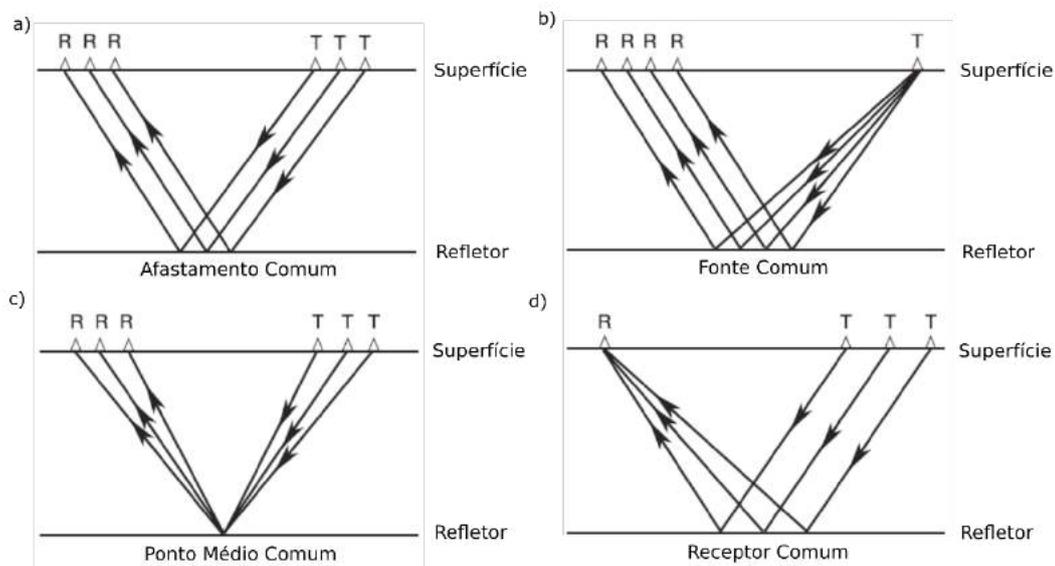


Figura 3.10: Principais arranjos utilizados para aquisição de dados de GPR. Fonte: adaptado de Neal (2004).

O resultado dos perfis adquiridos são imagens que apresentam, em função do tempo de percurso da onda eletromagnética, as variações laterais e verticais das propriedades geométricas e eletromagnéticas dos materiais em subsuperfície. À medida que os dados são registrados durante a aquisição, os traços de reflexão são posicionados horizontalmente construindo uma seção também chamada de radargrama, conforme apresenta a Figura 3.11).

No caso de interfaces contínuas, como contatos entre camadas geológicas ou estruturas como linhas de pedra, o refletor registrado no radargrama apresenta uma geometria contínua que acompanha a geometria da interface. No caso de objetos pontuais ou de característica pontual, como são os túneis, quando vistas ortogonalmente em relação ao seu eixo maior, o registro do sinal refletido é característico do fenômeno da difração, ou seja, o objeto pontual passa a atuar como uma fonte secundária de ondas eletromagnéticas que são captadas pela antena receptora, dessa forma o registro da anomalia no radargrama apresenta formato hiperbólico.

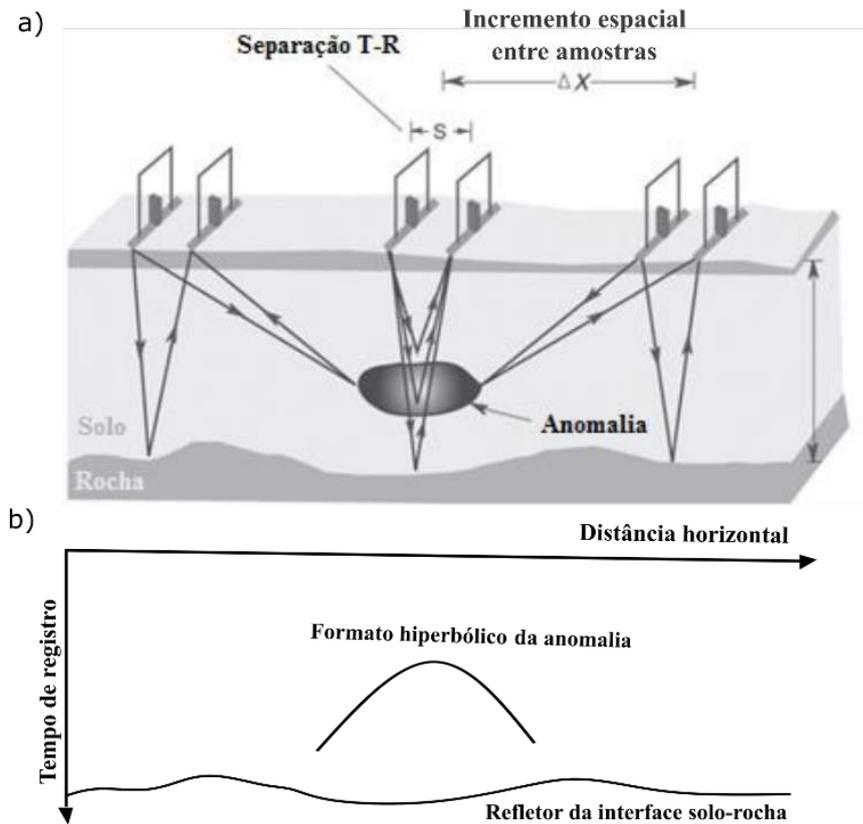


Figura 3.11: Ilustração esquemática de um perfil GPR. a) perfil de aquisição com arranjo de afastamento comum sobre uma interface de contato de solo-rocha e sobre um alvo de característica pontual. b) radargrama resultante da aquisição em (a). Fonte: adaptado de Jol (2008).

3.3. Assinatura Geofísica de Cavidades

Através de consultas bibliográficas de diversos estudos que, assim como este, tiverem o objetivo de localizar e caracterizar cavidades, foi desenvolvido este item com a intenção de ajudar na compreensão da resposta geofísica do alvo esperada para cada método utilizado.

Com relação a ERT, foram selecionadas pesquisas que tinham como alvos cavidades preenchidas por ar, de forma parcial ou total, inseridas em diferentes meios (*background*) com características geológicas distintas entre si. Com relação ao GPR, foi utilizada a pesquisa de Kofman et al. (2006) como base para verificar a resposta do sinal em função da geometria de cavidades.

A compilação da revisão de artigos que utilizaram a ERT é apresentada de forma resumida na Tabela 3.3, onde são descritos os alvos de cada pesquisa, suas respectivas profundidades e assinaturas geofísicas assim como as assinaturas dos meios em que estão inseridos.

Tabela 3.3: Assinatura geofísica de cavidades preenchidas por ar retirada de diversas referências bibliográficas.

Autores	Alvo	Dimensões do alvo (m)	Prof. (m)	Assinatura geofísica do alvo (Ωm)	Background (Ωm)
El Qayd et al. (2005)	Cavidade em calcário	2 x 2	Superior à 2	<1700	8~800
Cardarelli et al. (2006)	Cavidades em locais de ocupação antrópica	2 x 2 até 3 x 5	Entre 3 e 4	800~900	100~200
Orlando et al. (2013)	Tumba em sítio arqueológico	3 x 2	Até 3	800~1600	12,5~400
Bernatek-jakiel e Kondracka (2016)	Sistema de Canalização em arenitos	0,2 x 0,3	Até 0,8	400~500	40~100
Ungureanu et al. (2017)	Cavidades subterrâneas em canteiro de obras	42,5 x 4,5	1 m	700~800	0,4~400

Através da Tabela 3.3, nota-se que o contraste entre o meio e o alvo sempre ocorre em caráter positivo, i.e., a cavidade preenchida por ar, totalmente ou parcialmente, sempre mostra uma resistividade superior ao meio no qual está inserida.

Outra observação que pode ser feita na Tabela 3.3 é que o valor da resistividade do alvo possui proporcionalidade em relação ao seu *background*. Por exemplo, meios mais resistivos, com 800 Ωm , apresentam cavidades com resistividades superiores à 1700 Ωm e meios menos resistivos, com resistividade de 100 Ωm , apresentam cavidades com resistividades de inferiores à 500 Ωm .

Em relação a boas práticas de aquisição de dados GPR para localização e caracterização de cavidades, Kofman et al. (2006) procuraram, através de um estudo em ambiente controlado, verificar as características das respostas de cavidades em perfis GPR com diferentes frequências de aquisição (500 MHz, 300 MHz e 100 MHz). Os autores construíram um sítio controlado com cavidades de diversos diâmetros (0,6 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,4 m), simuladas por cilindros de fibra de vidro. Os autores verificaram que as cavidades com diâmetro superior à uma vez e meia o comprimento de onda da frequência central da antena tiveram

como resposta anomalias de reverberação, enquanto cavidades com diâmetro inferior a essa medida resultaram em anomalias de formato hiperbólico. Com base no resultado do estudo, os autores sugerem que dois critérios sejam seguidos na utilização do GPR para localização e caracterização de cavidades:

- O diâmetro da cavidade alvo não deve ser inferior ao comprimento de onda do equipamento utilizado;
- O eixo vertical da cavidade não deve ser significativamente menor que seu eixo horizontal, portanto, sugerindo que o alvo seja aproximadamente cilíndrico.

4. Aquisição e Processamento dos dados

A rotina de aquisição e processamento de dados adotada nesta pesquisa foi dividida em seis etapas listadas abaixo:

1. Definição dos parâmetros de aquisição;
2. Aquisição dos dados de ERT e GPR em duas campanhas;
3. Processamento dos dados adquiridos;
4. Modelagem numérica de radargramas;
5. Interpretação dos dados pós-processamento;
6. Geração de blocos tridimensionais a partir das seções bidimensionais;

Abaixo são apresentados mais detalhes das etapas seguidas em função dos dois métodos geofísicos utilizados.

4.1. Eletrorresistividade

Com base nas revisões dos trabalhos de Putiška et al. (2012) e Ungureanu et al. (2017) foi escolhido o arranjo dipolo-dipolo para a aquisição dos perfis de ERT. Segundo Putiška et al. (2012), como discutido no item 3.2.2, através de uma abordagem numérica, o arranjo dipolo-dipolo apresentou maior sensibilidade na localização e caracterização de cavidades. A mesma demonstração feita por Putiška et al. (2012) foi confirmada no trabalho de Ungureanu et al. (2017), porém neste foi realizada uma abordagem prática da aplicação da ERT.

Ungureanu et al. (2017) apresentam seções geoeletricas de 3 arranjos distintos (Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo) adquiridas sobre cavidades preenchidas por ar, onde segundo os autores, as seções adquiridas com o arranjo dipolo-dipolo apresentaram os resultados com maior sensibilidade horizontal, ou seja, proporcionam melhor delimitação lateral das cavidades.

Em relação ao espaçamento entre eletrodos adotado no arranjo das aquisições de ERT, foram levadas em consideração o diâmetros e a profundidade da “entrada” e da “saída” do canal principal do *pipe*, discutidas em 2.2. Tendo em vista que a “entrada” e a “saída” são, respectivamente, a maior e a menor seção ortogonal expostas em relação ao maior eixo do canal principal, foi suposto que as porções internas do canal teriam um diâmetro compreendido entre as respectivas seções. Portanto, com base na suposição do diâmetro do canal principal, presumiu-se que o valor de 1 m seria um valor representativo do diâmetro das porções não expostas. Dessa forma, 1 m foi adotado como espaçamento entre eletrodos inicial para as aquisições dos perfis de ERT.

Entretanto, por limitações logísticas, o arranjo com espaçamento entre eletrodos de 1 m ofereceu um alcance teórico aproximado de 2,20 m de profundidade, devido ao fato de que o equipamento utilizado na aquisição contava com um número máximo de 11 eletrodos de potencial por leitura, possibilitando uma abertura máxima de 10 m de arranjo. Visto que a base da “entrada” do canal principal está localizada à 3,10 m de profundidade, o alcance de 2,20 m não pôde garantir a cobertura total do diâmetro da cavidade. Portanto, os mesmos perfis foram refeitos utilizando o espaçamento de 2 m entre os eletrodos, o que possibilitou a abertura de 20 m, garantindo o alcance teórico aproximado de 9 m de profundidade, valor suficiente para ultrapassar a base da “entrada” do canal principal.

Com relação a aquisição de dados de ERT realizada nesta pesquisa, esta foi dividida duas campanhas de aquisição. A primeira campanha foi realizada em novembro de 2018. A segunda campanha foi realizada em setembro de 2019. Em ambas campanhas foram utilizados os equipamentos: resistímetro Elrec Pro (receptor), resistímetro Syscal R2 acoplado à um conversor de voltagem (transmissor) e uma bateria de 12 V (fonte). Ambos resistímetros são da empresa francesa IRIS *Instruments*. A Figura 4.1 apresenta um registro fotográfico da aquisição durante a segunda campanha, com destaque para os equipamentos utilizados na aquisição. A Tabela 4.1 apresenta uma soma dos parâmetros de aquisição dos perfis levantados.



Figura 4.1: Fotografia da aquisição de dados de ERT realizada na segunda campanha de aquisição de dados e destaque para o sistema de aquisição: à esquerda o Elrec Pro (receptor), ao centro o Syscal R2 e um conversor de voltagem (transmissor) e à direita uma bateria de 12 V (fonte).

Tabela 4.1: Parâmetros de aquisição dos dados de ERT.

Perfil	Distância entre perfis	Extensão	Arranjo	Direção	Espaçamento entre eletrodos
ERT-1 ao ERT-7	3 m	30 m	Dipolo-Dipolo	SW-NE	1 m e 2 m
<i>Background</i>	-	54 m	Dipolo-Dipolo	SW-NE	3 m

Dos 15 perfis de ERT adquiridos, 14 perfis foram feitos na mesma direção e sentido (SW-NE), dispostos ortogonalmente em relação à uma linha virtual, em 7 linhas com extensão de 30 m cada e com 3 m de espaçamento entre si, conforme indicado na Figura 4.2.

