

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUILHERME HENRIQUE LENZ

**ESTUDOS GEOFÍSICOS EM ATERRO CONTROLADO,
CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Caçapava do Sul

2016

GUILHERME HENRIQUE LENZ

**ESTUDOS GEOFÍSICOS EM ATERRO CONTROLADO,
CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geofísica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales.

Caçapava do Sul

2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L575 Lenz, Guilherme Henrique

Estudos Geofísicos em Aterro Controlado, Caçapava do Sul – RS/ Guilherme
Henrique Lenz.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2016.

"Orientação: Mário Jesus Tomas Rosales".

1. Geofísica. 2. Eletrorresistividade. 3. Radar de Penetração de Solo. 4. Aterro.
5. Contaminação. I. Título.

GUILHERME HENRIQUE LENZ

**ESTUDOS GEOFÍSICOS EM ATERRO CONTROLADO,
CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Geofísica da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em: 01 de dezembro de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales.
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich
UNIPAMPA

Prof. Me. Hasan Shihadeh
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio.

A colega e companheira Yasmin pela parceria diária.

Aos colegas Jean, Victor e Vinícius pelas saídas de campo.

Aos técnicos Lenon, Marcelo e Guilherme pelo auxílio em campo e em laboratório.

Aos professores Hasan e Marcus pela prontidão em ajudar.

Ao professor Mário pela orientação, liberdade e confiança na execução deste trabalho.

A Prefeitura Municipal de Caçapava do Sul, pela liberação da área de estudo.

A Universidade como um todo, por possibilitar a realização deste trabalho.

RESUMO

Antigo depósito de resíduos na cidade de Caçapava do Sul apresenta uma alta probabilidade de contaminação nas águas superficiais e subterrâneas nas proximidades da área. Este trabalho utiliza métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e radar de penetração de solo, em conjunto com análises químicas da água para tentar identificar e delimitar essa provável contaminação. O embasamento da região é formado por rochas metamórficas em baixa profundidade, aproximadamente 7 metros e fraturadas. As análises químicas das águas superficiais da área apresentam alguns parâmetros dentro do considerado potável, apesar da aparente contaminação. Dados de eletrorresistividade na área apresentam valores com resistividades relativamente baixas, menores que 70 Ohm metro, provavelmente ligadas à presença do chorume gerado pelos resíduos do antigo depósito. O sinal de radar de penetração de solo sofre muita atenuação devido à baixa resistividade do meio. Uma possível fratura foi localizada na seção de caminhamento elétrico.

Palavras-Chave: Geofísica, Eletrorresistividade, Radar de penetração no solo. Contaminação, Aterro.

ABSTRACT

An old landfill in the city of Caçapava do Sul presents a high probability of contamination on surface and ground water in the vicinity of the area. This work uses the geophysical methods of electrical resistivity, induced polarization and ground penetrating radar, together with chemical analyzes of water to try to identify and delimit this probable contamination. The bedrock of the region is formed by metamorphic rocks at low depth, about 7 meters and fractured. The chemical analyzes of the surface waters of the area present some parameters within the considered drinking, despite the apparent contamination. Resistivity data in the area of work values with relatively low resistivities, in the order of less than 70 ohm meter, are linked to the presence of the leachate generated by the waste from the old landfill. The ground penetrating radar signal suffers a great attenuation due to the low resistivity of the area. A possible fracture was located in the electric lateral profiling section.