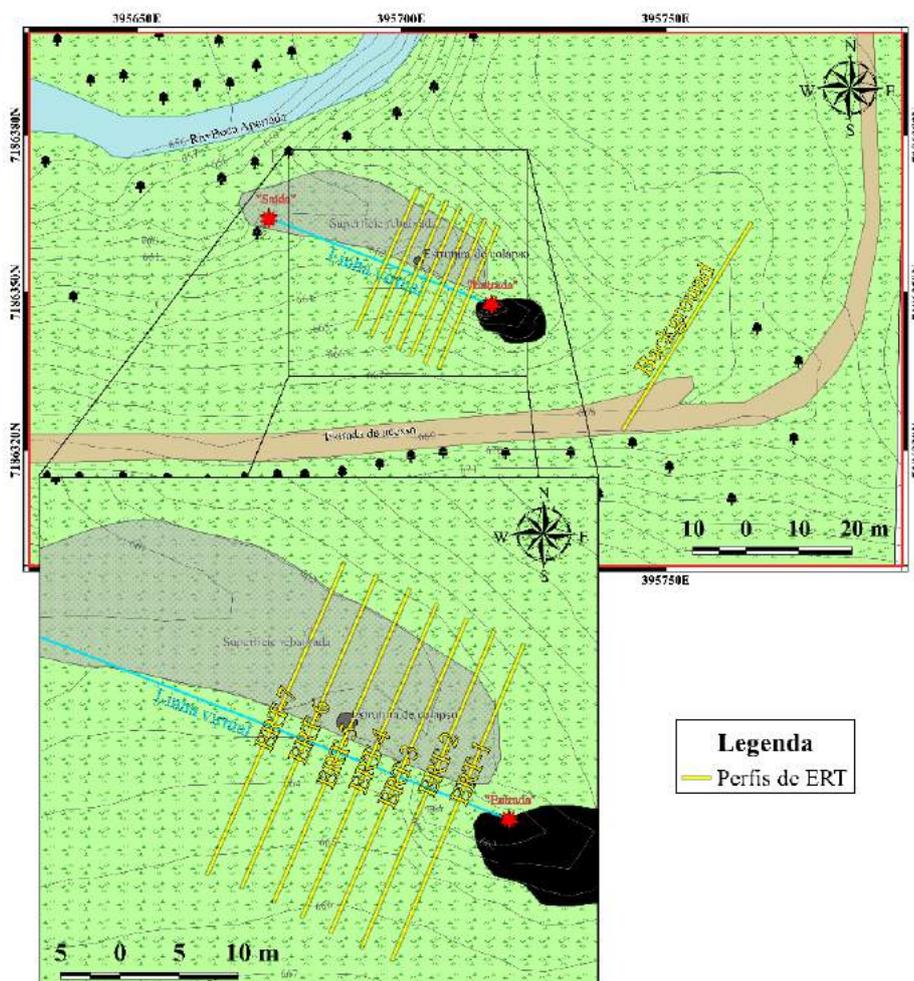


Figura 4.2: Mapa indicando a disposição de todos os perfis de ERT adquiridos nesta pesquisa.

Sobre cada linha estão 2 perfis, um com espaçamento de 1 m entre os eletrodos e o outro com espaçamento de 2 m entre os eletrodos. O 15º perfil de ERT corresponde ao perfil de *background*, com 50 m de extensão e espaçamento entre os eletrodos de 3 m, adquirido com intuito de verificar a resposta do meio sem a presença do sistema de túneis em subsolo.

Para garantir os 30 e 50 m dos perfis com leituras, adotou-se um recuo no início de cada perfil de aquisição para o posicionamento inicial dos eletrodos de corrente. O recuo adotado para cada perfil foi correspondente a duas vezes a abertura entre eletrodos utilizado, ou seja, recuo de 6 m para aberturas de 3 m, recuo de 4 m para aberturas de 2 m e recuo de 2 m para aberturas de 1 m.

Nota-se na Figura 4.2 que o perfil ERT-1, dentre os demais, é o mais próximo à “entrada”

da cavidade. Neste caso, o perfil ERT-1 foi adotado como referência para a localização da cavidade em subsuperfície nos dados de ER e para auxiliar a interpretação dos demais perfis.

Com relação ao processamento dos dados de ERT, foi gerado o fluxograma apresentado na Figura 4.3. Inicialmente cada conjunto de dados adquiridos por perfil foi inserido no *software* Prosys II, disponibilizado gratuitamente pela IRIS Instruments, e transformado em histograma para que os valores de resistividade aparente inconsistentes fossem verificados e removidos.

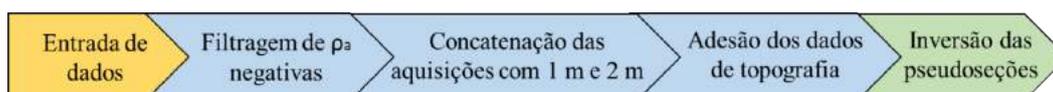


Figura 4.3: Fluxograma de processamento dos dados de ERT.

A Figura 4.4 mostra um exemplo do conjunto de amostras onde foi verificada a presença de valores de resistividade aparente negativos (o que não corresponde a nenhum significado físico para esta propriedade física).



Figura 4.4: Exemplo de conjunto de amostras de um perfil de ERT com valores negativos de resistividade aparente destacados em vermelho.

Os valores negativos de resistividade aparente podem ser associados à erros do próprio equipamento durante as leituras, por exemplo, a saturação dos componentes eletrônicos devido à temperatura, todavia, estes erros não comprometem a consistência das demais amostras que, após a correção, resultam em histogramas similares ao que é apresentado na Figura 4.5.

Após a filtragem dos valores negativos de resistividade aparente, ainda no Prosys II, os dados de topografia de cada perfil foram incorporados ao conjunto de perfis. Após a incorporação dos dados de topografia, o conjunto total de dados foi separado em quatro subconjuntos de dados e estes foram exportados em formato vetorial para a posterior inversão

e geração das seções geoeletricas no programa RES2DINV, disponibilizado gratuitamente pela empresa Geotomo *Software*.

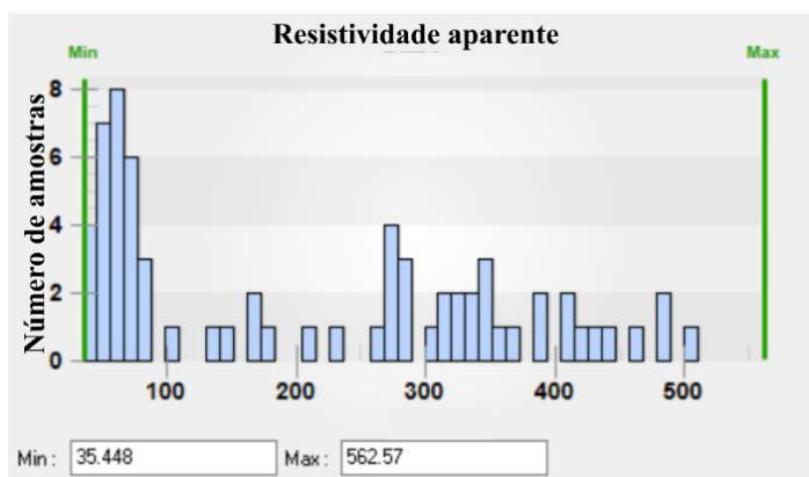


Figura 4.5: Exemplo de conjunto de amostras de um perfil de ERT após a filtragem de valores negativos de resistividade aparente.

O primeiro subconjunto consistiu nos dados correspondente aos perfis adquiridos com espaçamento de 2 m entre os eletrodos. O segundo subconjunto consistiu nos dados correspondente aos perfis adquiridos com espaçamento de 1 m entre os eletrodos. O terceiro subconjunto correspondeu aos dados adquiridos no perfil de *background*. O quarto subconjunto consistiu nos dados correspondente às concatenações dos perfis adquiridos sobre o mesmo perfil, com espaçamentos entre os eletrodos de 1 m e 2 m.

A concatenação de dados de perfis com espaçamentos distintos foi realizada no Prosys II. Inicialmente foram carregados os dados dos arquivos binários extraídos do sistema de aquisição e adquiridos sobre o mesmo perfil. Após a entrada dos dados no programa, e posteriormente à incorporação dos dados topográficos, o conjunto foi exportado em formato vetorial para inversão.

A partir dos subconjuntos foi realizado o processo de inversão dos dados individual para cada subconjunto, resultando em 22 perfis geoeletricos no final. O processo de inversão foi realizado através da versão demonstrativa do *software* RES2DINV.

O programa RES2DINV utiliza uma rotina baseada no método de Mínimos Quadrados com Bordas Suavizadas, que busca reduzir a diferença entre os dados calculados (sintéticos) e os dados observados (reais) através de blocos de resistividade que se ajustam por meio de iterações (Loke, 1997), limitadas até 5 por se tratar de uma versão demo. A diferença desse ajuste é apresentada pelo programa em forma de erro médio quadrado (*root-mean-square* – RMS), dado em porcentagem, e conforme os dados calculados (pseudo-seções calculadas) se ajustam aos dados observados (pseudo-seção medida) o valor de RMS diminui.

Como critério de qualidade para os produtos gerados a partir da inversão adotou-se va-

lores de RMS no intervalo entre 5 e 10%, ou valores inferiores, onde 5% corresponde ao próprio critério de parada do programa (Loke e Barker, 1996) e 10% um valor de margem para incertezas associadas ao próprio dado.

4.2. Radar de Penetração no Solo

Para a escolha da frequência central da antena de aquisição do GPR foram levadas em consideração as medidas dos diâmetros de canais secundários e a profundidade da “entrada” do canal principal (vistos em 2.2), além dos conceitos sobre resolução do sinal (discutidos em 3.2.3) e as recomendações de práticas eficientes de aquisição do trabalho de Prego et al. (2017).

Conforme medidas tiradas em campo, alguns canais secundários expostos apresentavam diâmetros de aproximadamente 0,15 m. Logo, através da Equação 14 e Equação 15, considerando uma velocidade de 0.1 m/ns (representativa para materiais geológicos), verificou-se na Equação 17 que a eficiência desejada para a aquisição seria alcançada a partir da frequência central de 167 MHz. Entretanto, por questões de disponibilidade de equipamento, foi utilizada uma frequência de aquisição de 200 MHz, o que garantiu uma resolução ainda maior do que a necessária.

$$f_c = \frac{0,1}{4 \times 0,15} = 167MHz \quad (17)$$

Além da resolução para detectar os canais, segundo Prego et al. (2017), deve-se garantir que o alcance da frequência de transmissão seja suficiente para ultrapassar até duas vezes a profundidade da base do alvo. Portanto, ao consultar o manual do equipamento, verificou-se que as antenas que transmitem sinal na faixa de frequência entre 200 e 300 MHz possuem alcance típico de 8 m (TerraSIRch, 2004), ou seja, superando a profundidade da base do canal principal além de duas vezes.

Com relação a aquisição de dados de GPR realizada nesta pesquisa, todas as aquisições foram realizadas durante a segunda campanha em setembro de 2019. Os equipamentos utilizados nas aquisições foram: antena de 200 MHz e módulo de aquisição SIR3000, ambos desenvolvidos pela empresa norte-americana *Geophysical Survey Systems Inc.* A Figura 4.6 apresenta um registro fotográfico da aquisição de dados com o GPR, com destaque para o sistema de aquisição. A Tabela 4.2 apresenta uma soma dos parâmetros de aquisição dos perfis levantados.

Ao todo, foram adquiridos 21 perfis de GPR na mesma direção e sobre os perfis de ERT, porém, os perfis GPR com identificação ímpar foram adquiridos no sentido SW-NE enquanto os perfis com identificação par foram adquiridos no sentido inverso, i.e., NE-SW. Cada perfil possui 30 metros de extensão e espaçamento de 1,5 m entre si, conforme indicado na Figura 4.7. Em todas as aquisições de GPR, foram adotados os seguintes parâmetros: espaçamento entre traços de 0,02 m e janela temporal de 120 ns por traço dividida em 512 amostras.

Com relação ao processamento de dados de GPR foi utilizado o *software* ReflexW (Sandmeier, 2007), desenvolvido pela empresa alemã Sandmeier *Geophysical Research* e com licença disponibilizada pela Universidade de São Paulo, para a realização de todas as etapas apresentadas no fluxograma apresentado na Figura 4.8.



Figura 4.6: Fotografia da aquisição de dados de GPR realizada na segunda campanha de aquisição de dados e destaque para o módulo de aquisição SIR3000 e para a antena de 200 MHz.

Tabela 4.2: Parâmetros de aquisição dos dados de GPR

Perfil	Dist. entre perfis	Ext.	Arranjo	Dir.	Antena (f_c)	Cabeçalho
GPR-1	1,5 m	30 m	Afastamento comum	SW-NE	200 Hz	0,02 m/traço
ao						512 amostras
GPR-21						120 ns de janela

O perfil GPR-1 foi sobreposto ao perfil ERT-1, assim como o perfil GPR-3 foi sobreposto ao perfil ERT-2, GPR-5 sobreposto ao ERT-3, GPR-7 sobreposto ao ERT-4, GPR-9 sobrepostos ao ERT-5, GPR-11 sobreposto ao ERT-6 e GPR-13 sobreposto ao ERT-7. A sobreposição dos perfis teve como objetivo uma comparação direta entre as seções geolétricas e os radargramas. Todos os perfis de GPR citados foram adquiridos no mesmo sentido dos perfis de ERT (SW-NE).

Inicialmente foram realizadas etapas de edição de dados, que corresponderam:

- Adequação de todos os perfis para o mesmo sentido (SW-NE);
- Ajuste da extensão dos perfis para 30 m;
- Retirada do ganho automático de amplitude que os traços recebem no módulo de aquisição.