Key words: Geophysics, Electrical resistivity, Ground Penetrating Radar, Contamination, Landfill.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 1 – Estudos geofísicos realizados em depósitos de resíduos.....	11
Figura 1 – Seção de CE realizado na área de estudo em 2011, sentido N-S.....	16
Figura 2 – Localização da área de estudo.....	17
Figura 3 – Imagem de satélite da área de estudo.....	17
Figura 4 – Detalhes da área de estudo.....	18
Figura 5 – Unidades geotectônicas do Escudo Sul Riograndense.	19
Figura 6 – Geologia local da área de estudo.	21
Figura 7 – Modelo Digital de Elevação de Terreno.....	22
Figura 8 – Fluxograma da metodologia do trabalho.	23
Figura 9 – Direção do fluxo de corrente em um semi-espaço.....	25
Figura 10 – Valores de resistividade comuns de solos e rochas.....	26
Figura 11 – Modelo esquemático do funcionamento da SEV, utilizando arranjo Wenner.....	27
Figura 12 – Modelo esquemático do caminhamento elétrico, utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo.....	28
Figura 13 – Modelo esquemático do efeito de polarização de eletrodo.....	29
Figura 14 – Modelo esquemático do efeito de polarização de membrana.....	30
Figura 15 – Curva resultado do efeito de polarização induzida.....	30
Figura 16 – Relação vetorial ortogonal, entre \vec{E} , \vec{B} e \hat{k}	33
Figura 17 – Modelo de atenuação do sinal em ambientes de baixa perda.....	34
Tabela 2 – Relação entre frequência da antena e profundidade de investigação.....	35
Figura 18 – Modelo simplificado de um sistema de aquisição GPR.....	36
Figura 19 – Modelo esquemático de aquisição GPR, utilizando o arranjo <i>constant offset</i> , juntamente com modelo do sinal obtido.....	36
Tabela 3 – Parâmetros analisados em laboratório.....	37
Figura 20 – Syscal PRO e RIS One.....	38
Figura 21 – Localização das SEVs, linhas de GPR e CE, pontos de amostragem de águas superficiais.....	39
Figura 22 – Fluxograma do processamento realizado no IPI2IN para os dados de SEV E IP.....	40
Figura 23 – Fluxograma do processamento realizado no PRISM para os dados de GPR.....	41
Figura 24 – Fluxograma do processamento realizado no RES2DINV para os dados de CE.....	41
Figura 25 – Medidas geoestruturais obtidas nos afloramentos da área de estudo.....	42
Figura 26 – Estereograma estrutural da geologia local.....	42

Tabela 4 – Resultado das análises laboratoriais das amostras de água.....	43
Figura 27 – Curva de resistividade, camadas e cargabilidade da SEV 1.....	44
Tabela 5 – Interpretação das camadas apresentadas na SEV 1.....	44
Figura 28 – Curva de resistividade, camadas e cargabilidade da SEV 2.....	45
Tabela 6 – Interpretação das camadas apresentadas na SEV 2.....	45
Figura 29 – Curva de resistividade, camadas e cargabilidade da SEV 3.....	46
Tabela 7 – Interpretação das camadas apresentadas na SEV 3.....	46
Figura 30 – Detalhe afloramento em corte.....	47
Figura 31 – Seção de CE, sentido N-S.....	48
Figura 34 – Detalhe de possível fratura no CE.....	48
Figura 31 – Radargrama das linhas 01 e 02 de GPR.....	49
Figura 32 – Radargrama das linhas 03 e 04 de GPR.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A e B – Eletrodos de corrente

B – Fluxo magnético

CE – Caminhamento elétrico

D – Fluxo elétrico

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

ϵ – Permissividade dielétrica

ESRG – Escudo Sul rio-grandense

Ga – Bilhões de anos

GPR – Ground Penetration Radar – Radar de Penetração no Solo

H – Campo magnético

I – Corrente elétrica

IP – Polarização induzida

J – Densidade de corrente

K – Fator geométrico

km – Quilômetro

m – Metro

M e N – Eletrodos de potencial

Ma – Milhões de anos

MDT – Modelo digital de elevação de terreno

MHz – Mega Hertz

η – Cargabilidade

R – Resistência elétrica

r – Raio

ρ – Resistividade

Rx – Antena receptora

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

σ – Condutividade

SP – Potencial espontâneo

t – Tempo

Tx – Antena transmissora

μ – Permeabilidade magnética

ΔV – Diferença de potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Geral	12
1.1.2 Específico	12
1.3 Justificativa.....	12
2 ESTUDOS DE REFERÊNCIA	13
3 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO.....	16
3.1 Localização e acesso.....	16
3.2 Geologia regional	19
3.3 Geologia local.....	20
3.4 Modelo digital de elevação do terreno	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
6.1 Métodos geoeletricos.....	23
6.1.1 Eletroresistividade.....	24
6.1.2 Polarização induzida – IP	29
6.2 Métodos eletromagnéticos.....	31
6.2.1 Radar de Penetração de Solo – GPR	32
6.3 Análise laboratorial de águas.....	37
6.4 Análise geoestrutural	37
6.5 Equipamentos e aquisição	37
6.6 Processamentos e análises	40
7 RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	41
7.1 Resultados e discussões	42
7.2 Considerações	51
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

A preocupação da sociedade com o meio ambiente tem aumentado ao decorrer das últimas décadas e apesar dos esforços crescentes de algumas organizações e de parte da população, ainda ocorrem, por ações do passado ou do presente, alguns eventos onde ele é prejudicado.

Um caso comum de contaminação ambiental é a existência de depósitos de resíduos sólidos, comumente chamados de lixões, onde muitas vezes não existe nenhuma preparação para o recebimento desses resíduos, que por sua vez acabam por gerar através de processos físicos, químicos e biológicos um líquido característico, chamado de chorume, que possui alta quantidade de substâncias perigosas e tóxicas, contaminando as águas e solos em que entra em contato.

Os depósitos de resíduos sólidos podem ser divididos, segundo a Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT), em três categorias:

- Lixão: são vazadouros a céu aberto e sem nenhum tratamento;
- Aterro controlado: os resíduos recebem uma cobertura de solo/vegetação, porém o aterro controlado não recebe nenhum tratamento (ABNT-NBR 8849/1985);
- Aterro sanitário: depósito ideal por ser uma área impermeabilizada, com drenagens, tratamentos e monitoramento para o líquido percolado (chorume) e os gases gerados (ABNT-NBR 8419/1992).

Entre 2010 e 2014 o Brasil passou por um processo de desativação de lixões e aterros controlados, atualmente somente aterros sanitários são permitidos no país. Apesar dessa desativação de lixões e aterros controlados, a sua contaminação ainda é presente, sendo necessário o monitoramento e remediação de áreas contaminadas.

A utilização de métodos geofísicos na caracterização dessas áreas de passivo ambiental tem mostrado diversos resultados positivos, alguns deles abordados em seções futuras neste trabalho, principalmente por sua praticidade e confiabilidade, isto devido ao grande contraste de propriedades físicas entre o material poluente e o poluído.

1.1 Objetivos

O presente projeto tem como objetivo realizar um estudo geofísico em um antigo lixão na cidade de Caçapava do Sul – Rio Grande do Sul (RS), que funcionou de 1980 a 1994 e sem nenhum tipo de controle ou tratamento, em seu encerramento recebeu um camada de solo e houve o replantio de algumas árvores, se tornando um aterro controlado desativado.

1.1.1 Geral

Este trabalho possui como objetivo geral realizar um estudo geofísico na área de um antigo aterro controlado baseado no contraste de propriedades elétricas e eletromagnéticas do meio, utilizando métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida (*Induced Polarization – IP*) e radar de penetração de solo (*Ground Penetration Radar – GPR*).

1.1.2 Específico

- Delimitar a espessura e a sequência das camadas em subsuperfície;
- Identificar fraturas em subsuperfície;
- Estimar a profundidade do lençol freático;
- Verificar a presença de uma possível pluma de contaminação;
- Realizar uma análise química na água superficial da área.

1.3 Justificativa

O contraste de propriedades físicas obtidas por métodos geofísicos entre resíduos de aterros com o solo e rochas adjacentes permite uma boa estimativa da geometria do aterro, além de possibilitar a localização de uma provável pluma de contaminação.

A determinação da geometria do aterro e da provável pluma de contaminação poderá servir de subsídio para uma ação ambiental com objetivo de remediar a situação do local.

O monitoramento desse aterro é um projeto antigo e de interesse da Prefeitura de Caçapava do Sul, no qual este trabalho pode servir de base juntamente com outros estudos já realizados na área por Oliveira et al. (2010) e Moreira et al. (2011).