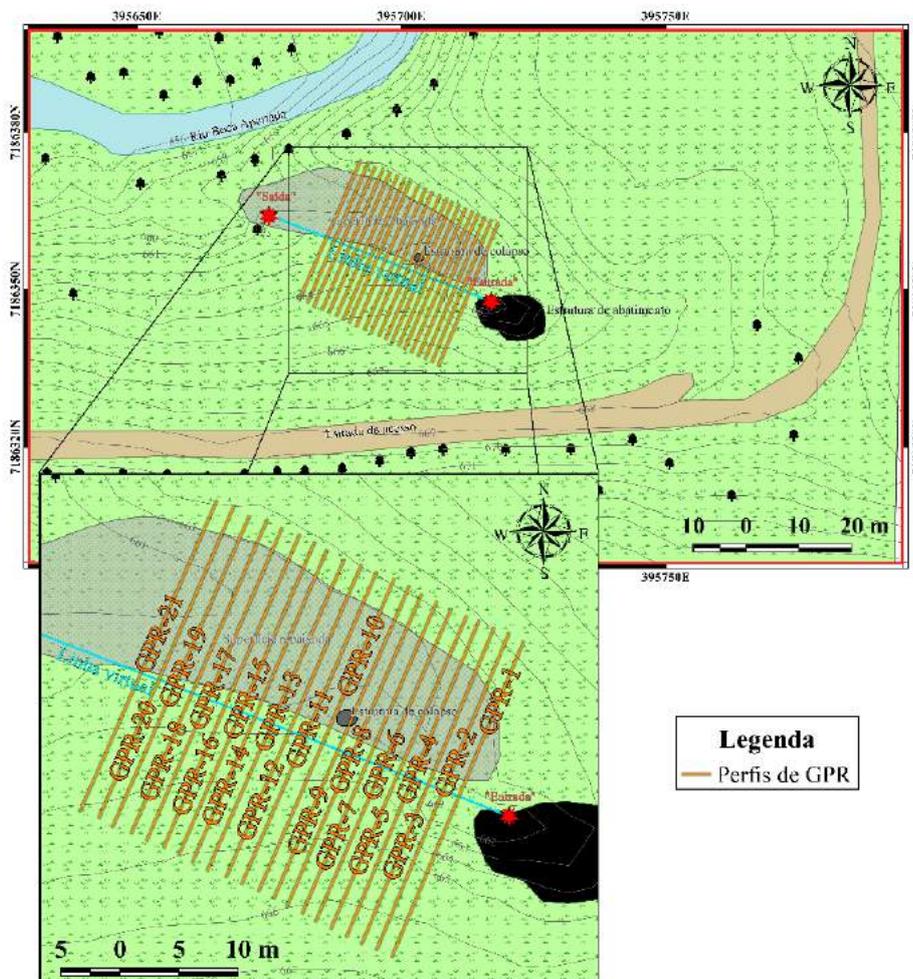


Figura 4.7: Mapa indicando a disposição de todos os perfis de GPR adquiridos nesta pesquisa.

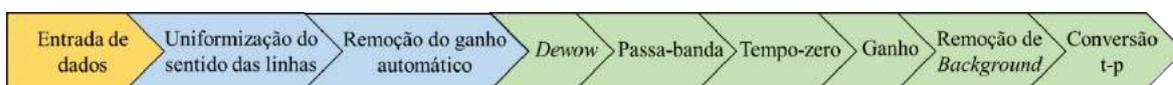


Figura 4.8: Fluxograma de processamento dos dados de GPR.

Após as etapas de edição foram aplicadas as etapas de processamento detalhadas a seguir:

A filtragem *dewow* corresponde a um filtro de altas frequências que atua na retirada da saturação do sinal através da remoção de baixas frequências intrínsecas ao sinal recebido pela antena (Jol, 2008). Como parâmetro de entrada no *software* de processamento utiliza-se uma janela de tempo correspondente ao inverso da frequência central do equipamento utilizado, neste caso adotou-se 5 ns.

A filtragem passa-banda é projetada para a supressão de interferências oriundas de componentes de baixa frequência e de alta frequência que estejam fora da faixa de frequência de

funcionalidade do equipamento (Jol, 2008), i.e., 0,5 vezes a frequência central e 1,5 vezes a frequência central da antena utilizada (conforme visto em 3.2.3).

O algoritmo utilizado neste filtro compreende três etapas: aplicação da transformada rápida de Fourier para transição do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência; supressão de componentes de baixa frequência e alta frequência através da aplicação de um filtro caixa ou trapezoidal no espectro frequências e aplicação da transformada rápida de Fourier reversa para transição do domínio da frequência para o domínio do tempo. Como parâmetros de entrada foram adotados os valores de 0,5 da frequência central e 1,5 da frequência central da antena utilizada, ou seja, 100 MHz e 300 MHz, aplicados em um filtro de caixa, conforme ilustra a Figura 4.9.

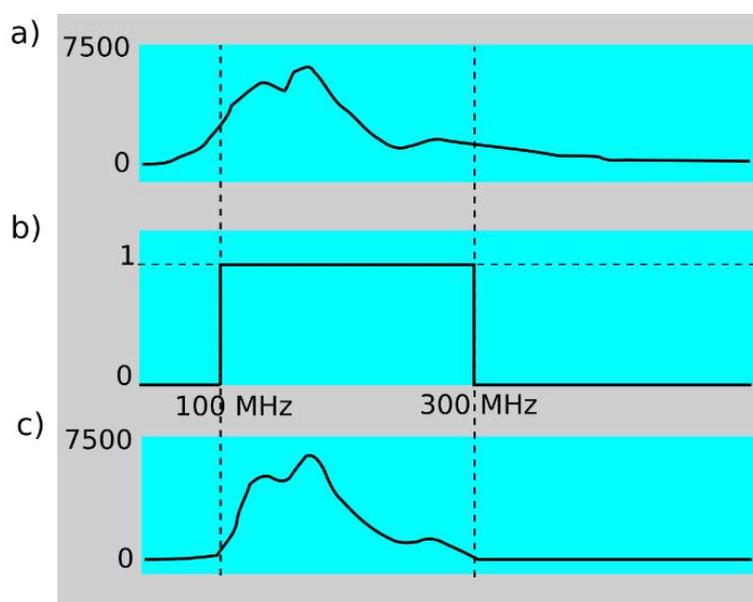


Figura 4.9: Exemplo do filtro passa-banda aplicado no processamento dos dados após edição. a) Espectro de frequência do radargrama antes da aplicação do filtro. b) Filtro trapezoidal com limites em 100 e 300 MHz. c) Espectro de frequência do radargramas depois da aplicação do filtro trapezoidal.

A correção de tempo-zero corresponde a adequação do tempo inicial do radargrama ao tempo correspondente à primeira reflexão do sinal na interface ar-terreno (Jol, 2008). Essa correção é feita através do movimento do conjunto total de traços para tempos mais tardios. Como parâmetro de entrada foi utilizada uma janela de tempo correspondente a quantidade necessária de tempo de percurso de ida da onda até a interface ar-terreno e o retorno para a antena receptora, neste caso, através de comparação entre algumas estimativas iniciais, adotou-se 12 ns.

O ganho tem como objetivo melhorar a exibição dos dados, mas tem o efeito indesejável de amplificar os ruídos (Neal, 2004). Pode ser aplicado através de diversas funções que aumentam a amplitude original registrada em cada traço ao longo do tempo. A função esco-

lhida nesse caso foi a de Controle de Ganho Automático (*Automatic Gain Control – AGC*), essa função utiliza os maiores valores de amplitudes do traço para aumentar as amplitudes menores (Sandmeier, 2007). O algoritmo do AGC calcula inicialmente uma amplitude média num intervalo de tempo determinado no traço. Depois disso, o valor médio é aplicado para cada janela de tempo ao longo de todo o traço. Neste caso, como critério para escolha da janela optou-se por utilizar um quarto da janela total de aquisição, ou seja, 30 ns.

Na remoção do *background*, o algoritmo calcula um traço médio para toda a extensão do radargrama ao longo de uma janela de tempo determinada e subtrai esse traço médio de todos os traços individualmente (Sandmeier, 2007). O objetivo desse filtro é remover ruídos externos à aquisição que persistem como refletores retilíneos, também conhecidos como ruídos coerentes. Como parâmetro de entrada foi utilizada toda a janela temporal restante após a correção de tempo-zero, ou seja, 108 ns.

A conversão tempo-profundidade transforma os traços que estão no domínio do tempo para o domínio da profundidade possibilitando a interpretação do radargrama. Esse procedimento é realizado a partir do modelo de velocidade correspondente ao radargrama ou a partir de uma velocidade constante quando se assume um meio homogêneo. Para esta pesquisa o segundo método foi adotado, neste caso foi utilizado um valor de permissividade dielétrica relativa ϵ_r de 10 que resultou numa velocidade de onda eletromagnética de aproximadamente 0,1 m/ns. O valor adotado de permissividade relativa ϵ_r igual a 10 corresponde a um solo areno-argiloso (TerraSIRch, 2004), similar ao que é observado através das descrições das sondagens feitas na área de estudo.

Inicialmente as etapas foram aplicadas apenas a um único perfil para verificar a consistência do fluxograma com relação ao resultado obtido. Após o processamento individual do 1º perfil de aquisição, correspondente ao perfil GPR-1, as etapas de processamento foram aplicadas para as demais linhas de aquisição utilizando-se os mesmos parâmetros entrada.

4.3. Modelagem dos dados de Radar de Penetração no Solo

A modelagem numérica ou modelagem direta corresponde a sintetização de dados comparáveis aos dados medidos em campo, obtidos em reposta a um ambiente parametrizado e controlado pelo usuário (Aster et al., 2018). Os resultados obtidos através da modelagem foram confrontados com o radargrama processado do perfil GPR-1 e analisados de forma qualitativa em função de suas semelhanças e diferenças para validar interpretações dos dados adquiridos em campo. Para a realização da modelagem foi utilizado o software de código aberto gprMax. O gprMax simula a propagação de ondas eletromagnéticas através do método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite-Difference Time-Domain – FDTD*), para a geração dos radargramas calculados (Warren et al., 2016).

A abordagem numérica foi utilizada para verificar duas possibilidades de respostas em função da complexidade do meio. A primeira possibilidade tratou da resposta no radargrama

de um alvo similar ao canal principal do sistema de túneis no subsolo em um meio de características ideais para o GPR. A segunda possibilidade tratou da resposta no radargrama de um alvo similar ao canal principal do sistema de canalização em um meio condutor, ou seja, não ideal para aplicação do GPR, que tivesse como referência os valores de condutividade correspondentes aos encontrados através dos levantamentos de ERT.

Para os modelos foram adotados parâmetros de aquisição idênticos aos utilizados para aquisição dos 21 perfis de dados observados: traços a cada 0,02 m; 120 ns de janela temporal dividida em 512 amostras e 30 m de extensão por perfil cortando ortogonalmente o eixo maior do canal principal, este localizado no ponto central do perfil (15 m).

No primeiro modelo (Figura 4.10), o qual simula a resposta de um alvo similar ao canal principal em um meio ideal, i.e., resistivo, para aplicação do GPR, foram considerados os seguintes parâmetros: meio homogêneo com condutividade σ nula, permeabilidade magnética relativa μ_r igual a 1 e permissividade dielétrica relativa ϵ_r igual a 10 (mesmo valor adotado na etapa de conversão tempo-profundidade para os dados observados); alvo circular de diâmetro de 1,5 m, com o topo na profundidade de 1,7 m, condutividade σ nula, permeabilidade magnética relativa μ_r igual a 1 e permissividade dielétrica relativa ϵ_r igual a 1 (mesma do ar).

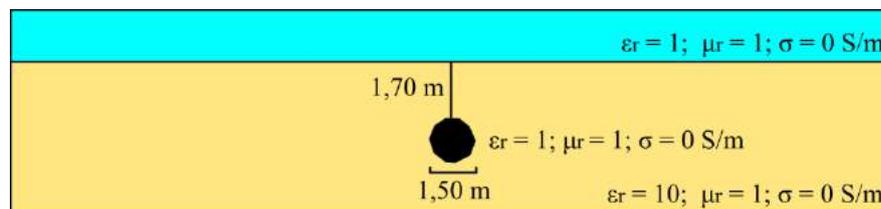


Figura 4.10: Primeiro modelo simulando meio resistivo ideal para aplicação do GPR.

No segundo modelo (Figura 4.11), o qual simula a resposta de um alvo similar ao canal principal em um meio condutor, i.e., não ideal para aplicação do GPR, foram considerados os seguintes parâmetros: meio homogêneo com condutividade σ igual a 0,01 S/m, permeabilidade magnética relativa μ_r igual a 1 e permissividade dielétrica relativa ϵ_r igual a 10; alvo circular de diâmetro de 1,5 m, com o topo na profundidade de 1,7 m, condutividade σ nula, permeabilidade magnética relativa μ_r igual a 1 e permissividade dielétrica relativa ϵ_r igual a 1.

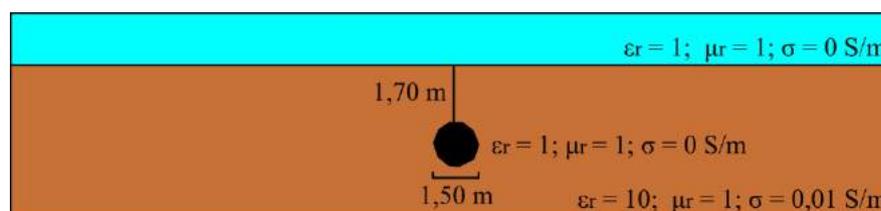


Figura 4.11: Segundo modelo simulando meio condutivo não ideal para aplicação do GPR.

4.4. Análise Tridimensional e Estimativa de Solo Erodido

O processo de geração dos blocos tridimensionais foi utilizado para complementar a interpretação e a correlação dos resultados bidimensionais. Adicionalmente, a análise tridimensional permitiu estimar o volume de solo erodido pelo sistema erosão em túneis no subsolo e o potencial volume de solo a ser erodido no caso de colapso da estrutura. Duas etapas para a realização do processo de geração dos produtos tridimensionais foram realizadas:

- Concatenação das seções bidimensionais;
- Interpolação do conjunto de dados concatenados.