2 ESTUDOS DE REFERÊNCIA

Existem diversos estudos utilizando a geofísica como ferramenta para auxílio em estudos ambientais, incluindo estudos de aterros, que são cada vez utilizados por sua característica não evasiva, seu baixo custo, ampla cobertura e rapidez.

Para uma visualização mais rápida e seletiva, segue a Tabela 1 com a descrição de alguns casos onde estiveram presentes estudos geofísicos relacionados diretamente a depósitos de resíduos:

Tabela 1 – Estudos geofísicos realizados em depósitos de resíduos.

Autor	Método/Técnica Geofísica	Descrição
Bernstone et al. (2000)	SEV	Detectaram a contaminação, mas não sua extensão.
Cavalcanti et al. (2000)	SEV-IP-SP	Determinaram o fluxo da água subterrânea e a profundidade do embasamento, sem sucesso na identificação de uma pluma de contaminação.
Godio (2000)	EM-MAG	Determinaram concentração de resíduos metálicos em um aterro industrial.
Carlson et al. (2001)	IP	Tentaram delimitar um aterro, mas problemas com eletrodos não ideais e uma inversão ambígua.
Stanton & Schrader (2001)	CE-EM-MAG	Identificaram cinco anomalias em um aterro com características distintas.
Ellis & Zuquette (2002)	SEV-CE	Detectaram pluma de contaminação.
Shiraiwa et al. (2002)	SEV-EM-GPR	Detectaram pluma de contaminação.
Moura e Mallagutti Filho (2003)	CE-IP	Delimitar a geometria do aterro.
Okpoli (2003)	CE	Detectaram pluma de contaminação.
Porsani et al. (2003)	SEV-GPR	Detectaram pluma de contaminação.

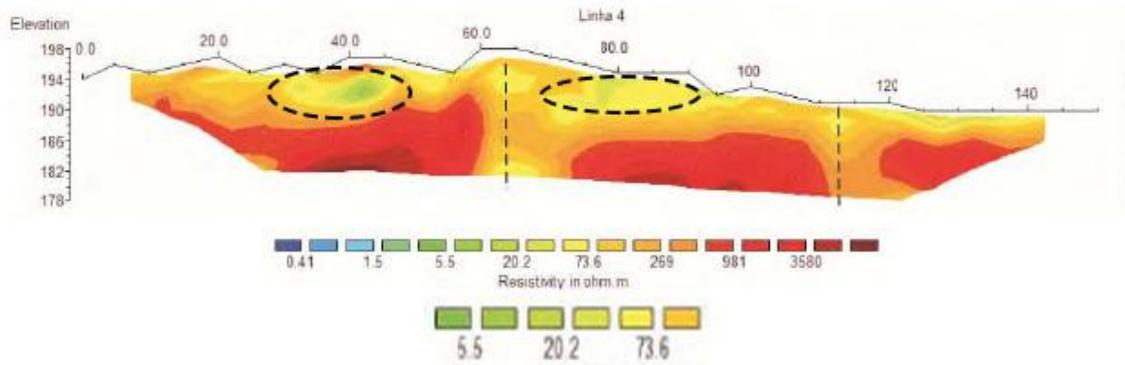
Samsudin et al. (2003)	CE	Detectaram pluma de contaminação.
Abu-Zeid et al. (2004)	CE-IP	Lençol freático de alta salinidade impossibilitou o estudo.
Mota et al. (2004)	SEV-CE	Detectaram pluma de contaminação.
Stevanato et al. (2004)	SEV-CE-IP	Detectaram pluma de contaminação.
Braga & Cardinali (2005)	SEV-CE-IP	Analisaram evolução da contaminação.
Depountins et al. (2005)	CE	Analisaram evolução da contaminação.
Olofsson et al. (2005)	CE-EM-GPR	Detectaram pluma de contaminação.
Santos (2005)	SEV-CE-EM	Analisaram evolução da contaminação.
Xavier & Berkenbrock (2005)	SEV-CE	Detectaram pluma de contaminação.
Al-Tarazi (2006)	SEV	Detectaram pluma de contaminação.
Lago et al. (2006)	SEV-CE-IP-SP	Detectaram pluma de contaminação.
Martinho & Almeida (2006)	CE-IP	Detectaram pluma de contaminação.
Hu & Wuang (2006)	GPR	Detectaram depósitos clandestinos de lixo.
Fachin (2007)	CE-IP	Avaliaram de parâmetros de aquisição para monitoramento ambiental.
Laureano (2007)	CE-EM-GPR	Detectaram pluma de contaminação.
Mondeli et al. (2006)	CE	Detectaram pluma de contaminação.
Pereira & Lima (2007)	SEV	Detectaram pluma de contaminação.
Pujari et al. (2007)	GPR	Detectaram pluma de contaminação.
Al-Tarazi et al. (2008)	VLF	Detectaram pluma de contaminação.
Moreira & Braga (2008)	IP	Avaliaram a variação da resposta ao longo de uma pluma de contaminação.
Moreira et al. (2008)	CE	Analisaram evolução da contaminação.
Ustra (2008)	CE-IP	Mapearam a pluma de contaminação em 3D.
Mantlik et al. (2009)	GRAV	Delimitaram geometricamente o aterro.

Bortolin & Mallagutti Filho (2010)	SEV-CE	Analísaram evolução da contaminação.
Dahlin et al. (2010)	CE-IP	Delimitaram geometricamente o aterro.
Leroux et al. (2010)	CE-IP	Avaliaram a variação da resposta em aterros com diferentes materiais.
Santos et al. (2010)	CE-SP	Delimitaram geometricamente o aterro.
Fontoura (2011)	SEV-CE-IP- GPR-MASW	Detectaram pluma de contaminação.
Moreira et al. (2011)	SEV	Analísaram evolução da contaminação.
Fachin (2012)	SP	Avaliaram os parâmetros que interferem na reposta em um aterro.
Moreira et al. (2012)	SEV-CE	Estimaram a movimentação do chorume.
Ustra (2013)	IP	Avaliaram os parâmetros que interferem na reposta em um aterro.
Çnar et al. (2015)	CE-GAMA	Delimitaram geometricamente o aterro.
Ikhifa & Umego (2015)	VLF	Detectaram pluma de contaminação.
Onojasun (2015)	CE	Detectaram pluma de contaminação.

Legenda Tabela 1: SEV- Sondagem elétrica vertical, CE- Caminhamento Elétrico, IP- Polarização Induzida, SP- Potencial Espontâneo, EM- Eletromagnético Transiente, GPR- Radar de Penetração no Solo, MASW- Sísmica Multicanal, VLF- Eletromagnético de Baixa Frequência, GRAV- Gravimetria, GAMA- Gamaespectrometria. Fonte: Autor (2016).

A rea de estudo deste trabalho já foi alvo de estudos geoltricos relacionados à presença do aterro controlado, o trabalho em questão envolveu os métodos de polarização induzida (IP) e eletrorresistividade com a técnica de caminhamento elétrico (CE), onde foi localizado áreas de baixa resistividade, conforme Figura 1, onde os autores relacionaram  presença de chorume, além de duas possíveis fraturas por onde o chorume pode estar percolando (OLIVEIRA et al. 2010; MOREIRA et al.2011).

Figura 1 – Seção de CE realizado na área de estudo em 2011, sentido N-S.



Fonte: modificado de Moreira et al. (2011).

3 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo corresponde a um antigo aterro controlado já desativado, cedida gentilmente pela Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Caçapava do Sul – RS.

3.1 Localização e acesso

A área de estudo está localizada na zona rural da cidade de Caçapava do Sul – RS, seu acesso se dá pela Rua João Carlos O. Torres, aproximadamente 5 quilômetros (km) de distância da Unipampa campus Caçapava do Sul e 4 km do centro da cidade.

A área possui aproximadamente 11.000 metros (m) quadrados, as suas delimitações estão coordenadas 258248 mE, 6624724 mN; 258247 mE, 6624823 mN; 258313 mE, 6624893 mN; 258325 mE, 6624695 mN, zona 22J, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum *World Geodetic System 84* (WGS84).