A primeira etapa de concatenação dos perfis bidimensionais resultou em dois conjuntos de dados concatenados, um conjunto de dados de ERT e outro conjunto com os dados de GPR. Ambos os conjuntos compostos por: coordenadas de variação horizontal, coordenada de variação vertical (profundidade) e valores das propriedades físicas correspondentes as posições determinadas pelas coordenadas. Na segunda etapa foi utilizado o *software* Voxler (da empresa Golden Software LLC) para interpolar o conjunto de dados concatenados e gerar os blocos tridimensionais utilizados na interpretação.

Para a análise dos dados, contemplando o volume de solo erodido e o volume potencial de solo a ser erodido, foram realizados os procedimentos listados abaixo:

- Determinação de isovalor correspondente a interface entre solo alterado pelo sistema de erosão em túneis no subsolo e a cavidade preenchida por ar com base nas análises bidimensionais dos dados adquiridos sobre o sistema de túneis em subsolo e consulta a Tabela 3.3;
- Determinação de isovalor correspondente a interface entre solo inalterado e solo alterado pelo sistema de túneis com base nas análises bidimensionais e dados adquiridos em regiões inalteradas pelos canais, além de consulta a Tabela 3.3;
- Cálculo do volume das isosuperfícies rastreadas nos blocos tridimensionais a partir do algoritmo de “*compute volum*” do módulo “*isosurface*” no *software* Voxler;
- Subtração dos quantitativos de volume encontrados para cada isovalor.

O quantitativo de volume de solo perdido é estabelecido com base no volume calculado até a isosuperfície correspondente à interface entre a cavidade e o solo. A estimativa do volume potencial de perda de solo no caso de um eventual colapso é estabelecida com base no volume resultante da subtração dos volumes previamente calculados para cada isosuperfície rastreada. Assim, o volume de potencial perda de solo é diretamente relacionado ao solo de característica anômala em relação ao comportamento estabelecido para o local, avaliado com base em medidas distantes do sistema de túneis em subsolo.

5. Resultados e Discussão

Os resultados são apresentados em três sub-itens, dois correspondem aos métodos geofísicos utilizados na pesquisa, o terceiro corresponde a análise tridimensional. Junto aos resultados são apresentados comentários embasados nas interpretações e discussões em função das referências supracitadas ao longo dos demais itens já apresentados.

5.1. Resultados da Eletrorresistividade

Neste sub-item são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da Eletrorresistividade. São apresentados os perfis geoeletricos comparando os espaçamentos entre os eletrodos utilizados na aquisição de dados (Figura 5.1), perfil geoeletrico de *background* (Figura 5.2), perfis geoeletricos correspondentes aos perfis ERT-1 até ERT-7 (Figura 5.3) e horizontes geoeletricos correspondentes a interpolação dos perfis citados (Figura 5.5).

5.1.1. Seções Geoeletricas

Na Figura 5.1, os dados do perfil ERT-2 são utilizado como exemplo para demonstrar a influência de cada espaçamento entre eletrodos adotado para as aquisições de ERT. Nas aquisições com 2 m de espaçamento entre eletrodos, foram adquiridas um total de 105 medidas de resistividade aparente, já nas aquisições com 1 m de espaçamento, o total de medidas foi de 252. Através da concatenação, foram gerados conjuntos com 357 medidas de resistividade aparente para cada perfil.

Na aquisição com espaçamento de 1 m (Figura 5.1a), entre 15 e 20 m, nota-se os limites laterais e de topo da anomalia central. De acordo com a posição do perfil em relação a linha virtual traçada entre a “entrada” e “saída” do canal principal, a posição e a forma da anomalia podem ser associadas ao canal principal.

Na seção geoeletrica do perfil de *background* (Figura 5.2) nota-se que, na ausência do sistema de túneis no subsolo, a resposta do sinal elétrico do meio é homogênea por toda a extensão do perfil com valores de resistividade abaixo de 200 Ωm . Essa assinatura do meio fomenta interpretações das anomalias destacadas nos perfis de aquisição feito sobre o sistema de túneis no subsolo na área de estudo. Entre 25 m e 35 m, no limite de alcance dos dados, existe uma anomalia de resistividade intermediaria com valores acima de 400 Ωm , essa anomalia pode estar associada ao topo da rocha sã na área. Entretanto, por se tratar de uma região de borda e por não haver constatações diretas, não é possível fazer nenhuma interpretação com relação a anomalia.

Na seção geoeletrica com espaçamentos combinados do perfil ERT-1 (Figura 5.3a), entre as posições de 18 e 20 m, observa-se uma anomalia (destacada pela elipse tracejada) com valores de resistividade acima de 1000 Ωm com topo à aproximadamente 1,20 m de profundidade. Essa anomalia está inserida em um meio aproximadamente homogêneo com resisti-

vidade variando entre 1 e 200 Ωm . A geometria arredondada com diâmetro aproximado de 2 m e o valor de resistividade elevado em relação ao meio sugerem que essa anomalia está relacionada ao canal principal do sistema de túneis no subsolo.

Nas seções geoeletricas com espaçamentos combinados do perfil ERT-2 (Figura 5.3), observa-se uma anomalia (destacada pela elipse tracejada) com valores de resistividade acima de 1000 Ωm semelhante à anomalia observada no perfil ERT-01. Entretanto, nota-se que a anomalia apresenta diâmetro e profundidade superiores. Além da diferença de tamanho, nota-se que a anomalia está deslocada relativamente para SW em relação à anomalia do perfil ERT-01.

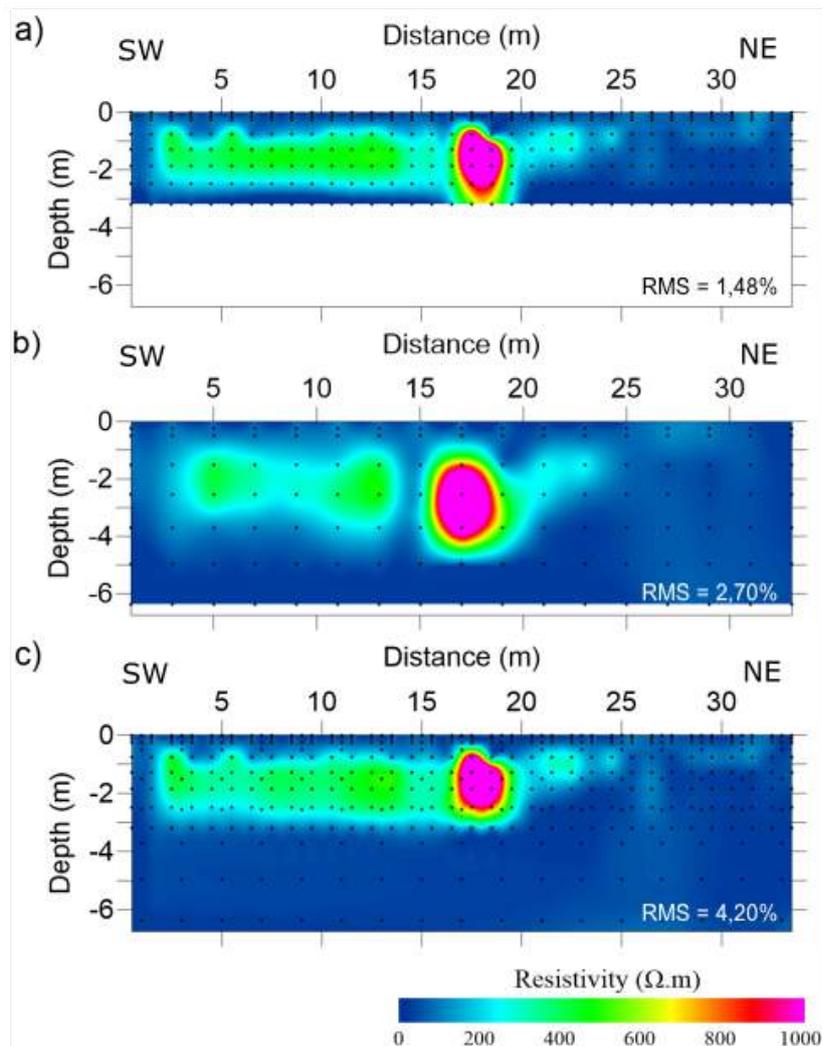


Figura 5.1: Seções geoeletricas do perfil ERT-2 com espaçamento variável entre os eletrodos. a) 1 m, b) 2 m e c) combinado (1 e 2 m).

Ainda no perfil ERT-02, entre as posições de 4 e 14 m, nota-se duas regiões (destacadas pelo retângulo contínuo) com valor de resistividade elétrica intermediário (de até 500 Ωm), sugerindo a presença de estruturas de caráter resistivo mas com menor influência no sinal do

que o canal principal. À NE do perfil, a partir de 22 m, também nota-se um meio homogêneo com resistividade entre 1 e 200 Ωm .

Nas seções geolétricas com espaçamentos combinados dos perfis ERT-3 (Figura 5.3c) e ERT-4 (Figura 5.3d), entre 8 e 18 m, nota-se uma anomalia com valores de resistividade acima de 1000 Ωm e profundidade aproximadamente constante de 1,5 m (destacada pela elipse tracejada), envolta num meio com resistividade entre 400 e 500 Ωm (destacado no retângulo contínuo). Esta anomalia destacada, em relação as destacadas acima, passa a apresentar formato mais aproximado de uma elipse com eixo maior, associado ao eixo horizontal da anomalia, de 10 m de comprimento, enquanto o eixo menor, associado à altura das anomalias apresenta 1,5 m de comprimento.

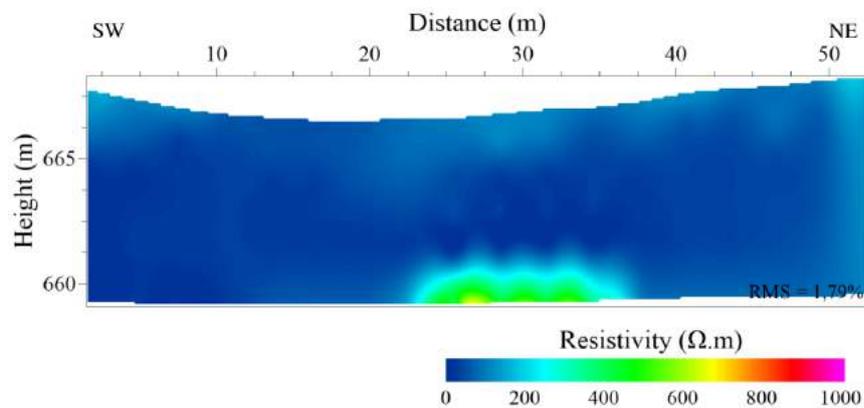


Figura 5.2: Seção geolétrica do perfil de *background*.

O formato aproximadamente elíptico das anomalias destacadas nos perfis ERT-3 e ERT-4, levando em consideração a natureza de ocorrência dos sistemas de túneis no subsolo, sugere duas hipóteses. A primeira hipótese é que as anomalias menos influentes vistas no perfil ERT-2 (destacadas no retângulo contínuo) podem ser associadas a estruturas paralelas e/ou ortogonais ao canal principal (i.e., canais secundários) que, nos perfis ERT-3 e ERT-4, refletem mais intensidade no sinal elétrico por terem maiores dimensões e/ou estarem conectadas. A segunda hipótese sugerida é que uma estrutura ortogonal ao canal principal, não relacionada as anomalias vistas no perfil ERT-2, pode estar conectada ao canal principal. À NE dos perfis, a partir de 24 m, nota-se um meio homogêneo com resistividade entre 1 e 200 Ωm , similar ao observado no perfil ERT-1 e no perfil de *background*.

Na seção geolétrica com espaçamentos combinados do perfil ERT-5 (Figura 5.3e), entre 8 e 16 metros, observa-se-se uma anomalia (destacada pela elipse tracejada) de caráter resistivo similar as anomalias observadas nos perfis ERT-3 e ERT-4, também envolta num meio com resistividade entre 400 e 500 Ωm (destacado pelo retângulo contínuo). Entretanto, neste caso nota-se um deslocamento de 2 m em relação as anomalia observadas nos perfis ERT-3 e ERT-4 e um deslocamento de 4 m em relação à anomalia observada no perfil ERT-1, associada ao canal principal.

Ainda no perfil ERT-5, nota-se que a anomalia está em uma profundidade superior à 2 m e, diferente do que foi observado nos perfis ERT-3 e ERT-4, não possui continuidade por toda sua extensão, como verifica-se na descontinuidade destacada pela linha pontilhada.