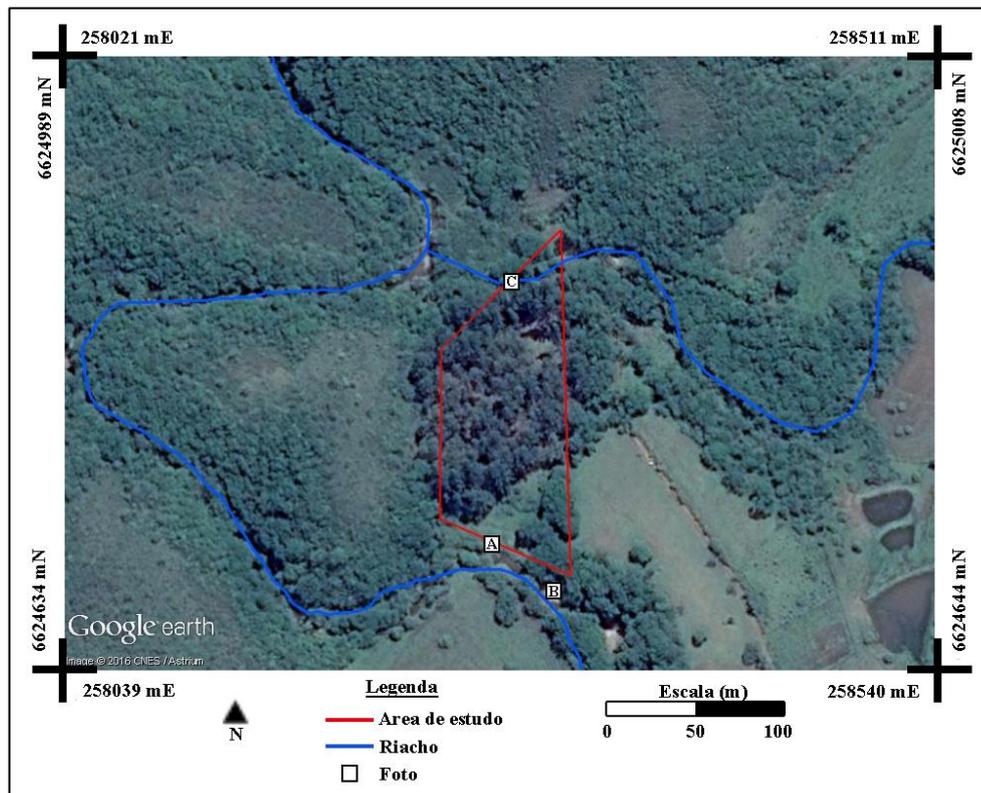
A Figura 2 mostra a localização da área e suas vias de acessos, enquanto a Figura 3 mostra a imagem de satélite da área de estudo e seus limites. A área é delimitada por cercas de arame com terrenos vizinhos e é cortado por dois pequenos riachos, um ao sul e outro ao norte da área, os dois riachos correm no sentido E-W. A Figura 4 apresenta fotos em detalhes da área de estudo, os pontos de localização dessas fotos são apresentados na Figura 3.

Figura 2 – Localização da área de estudo.



Fonte: modificado de Google Maps (2016).

Figura 3 – Imagem de satélite da área de estudo.



Fonte: modificado de Google Earth (2016).

Figura 4 – Detalhes da área de estudo.