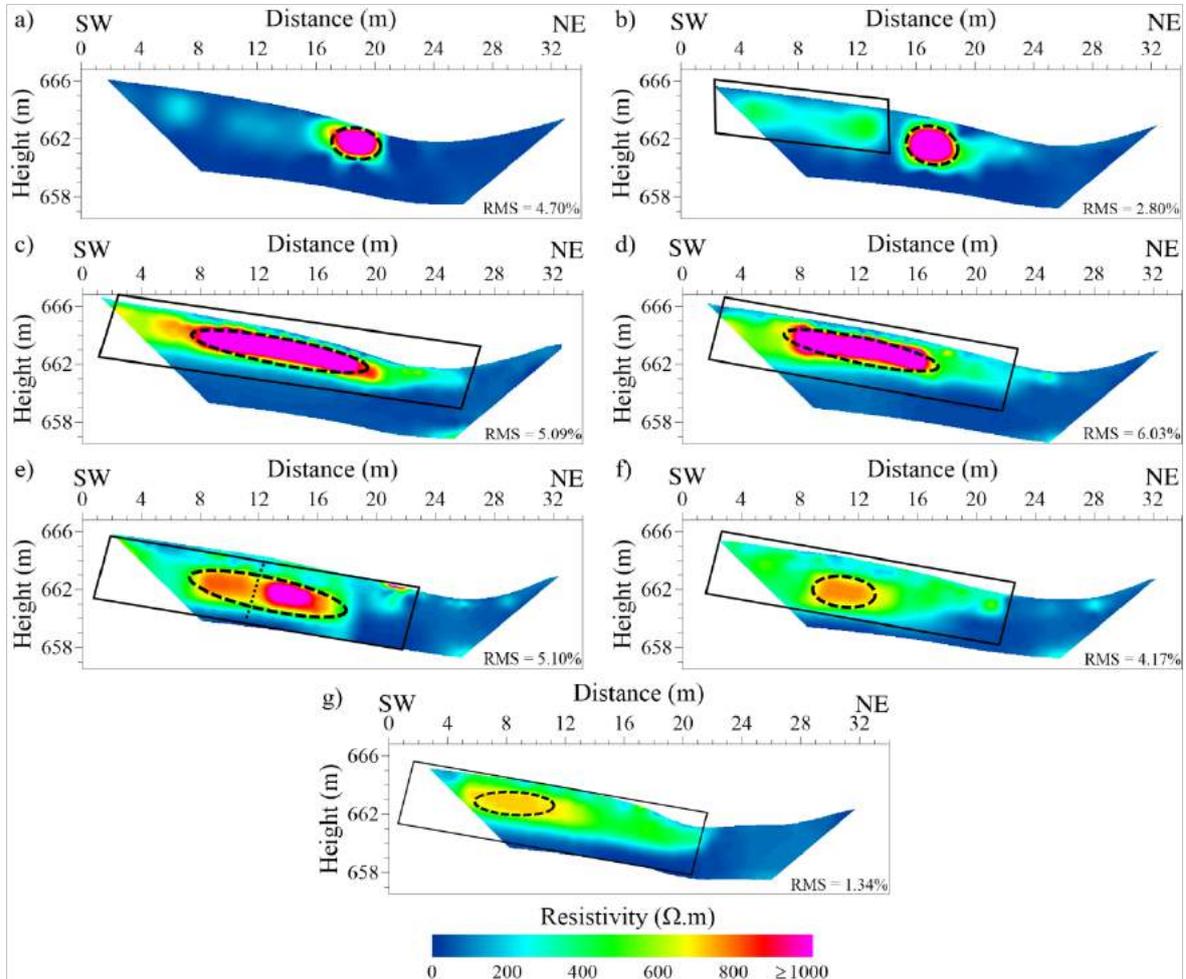


Figura 5.3: Seções geoeétricas com espaçamento de eletrodos combinados dos perfis: a) ERT-1, b) ERT-2, c) ERT-3, d) ERT-4, e) ERT-5, f) ERT-6 e g) ERT-7.

Nota-se que a porção à esquerda da linha pontilhada, entre 8 e 12 m, possui valores de resistividade abaixo de $1000 \Omega\text{m}$, enquanto que as porções à direita da linha pontilhada, entre 12 e 16 m apresentam valores acima de $1000 \Omega\text{m}$. A diferença entre os valores de resistividade nas porções citadas sugere que as anomalias estão relacionadas a estruturas separadas, o que pode reforçar a hipótese de canais secundários paralelos ao canal principal. À NE do perfil ERT-5, a partir de 20 m, também nota-se uma porção homogênea com resistividade entre 1 e $200 \Omega\text{m}$. Além disso, nota-se uma anomalia superficial de caráter pontual com valores acima de $1000 \Omega\text{m}$. Essa anomalia foi associada à presença de uma estrutura de abatimento à 0,1 m do perfil de aquisição (Figura 5.4).

Na seção geoeétrica com espaçamentos combinados do perfil ERT-6 (Figura 5.3f), entre 9 e 12 m, nota-se uma anomalia (destacada pela elipse tracejada) com valores de resistividade

intermediário, acima de $500 \Omega\text{m}$ e abaixo de $1000 \Omega\text{m}$, com topo à aproximadamente 2 m de profundidade, envolta num meio com resistividade entre 400 e $500 \Omega\text{m}$ (destacado pelo retângulo contínuo) que persiste no perfil até a posição de 22 m em relação ao eixo horizontal.



Figura 5.4: Estrutura de abatimento próxima à aquisição do perfil ERT-5.

Em relação a anomalia destacada no perfil ERT-6, nota-se que neste caso o formato da anomalia sugere apenas a influência de uma única estrutura. Entretanto, a estrutura associada a esta anomalia de resistividade elevada não apresenta as mesmas características vistas nos perfis descritos acima. O formato sugere que no perfil exista apenas um canal, que pode ser associado ao principal por referência a sua posição inferida nos demais perfis e superficialmente, entretanto, a falta de intensidade no sinal (valores de resistividade abaixo de $1000 \Omega\text{m}$) sugere que o diâmetro do canal seja menor na região sob a aquisição do perfil. Essa sugestão apresenta embasamento pelo que é observado em campo, isto é, o perfil mais próximo da “saída” sugere uma anomalia com diâmetro inferior ao perfil feito próximo à “entrada”, assim como é descrito no croqui do item 2.2.

Na seção geométrica com espaçamentos combinados do perfil ERT-7 (Figura 5.3g), entre 6 e 12 m, nota-se uma anomalia (destacada pela elipse tracejada) com valores de resistividade intermediário, acima de $500 \Omega\text{m}$, mas neste caso não superando valores de $750 \Omega\text{m}$. A diminuição de intensidade é associada com o mesmo fator descrito para a anomalia do perfil ERT-6, i.e., a diminuição do diâmetro do canal principal. A anomalia, assim como as anomalias dos demais perfis, está envolta por um meio de valores de resistividade entre 400 e $500 \Omega\text{m}$ (destacado pelo retângulo contínuo) e, assim como visto no perfil ERT-6, este meio com valores intermediários persiste no perfil até a posição de 22 m.

5.1.2. Horizontes Geolétricos

Na Figura 5.5, nota-se a presença de anomalias de valores próximos à $1000 \Omega\text{m}$ que sugerem a conexão entre as anomalias observadas nos perfis ERT-1, ERT-2, ERT-3 e ERT-4, entre 16 e 20 m. Entretanto, sob os perfis ERT-3 e ERT-4 a anomalia passa a se tornar esparsa, cobrindo uma área aproximada de 70 m^2 , o que sugere uma região que possivelmente teve maior retirada de material devido a maior passagem de água pelo sistema, o que acabou deixando mais espaço para preenchimento do sistema por ar.

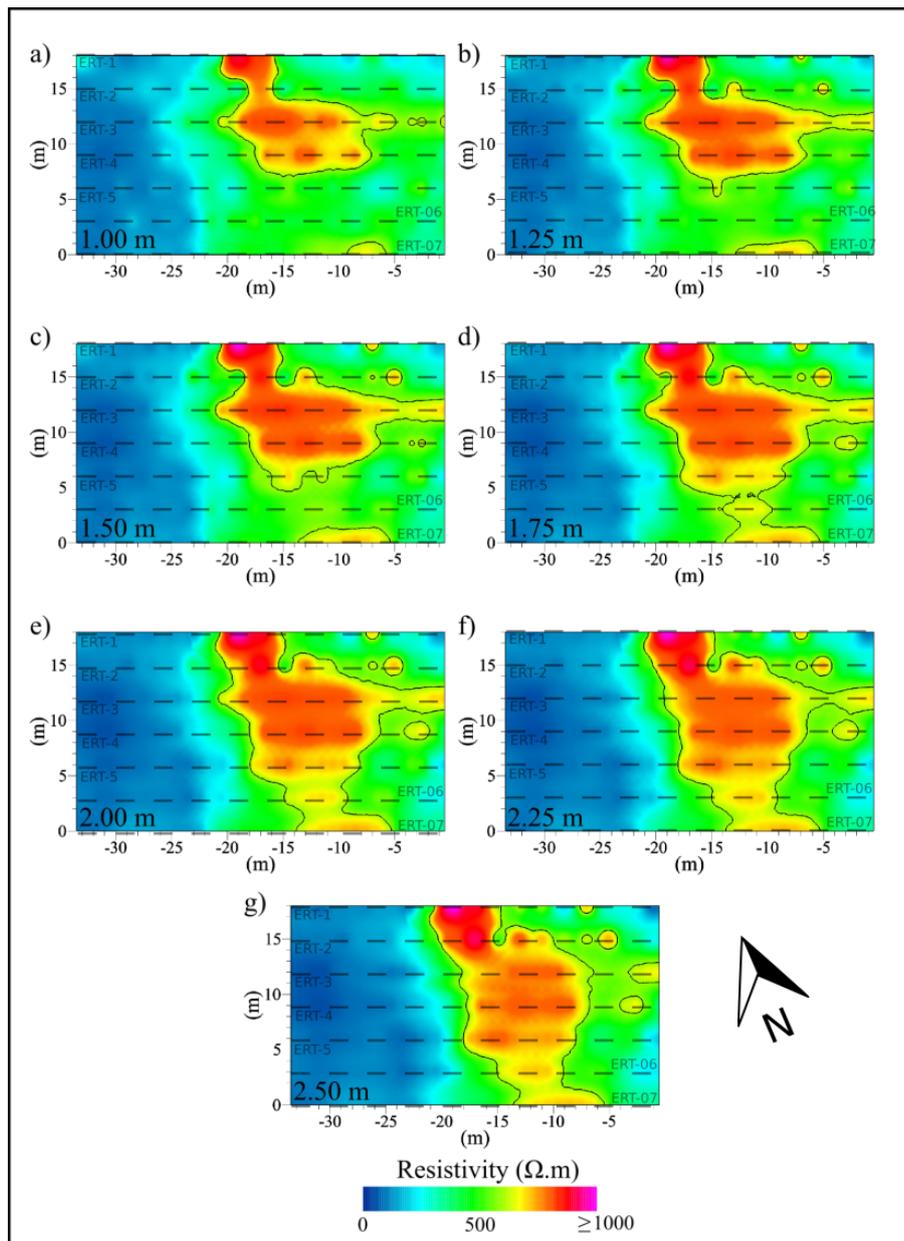


Figura 5.5: Horizontes geolétricos obtidos a partir da interpolação dos perfis de ERT para diferentes profundidades. a) 1 m, b) 1,25 m, c) 1,5 m, d) 1,75 m, e) 2 m, f) 2,25 m e g) 2,5 m.

Em relação a todos os horizontes da Figura 5.5, nota-se que a partir de 20 m (em alguns casos 22 m), a resistividade é sempre inferior à 200 Ωm , o que sugere a presença de uma zona mais condutividade/menos resistiva. Além disso, nota-se que as anomalias de alta resistividade (acima de 750 Ωm) estão envoltas por um meio de resistividade intermediária, com valores entre 400 e 700 Ωm , possivelmente influenciado pela presença do sistema de túneis no subsolo (estrutura de caráter resistivo).

Com o intuito de corroborar com as interpretações, foi realizada a integração dos dados geoeletricos com dados diretos obtidos através das sondagens apresentadas no item 2.3. A escolha das sondagens utilizadas nessa abordagem teve como critério a posição correlata ao croqui de aquisição dos dados elétricos, i.e., foram selecionadas apenas as sondagens que coincidiram com a área dos horizontes geoeletricos apresentados na Figura 5.5.

Na Figura 5.6, nota-se que a distribuição horizontal de resistividade na profundidade de 0,75 m coincide com as sondagens T18, T19 e T36. Conforme observado nas sondagens T-18 e T19, verifica-se que a parcela de baixos valores de resistividade (inferiores à 250 Ωm), correspondentes a variação de azul para o turquesa, corresponde a um material argiloso. Já os valores elevados de resistividade (acima de Ωm), destacado pelo contorno preto contínuo, conforme observado na sondagem T-36, podem ser associados a presença de um material arenoso de característica friável.

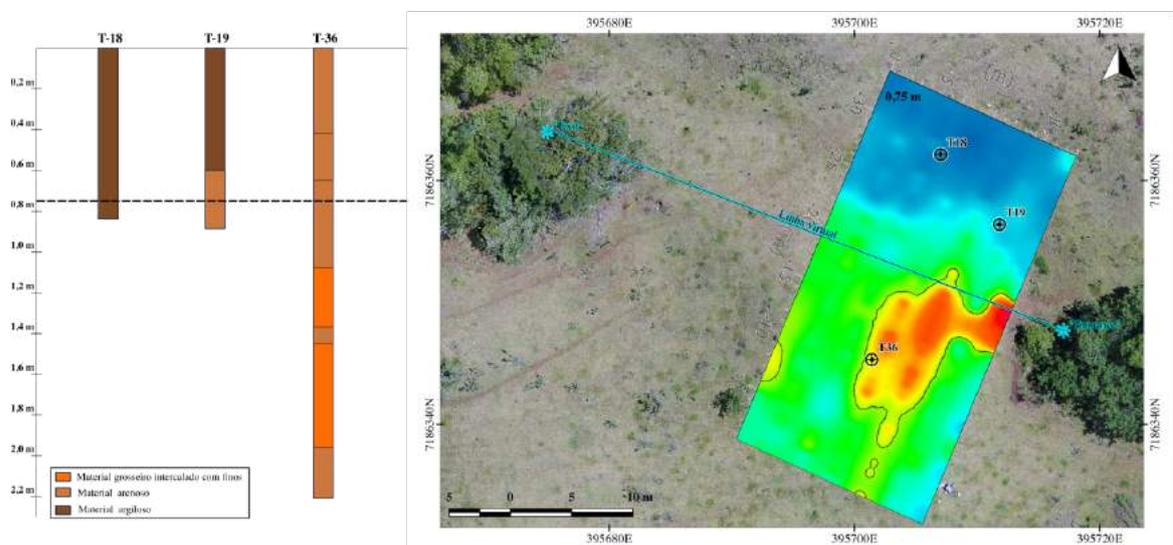


Figura 5.6: Horizonte geoeletrico correspondente a profundidade de 0,75 m obtido da interpolação dos perfis ERT georreferenciados com a superposição das sondagens T-18, T-19 e T-36.

Na Figura 5.7, nota-se que a distribuição horizontal de resistividade na profundidade de 1,5 m coincide apenas com a sondagem T36. Conforme observado na sondagem T-36, verifica-se que o aumento da resistividade em relação ao horizonte em 0,75 m traduz a variação de um material arenoso para um material mais grosseiro com intercalações de finos,

isto é, horizonte característico de ocorrência de túneis no subsolo.

Na Figura 5.8, nota-se que a distribuição horizontal de resistividade na profundidade de 2 m, assim como no horizonte de 1,5 m, coincide apenas com a sondagem T36. Conforme observado na sondagem T-36, verifica-se que a persistência de materiais mais grosseiros, com características associadas a ocorrência de túneis no subsolo, implicam em valores de resistividade elevados (próximos à 1000 Ωm).

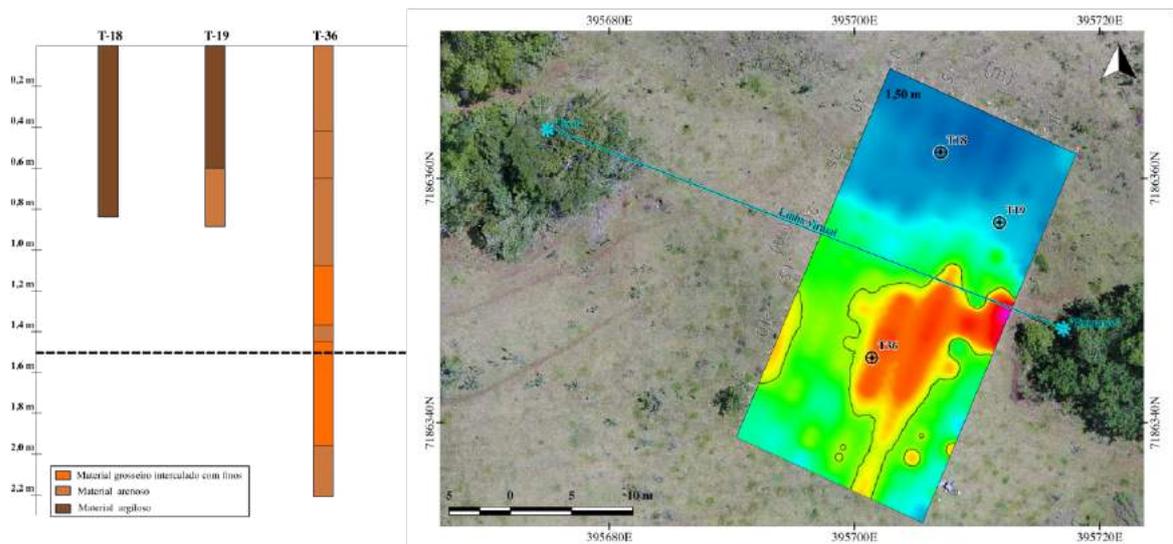


Figura 5.7: Horizonte geelétrico correspondente a profundidade de 1,5 m obtido da interpolação dos perfis ERT georreferenciados com a superposição das sondagens T-18, T-19 e T-36.

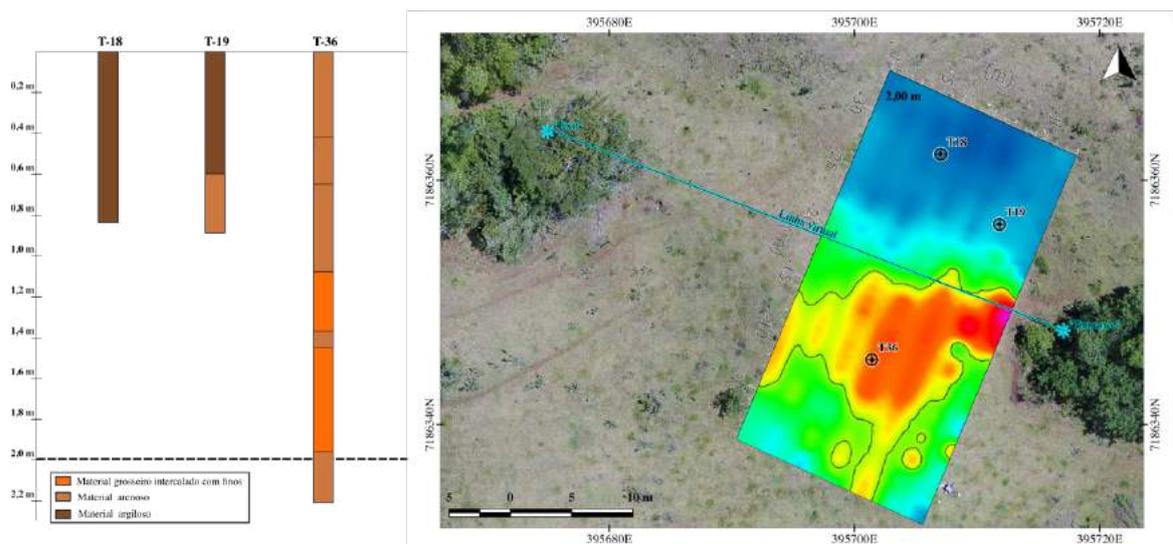


Figura 5.8: Horizonte geelétrico correspondente a profundidade de 2 m obtido da interpolação dos perfis ERT georreferenciados com a superposição das sondagens T-18, T-19 e T-36.

A partir dos produtos de integração de dados foram traçados os limites da área impactada pela pelo sistema de túneis no subsolo (Figura 5.9), destacados pela linha tracejada em vermelho, totalizando aproximadamente 380 m². O critério de delimitação foi a divisão entre a região com valores de resistividade abaixo de 250 Ω m, associada à um material argiloso de baixa porosidade, da região com valor de resistividade acima de 250 Ω m, associado à um material grosseiro, poroso, com associação direta à ocorrência de túneis na área.

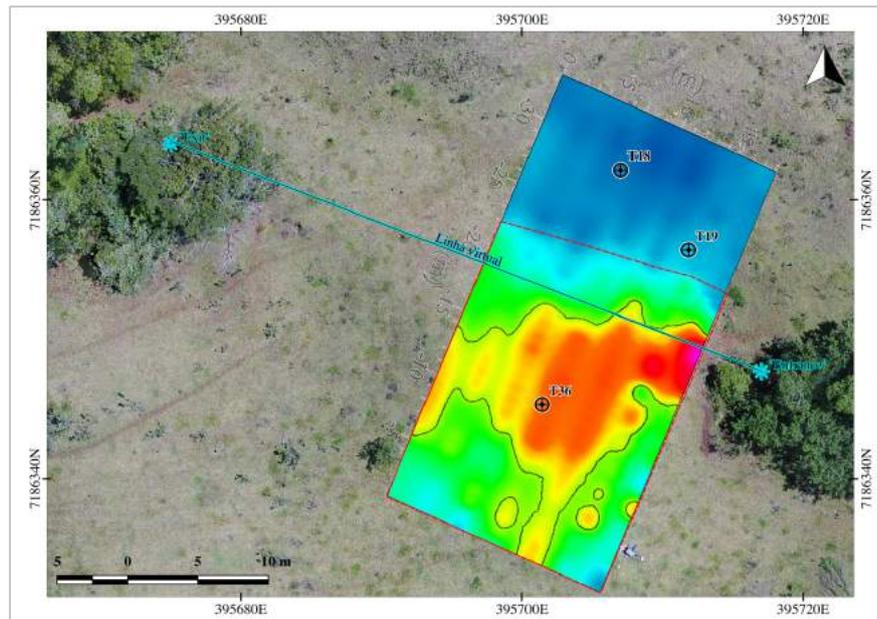


Figura 5.9: Limite traçado para área impactada pelo sistema de túneis no subsolo, destacado pela linha tracejada vermelha.

5.2. Resultados do Radar de Penetração no Solo

Neste sub-item são apresentados e discutidos os resultados obtidos através do Radar de Penetração no Solo. São apresentados radargramas utilizados na comparação entre dados observados e dados calculados a partir da modelagem. Uma análise comparativa permitiu uma discussão sobre as limitações encontradas na aplicação do método GPR na caracterização túneis no solo basáltico da área de estudo.

Na Figura 5.10a, após a rotina de processamento, o radargrama do perfil GPR-1 é utilizado como exemplo para demonstrar a identificação de anomalias que podem ser associadas à presença de canais do sistema de túneis no subsolo. Entretanto, ao observar o radargrama, nota-se que em toda sua extensão não são identificados alvos hiperbólicos que possam sugerir a presença de canais. Ainda que, na Figura 5.10a, o canal principal tenha sido inserido de forma qualitativa (elipse tracejada), com base em aferições de campo, não foi possível identificar qualquer feição hiperbólica correspondente a presença de uma cavidade.

A Figura 5.10b mostra o radargrama sintético proveniente da modelagem GPR correspondente ao modelo da Figura 4.10. Observa-se que, na posição de 15 m do eixo horizontal,

ocorre uma série de reflexões hiperbólicas a partir de 40 ns, destacadas pelo retângulo vermelho, sugerindo um padrão de reverberação que está associado com o alvo simulando uma cavidade (destacado pela elipse tracejada). Neste caso, o modelo simula um meio homogêneo sem atenuação do sinal eletromagnético, o que fica evidenciado através da alta amplitude associada a reflexão hiperbólica e as reverberações presentes no radargrama.

A Figura 5.10c mostra o radargrama sintético proveniente da modelagem GPR correspondente ao modelo da Figura 4.11. Observa-se que, na posição de 15 m, o retângulo vermelho destaca no radargrama o mesmo padrão de reflexão hiperbólica seguido por reverberações. Entretanto, o topo da reflexões está em 45 ns e com amplitude inferior ao que foi observado no radargrama da Figura 5.10b. Neste caso, o modelo simula um meio condutivo, i.e., que atenua o sinal eletromagnético de forma intensa e altera os valores de velocidade das ondas eletromagnéticas. A atenuação do sinal implica na redução de amplitude e alteração no valor de velocidade da onda eletromagnética, aumentando o tempo de reflexão do sinal.

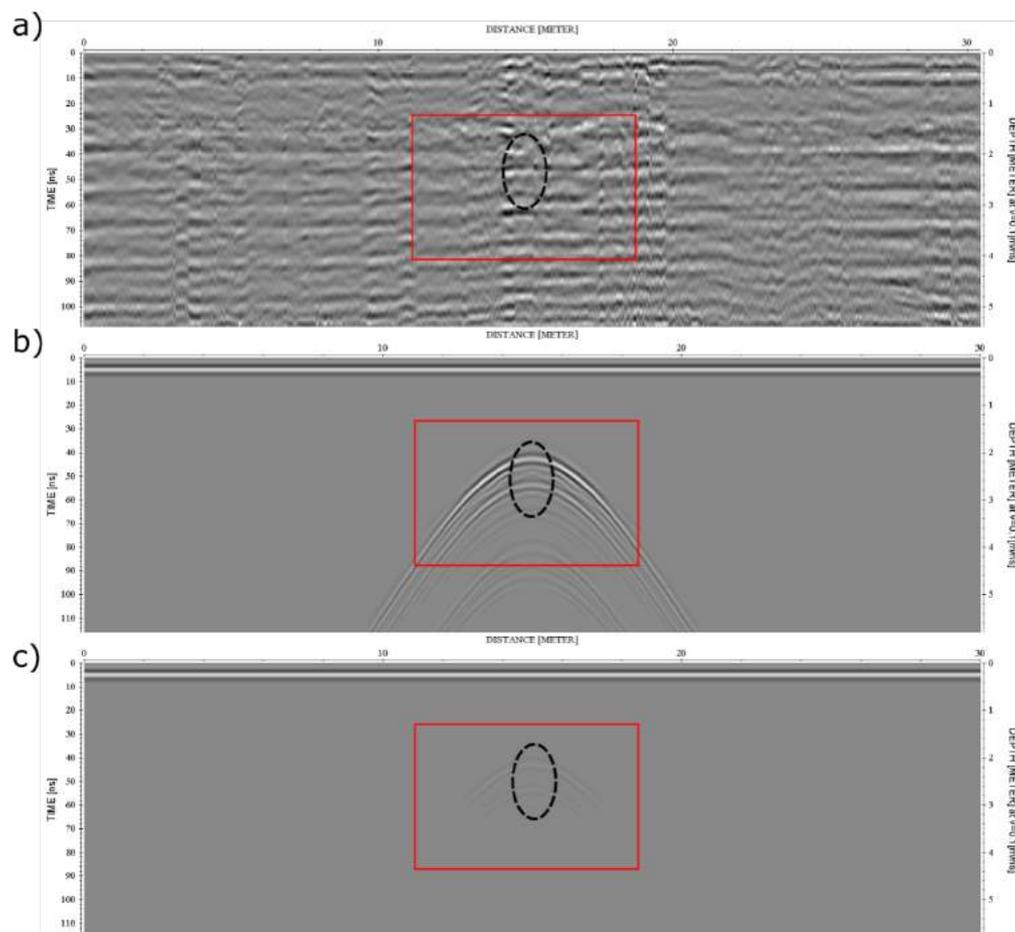


Figura 5.10: Radargramas. a) Perfil GPR-1 observado de 200 MHz após a rotina de processamento. b) Perfil GPR sintético de 200 MHz correspondente à simulação de uma cavidade inserida num meio resistivo (ver Figura 4.10). c) Perfil GPR sintético de 200 MHz correspondente à simulação de uma cavidade inserida num meio condutivo (ver Figura 4.11).

Com relação a atenuação, o uso de ganho no tempo, etapa incluída na rotina de processamento dos dados observados (como visto em 4.2, corrige esse efeito nos dados observados e torna as reflexões mais evidentes. Entretanto, com o aumento da atenuação no meio em decorrência da composição do material presente, as camadas condutivas em subsuperfície atuam como uma blindagem para a propagação do sinal eletromagnético e por mais que o ganho seja aplicado, se o sinal não é capaz de penetrar no meio, não haverá reflexões associadas ao alvo, como pode-se inferir após a análise realizada através da 5.10.

O padrão de “blindagem” do sinal inferido no exemplo do perfil GPR-1 persiste em todos os demais perfis GPR adquiridos na área de estudo. Através dos resultados da modelagem sugere-se que a “blindagem” do sinal esteja atrelada a características intrínsecas da área, ou seja, a condutividade do solo em decorrência de sua gênese e dos processos de evolução do terreno. Portanto, devido a essa limitação, torna-se inviável o uso do GPR como apoio na caracterização do sistema de túneis solo basáltico presentes na área de estudo.

5.3. Análise Tridimensional

Neste sub-item são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da geração dos blocos tridimensionais. São apresentados blocos-diagramas compostos por voxles resultantes da interpolação dos perfis geoeletricos apresentados e discutidos individualmente no sub-item 5.1. Com base nos resultados, discute-se sobre a análise tridimensional, i. e., o volume calculado de solo erodido pelo sistema de túneis no subsolo e o volume calculado de solo erodível em caso de colapso da estrutura, correspondente ao solo de propriedade friável com potencial para ocorrência de erosões em túneis no subsolo.

A Figura 5.11 mostra a distribuição tridimensional da resistividade na forma de um bloco diagrama 3D para a área de estudo. A partir do bloco é possível avaliar a correlação entre as anomalias verificadas na análise feita para cada perfil geoeletrico e delimitar indiretamente a variação pedológica do terreno, através dos parâmetros relacionados no sub-item 5.1.

Após as análises e interpretações discutidas no sub-item 5.1, o contorno de $600 \Omega\text{m}$ foi delimitado e assumiu-se este como a interface entre o sistema de túneis no subsolo e o solo arenoso do local (Figura 5.12).

O valor assumido de $600 \Omega\text{m}$, conforme indicado pelas sondagens, pode estar associado diretamente aos horizontes característico de ocorrência das cavidades (material grosseiro associado a finos) e por associação com observações de campo apresenta uma geometria consistente com o sistema de túneis no subsolo da área.

Ao observar a Figura 5.12, nota-se que as anomalias destacadas como elípticas no sub-item 5.1 (seções ERT-3 e ERT-4), vistas em 3D, apontam para uma geometria cilíndrica, característica de sistemas de túneis no subsolo, com volume aproximado de 400 m^3 . Neste caso, a geometria do sólido destacado, reforça a suposição de ocorrência de um canal secundário (perpendicular ao canal principal) que poderia acelerar o processo de evolução do

sistema, ou ainda, a suposição de uma ocorrência de um estrato com geometria aproximadamente linear e característica intrínsecas à ocorrência de túneis no subsolo (material grosseiro associado à finos) que, assim como um canal secundário, pode acelerar a evolução do sistema já existente, mas de forma menos expressiva.

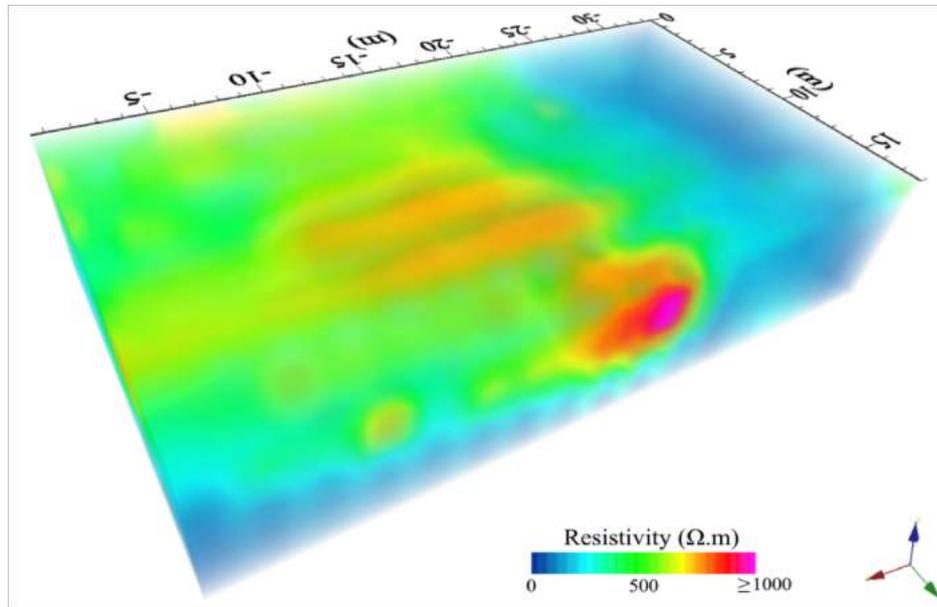


Figura 5.11: Bloco tridimensional de resistividade resultante da interpolação dos perfis geoeletricos.

Adicionalmente, o contorno de $250 \Omega\text{m}$ foi delimitado (Figura 5.13) e assumiu-se este como a interface entre o solo de material mais friável (arenoso), com associação ao sistema de túneis no subsolo, e o de material argiloso. O valor de $250 \Omega\text{m}$ corresponde ao limite superior de resistividade associado ao material argiloso identificado nas sondagens, associado aos horizontes de resistividade e aos valores identificados no perfil de *background*.

Na Figura 5.13, nota-se que a geometria destacada, vista em 3D, apresenta contatos horizontais e verticais. Com um volume aproximado de 1350 m^3 , os valores acima de $250 \Omega\text{m}$ (acima do *background*) podem estar associados a estratos arenosos e o forma indica que o sistema de túneis no subsolo ocorre inserido nestes estratos.

Por outro lado, observa-se que o valores inferiores a $250 \Omega\text{m}$ ocorrem abaixo da geometria destacada e na porção lateral (associada ao material argiloso pelas sondagens), indicando que abaixo do sistema os valores de resistividade tornam a voltar a níveis de *background*, o que por sua vez corrobora com as observações feitas em campo e com os mecanismos de formação dos túneis, i. e., abaixo da cavidade, o material apresenta características selantes que podem ser associadas a argilas.

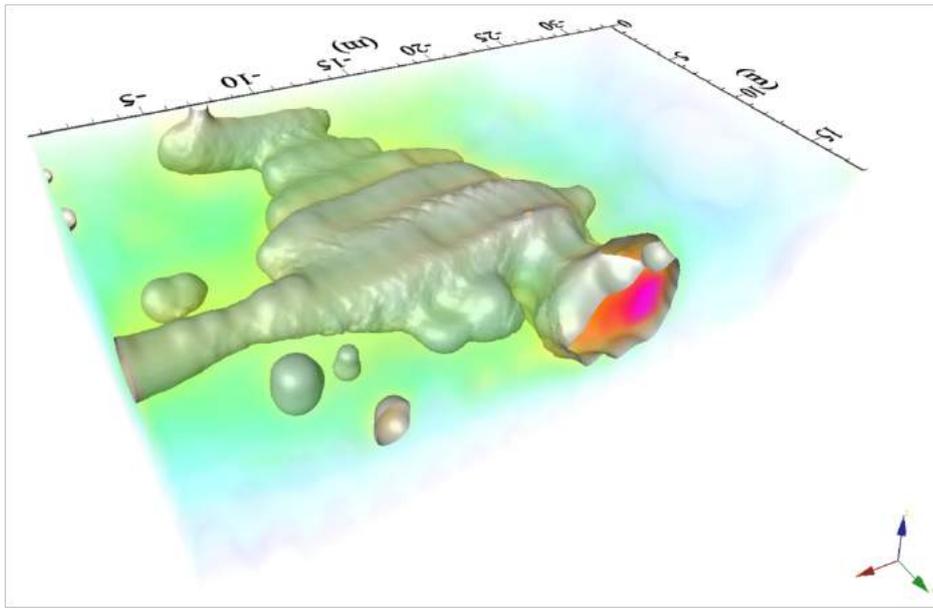


Figura 5.12: Bloco tridimensional de resistividade resultante da interpolação dos perfis ge-elétricos com destaque para a interface correspondente ao isovalor de 600 Ωm .

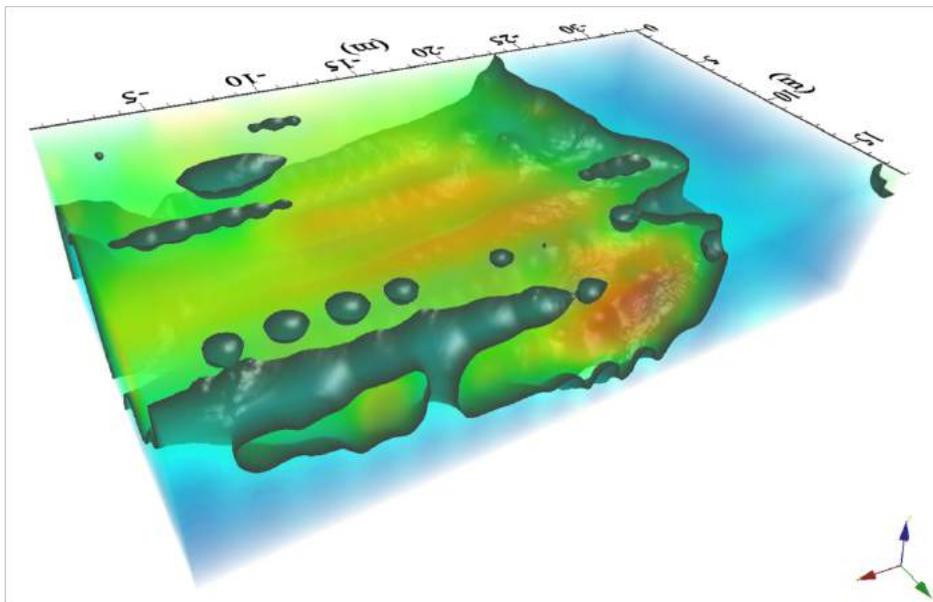


Figura 5.13: Bloco tridimensional de resistividade resultante da interpolação dos perfis ge-elétricos com destaque para a interface correspondente ao isovalor de 250 Ωm .

6. Conclusões

Nesta pesquisa, a ERT e o GPR foram utilizados para caracterizar o sistema de erosão em túneis no subsolo que ocorre na região de Candói, estado do Paraná. Os resultados foram analisados e interpretados em planos bidimensionais e blocos tridimensionais. As análises permitiram determinar a geometria do sistema de túneis, dimensionar uma parcela da estrutura em subsuperfície e delimitar áreas impactadas que, potencialmente, apresentam característica associadas a ocorrência dos túneis e, por consequência, risco de colapso.

Os perfis de ERT mostraram uma concordância entre as zonas de baixa resistividade e o material argiloso encontrado nas sondagens realizadas na área. O comportamento de baixa resistividade foi associado ao padrão de *background* da área, i. e., porções não influenciadas pelo sistema de túneis. Já os valores de resistividade acima do valor de *background* foram relacionados à materiais arenosos e grosseiros associados a finos, com características intrínsecas associadas à ocorrência de túneis no subsolo, além da própria presença dos espaços vazios associados aos próprios canais do sistema.

Os resultados de ERT apresentaram boas correlações com medidas diretas feitas através de observações de campo e furos de sondagens realizados na área de estudo em estudos prévios.

As análises bidimensionais possibilitaram a delimitação da área impactada pela presença do sistema de erosão em túneis que está sujeita à ação de processos erosivos mais acelerados. Ao decorrer do tempo, os processos erosivos implicarão no crescimento dos canais existentes até o eminente colapso do sistema. Além da área impactada delimitada, foi possível verificar a distribuição geométrica do canal principal e de um possível canal secundário, ortogonais entre si.

As análises tridimensionais permitiram avaliar a conectividade entre as anomalias identificadas previamente nas análises bidimensionais. Também foi possível estimar o volume de solo erodido, correspondente ao espaço vazio das cavidades, e o volume de solo que, devido as características pedológicas, associados ao sistema de túneis, apresenta alto potencial de erosão.

A análise dos resultados de modelagem de GPR, em conjunto com os dados adquiridos em campo, demonstrou que o método não foi aplicável na área para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa. A inviabilidade do método está associada à elevada condutividade elétrica do solo basáltico, conforme observado no perfil de ERT de *background* e nos materiais descritos nos furos de sondagens.

A interpretação das medidas geofísicas permitiu inferir a presença de canal secundário, entretanto esta não pode ser comprovada. Devido a ambiguidade inerente ao método ERT, a anomalia identificada pode estar relacionada à estratos que, assim como um canal, podem contribuir na alimentação do sistema de canalização, porém de forma menos proeminente.

Como seguimento desta pesquisa, sugere-se que sejam realizados ensaios geotécnicos na área impactada com vistas para tomada de medidas de parâmetros de controle de quantidade de sobrecarga suportada pelo terreno, por exemplo, resistência de penetração, porosidade, tensão admissível. Associado aos ensaios geotécnicos, sugere-se que sejam utilizadas metodologias, como regressão linear e métodos geoestatísticos, que permitam a análise de correlação entre as medidas geofísicas e os parâmetros geotécnicos.

Referências

- Annan A., GPR—History, trends, and future developments, *Subsurface sensing technologies and applications*, 2002, vol. 3, p. 253
- Anthony H. E., *Habits of Aplodontia*. order of the Trustees, American Museum of Natural History, 1916
- Arioli E., Licht O., Mapeamento geológico da formação Serra Geral: relatório final das folhas cartográficas de Dionísio Cerqueira e Francisco Beltrão, Curitiba, MINEROPAR, relatório técnico, 2006
- Arioli E., Licht O., , 2014 Mapeamento Geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná
- Aster R. C., Borchers B., Thurber C. H., *Parameter estimation and inverse problems*. Elsevier, 2018
- Aubertin G. M., Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement. vol. 192, Northeastern Forest Experiment Station, 1971
- Beasley R., Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watersheds to channel flow, *Soil Science Society of America Journal*, 1976, vol. 40, p. 955
- Benson A. K., Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities, *Journal of applied Geophysics*, 1995, vol. 33, p. 177
- Bernatek-Jakiel A., Gutiérrez F., Nadal-Romero E., Jakiel M., Exploring the frequency-size relationships of pipe collapses in different morphoclimatic regions, *Geomorphology*, 2019, vol. 345, p. 106845
- Bernatek-Jakiel A., Kondracka M., Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems, *Geomorphology*, 2016, vol. 274, p. 193
- Bernatek-Jakiel A., Poesen J., Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs, *Earth-Science Reviews*, 2018., vol. 185, p. 1107
- Berry L., Some erosional features due to piping and sub-surface wash with special reference to the Sudan, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1970, vol. 52, p. 113
- Bertolancini F., Popov D., , 2017. Cratera surge em lavoura da Bahia e 'engole' máquina agrícola
- Braga A. C. d. O., *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia*. Oficina de Textos, 2016

- Bryan R., RB B., WK H., et al., Factors controlling the initiation of runoff and piping in Dinosaur Provincial Park badlands, Alberta, Canada, 1978
- Burger H. R., Sheehan A. F., Jones C. H., Burger H. R., Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface. vol. 550, WW Norton New York, 2006
- Butler D. K., Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities, *Geophysics*, 1984, vol. 49, p. 1084
- Butler D. K., Near-surface geophysics. Society of Exploration Geophysicists, 2005
- Camargo G., Processos de erosão no centro e sul do segundo planalto paranaense:: evolução de encostas e influência da erosão subterrânea na expansão de voçorocas, 1998.
- Cardarelli E., Di Filippo G., Tuccinardi E., Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study, *Near Surface Geophysics*, 2006, vol. 4, p. 387
- Chamberlin T., Interflow in the mountainous forest soils of coastal British Columbia, *Mountain Geomorphology*, 1972, pp 121–127
- Cook J. C., Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitudes, *Geophysics*, 1965, vol. 30, p. 527
- Cook K. L., Van Nostrand R. G., Interpretation of resistivity data over filled sinks, *Geophysics*, 1954, vol. 19, p. 761
- Daniels D. J., Ground penetrating radar, *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, 2005
- Davis J. L., Annan A. P., Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1, *Geophysical prospecting*, 1989, vol. 37, p. 531
- De Vries J., Chow T., Hydrologic behavior of a forested mountain soil in coastal British Columbia, *Water Resources Research*, 1978, vol. 14, p. 935
- Dourado J. C., Malagutti Filho W., Braga A. C., Nava N., Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR, *Revista Brasileira de Geofísica*, 2001, vol. 19, p. 19
- El-Qady G., Hafez M., Abdalla M. A., Ushijima K., et al., Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar, *Journal of cave and karst studies*, 2005, vol. 67, p. 174
- Ellison L., The pocket gopher in relation to soil erosion on mountain range, *Ecology*, 1946, vol. 27, p. 101

- Fletcher J. E., Harris K., Soil piping, 1952.
- Fletcher J. E., Harris K., Peterson H., Chandler V., Piping, Eos, Transactions American Geophysical Union, 1954, vol. 35, p. 258
- Gaiser R., Root channels and roots in forest soils, Soil Science Society of America Journal, 1952, vol. 16, p. 62
- Greenfield R. J., Review of geophysical approaches to the detection of karst, Bulletin of the association of engineering geologists, 1979, vol. 16, p. 393
- Holden J., Hydrological connectivity of soil pipes determined by ground-penetrating radar tracer detection, Earth Surface Processes and Landforms, 2004, vol. 29, p. 437
- Holden J., Burt T., Vilas M., Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat, Earth surface processes and landforms, 2002, vol. 27, p. 235
- Hoover M. D., Water action and water movement in the forest, Forest Influence. Rome Food and Agricultural Organisation of the United Nation, 1962
- Hursh C., Hoover M., Soil Profile Characteristics Pertinent to Hydrologic Studies in the Southern Appalachians 1, Soil Science Society of America Journal, 1942, vol. 6, p. 414
- IPEADATA, 2020. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- Jol H. M., Ground penetrating radar theory and applications. elsevier, 2008
- Jones A., Soil piping and stream channel initiation, Water Resources Research, 1971, vol. 7, p. 602
- Jones J., The effects of soil piping on contributing areas and erosion patterns, Earth Surface Processes and Landforms, 1987, vol. 12, p. 229
- Jones J., Pipe and piping, Encyclopedia of geomorphology, 2004, vol. 2, p. 784
- Kearey P., Brooks M., Hill I., Geofísica de exploração. Oficina de Textos, 2009
- Koefoed O., et al., Geosounding principles, 1. Resistivity sounding measurements, 1979
- Kofman L., Ronen A., Frydman S., Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records, Journal of Applied geophysics, 2006, vol. 59, p. 284
- Krynine P. J., Krynine D. P., Judd W. R., Principles of engineering geology and geotechnics: geology, soil and rock mechanics, and other earth sciences as used in civil engineering. McGraw-Hill College, 1957

- Laffan M., Cutler E., Landscapes, soils, and erosion of a catchment in the Wither Hills, Marlborough. 2. Mechanism of tunnel-gully erosion in Wither hill soils from loessial drift and comparison with other loessial soils in the South Island [New Zealand], *New Zealand Journal of Science (New Zealand)*, 1977
- Leslie I., Heinse R., Characterizing soil-pipe networks with pseudo-three-dimensional resistivity tomography on forested hillslopes with restrictive horizons, *Vadose Zone Journal*, 2013, vol. 12, p. 1
- Loke M., Res2DINV software user's manual, University Sains Malaysia, Penang, 1997
- Loke M. H., , 2004 Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys
- Loke M. H., Barker R. D., Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1, *Geophysical prospecting*, 1996, vol. 44, p. 131
- Lundgren L., Studies of soil and vegetation development on fresh landslide scars in the Mgeta Valley, Western Uluguru Mountains, Tanzania, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1978, vol. 60, p. 91
- Lutz H. J., Griswold F. S., The influence of tree roots on soil morphology, *American Journal of Science*, 1939, vol. 237, p. 389
- Mascarello L., Camargo Filho M., Caracterização de cone de dejeção associado à erosão em voçoroca com caráter ocorrente descontínuo em encosta: a Encosta Guairacá, Guarapuava (PR)-Brasil., *Anais do VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 2006
- Mathias R., Silva W., Identificação de feições erosivas e mecanismos presentes em túneis na encosta do rio Boca Apertada , Candói, PR., *Revista Geonorte*, 2014., vol. 5, p. 151
- Militzer H., Rösler R., Lösch W., Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods, *Geophysical Prospecting*, 1979, vol. 27, p. 640
- Neal A., Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-science reviews*, 2004, vol. 66, p. 261
- Newson M., Soil piping in upland Wales; a call for more information, *Cambria*, 1976, vol. 1, p. 33
- Orlando L., GPR to constrain ERT data inversion in cavity searching: Theoretical and practical applications in archeology, *Journal of Applied Geophysics*, 2013, vol. 89, p. 35
- Pierson T., Soil pipes and slope stability, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1983, vol. 16, p. 1

- Porsani J., Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado–SP. 1999. 145 p, Tese (Doutorado em Geociências)–Curso de Pós-Graduação em Geociências – UNESP – Rio Claro, 1999, Tese de Doutorado
- Prego F., Solla M., Puente I., Arias P., Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes, *NDT & E International*, 2017, vol. 91, p. 22
- Price L. W., Geomorphic effect of the arctic ground squirrel in an alpine environment, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1971, vol. 53, p. 100
- Putiška R., Nikolaj M., Dostál I., Kušnirák D., Determination of cavities using electrical resistivity tomography, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 2012, vol. 42, p. 201
- Reeve R. C., Kirkham D., Soil anisotropy and some field methods for measuring permeability, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1951, vol. 32, p. 582
- Reynolds J. M., *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, 2011
- Rodda J., Institute of Hydrology research report, 1976-8., 1978
- Sandmeier K., *ReflexW manual*, Sandmeier scientific software, 2007
- Schrott L., Sass O., Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies, *Geomorphology*, 2008, vol. 93, p. 55
- Şeren A., Babacan A. E., Gelişli K., Öğretmen Z., Kandemir R., An investigation for potential extensions of the Karaca Cavern using geophysical methods, *Carbonates and Evaporites*, 2012, vol. 27, p. 321
- Silva W. B. d., *Origem e evolução de túneis em formações superficiais derivadas de basalto em clima subtropical úmido*, Candói, Paraná, 2017.
- Telford W. M., Telford W., Geldart L., Sheriff R. E., Sheriff R. E., *Applied geophysics*. Cambridge university press, 1990
- TerraSIRch S., *System-3000 User's Manual*, Geophysical Survey Systems Inc., Salem, NH, 2004
- Thorn C. E., A preliminary assessment of the geomorphic role of pocket gophers in the alpine zone of the Colorado Front Range, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1978, vol. 60, p. 181

- Tremocoldi W. A., Mineralogia dos silicatos e dos óxidos de ferro da fração argila de solos desenvolvidos de rochas básicas no Estado de São Paulo, *Revista Biociências*, 2003, vol. 9
- Ungureanu C., Priceputu A., Bugea A. L., Chirică A., Use of electric resistivity tomography (ERT) for detecting underground voids on highly anthropized urban construction sites, *Procedia engineering*, 2017, vol. 209, p. 202
- Utsi E. C., *Ground penetrating radar: theory and practice*. Butterworth-Heinemann, 2017
- Verachtert E., Maetens W., Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Deckers J., Soil loss rates due to piping erosion, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011., vol. 36, p. 1715
- Ward S. H., *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial: Volume I: Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysicists, 1990
- Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I., gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, *Computer Physics Communications*, 2016, vol. 209, p. 163
- Whipkey R. Z., Subsurface stormflow from forested slopes, *Hydrological Sciences Journal*, 1965, vol. 10, p. 74
- Zaslavsky D., Kassiff G., Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils, *Geotechnique*, 1965, vol. 15, p. 305

Anexos

Descrição das sondagens T9, T10, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T35 e T36.

Sondagem	Amostra	Profundidade	Textura	Observação
T9	T9-1	0 - 0,27	Arenosa	Raízes e calhaus
T9	T9-2	0,27 - 0,37	Arenosa	Grânulos
T9	T9-3	0,37 - 0,43	Areno-argilosa	Calhaus
T9	T9-4	0,43 - 0,9	Areno-argilosa	Muitos seixos
T9	T9-5	0,9 - 1,2	Areno-argilosa	Muitos seixos
T9	T9-6	1,2 - 1,32	Arenosa	Muitos seixos
T9	T9-7	1,32 - 1,56	Areno-argilosa	Linha de pedra, seixos e grânulos
T9	T9-8	1,56 - 1,88	Areno-argilosa	-
T9	T9-9	1,88 - 2,4	Areno-argilosa	-
T9	T9-10	2,4-2,45	Areno-argilosa	-
T10	T10-1	0 - 0,2	Arenosa	Raízes
T10	T10-2	0,2 - 0,28	Arenosa	Raízes
T10	T10-3	0,28 - 0,7	Areno-argilosa	Muitos seixos
T10	T10-4	0,7 - 1,14	Areno-argilosa	-
T10	T10-5	1,14 - 1,2	Areno-argilosa	Seixos e grânulos
T15	T15-1	0 - 0,27	Arenosa	Raízes, grânulos, fragmentos de rocha
T15	T15-2	0,27 - 0,6	Areno-siltosa	Muitos grânulos
T16	T16-1	0 - 0,3	Arenosa	Raízes, carvão
T16	T16-2	0,3 - 0,5	Areno-siltosa	Raízes, linha de pedra
T17	T17-1	0 - 0,43	Areno-siltosa	Seixos próximos a superfície, raízes, mistura de materiais
T17	T17-2	0,43 - 0,72	Silto-argilosa	Mais argila
T18	T18-1	0 - 0,84	Areno-argilosa	Raízes, grânulos, material preto e alaranjado
T19	T19-1	0 - 0,6	Arenosa	Linha de pedra, grânulos, material alaranjado
T19	T19-2	0,6 - 0,68	Argilosa	Linha de pedra, mistura de materiais
T20	T20-1	0 - 0,23	Arenosa	Raízes, seixos
T20	T20-2	0,23 - 0,55	Areno-argilosa	Linha de pedra
T20	T20-3	0,55 - 0,84	Areno-argilosa	Material mais grosseiro
T20	T20-4	0,84 - 0,9	Areno-argilosa	Seixos, linha de pedra

T20	T20-5	0,9 - 1,1	Argilo-siltosa	Material heterogênio
T35	T35-1	0 - 0,28	Areno-argilosa	Quartzo
T35	T35-2	0,28 - 0,4	Argilosa	Quartzo, pedregulho
T35	T35-3	0,4 - 1,01	Argilosa	-
T35	T35-4	1,01 - 1,27	Argilosa	Nódulos de ferro, quartzo
T35	T35-5	1,27 - 1,6	Argilosa	Grânulos, nódulos de ferro, quartzo
T35	T35-6	1,6 - 1,71	Argilosa	-
T35	T35-7	1,71 - 2,02	Argilosa	-
T35	T35-8	2,02 - 2,36	Argilosa	-
T35	T35-9	2,36 - 2,49	Argilosa	-
T35	T35-10	2,49 - 2,61	Argilosa	Rocha amarela acimentada
T36	T36-1	0 - 0,42	Areno-argilosa	Raízes
T36	T36-2	0,42 - 0,65	Argilosa	-
T36	T36-3	0,65 - 1,08	Argilosa	Quartzo
T36	T36-4	1,08 - 1,37	Argilosa	Linha de pedra
T36	T36-5	1,37 - 1,45	Argilosa	-
T36	T36-6	1,45 - 1,96	Argilosa	Quartzo, linha de pedra
T36	T36-7	1,96 - 2,21	Argilo-arenosa	-