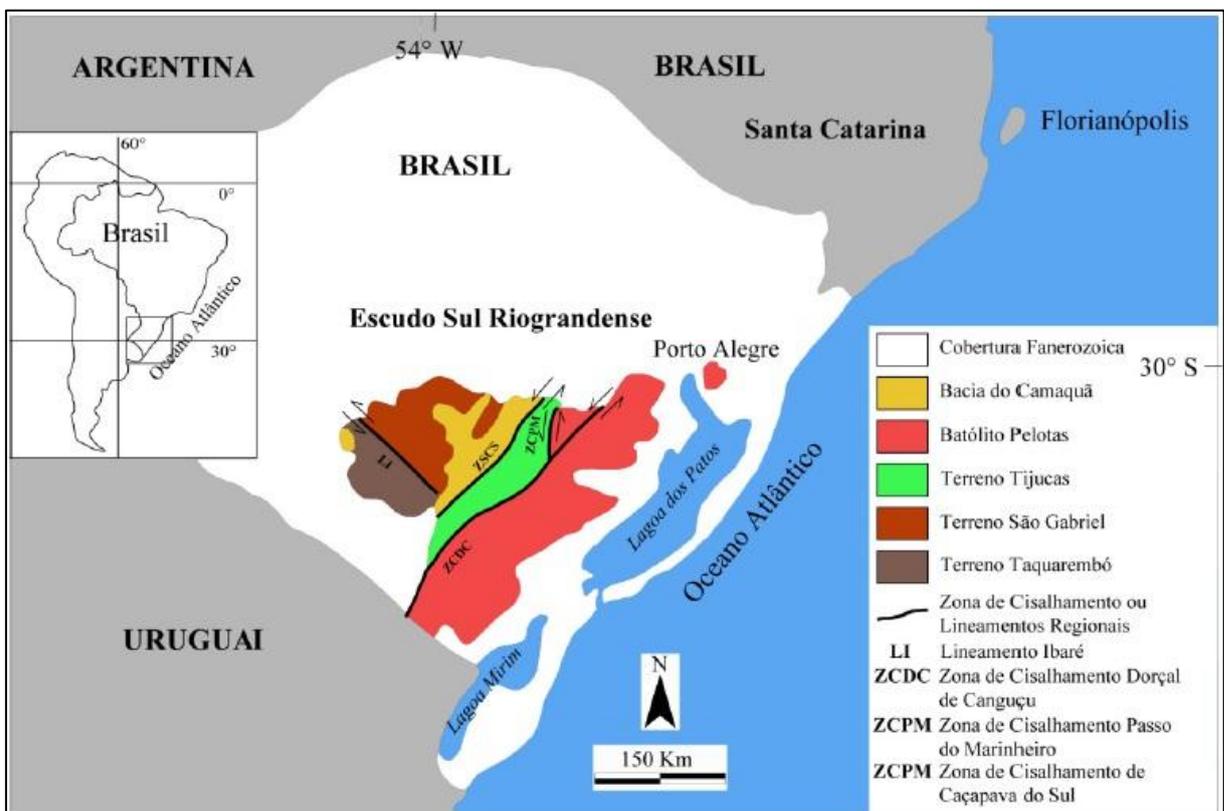
Legenda Figura 4: A1- Afloramento de mica-xisto, fraturado na direção NE-SW. A2- Camadas de solo e de lixo na encosta do riacho sul. B- Afloramento de mica-xisto, fraturado na direção 15° NE-SW, com mergulho de aproximadamente 35°. C- Visão do riacho norte. Fonte: Autor (2016).

3.2 Geologia regional

Geologicamente, o Rio Grande do Sul registra uma história prolongada de colisões entre continentes, assoalhos oceânicos, arcos de ilhas, vulcões e bacias sedimentares, registrado atualmente nas rochas que compõem a superfície do estado.

O Escudo Sul Riograndense (ESRG) é o resultado de processos de geração e deformação de crosta continental, cuja contribuição maior ocorreu em dois ciclos orogênicos, o Transamazônico (2,26-2,00 bilhões de anos (Ga)) e o Brasileiro (900-535 milhões de anos (Ma)). Cada ciclo incluiu a extração de magmas e, possivelmente também, de porções sólidas do manto, com a decorrente construção de crosta oceânica (planície basáltica e sedimentos abissais, platôs oceânicos, ilhas oceânicas), presença de micro continente nos oceanos, arcos de ilhas vulcânicos nos oceanos e nas margens continentais. Essas associações de rochas colidiram sequencialmente e contribuíram para o crescimento da porção sul do Continente Sul-Americano (HARTMANN, 1998). Na Figura 5 podem-se ver as principais unidades geotectônicas do ESRG.

Figura 5 – Unidades geotectônicas do Escudo Sul Riograndense.



Fonte: modificado de Philipp (2010).

Bicca (2014) descreveu as unidades geotectônicas do ESRG da seguinte forma:

Batólito Pelotas: esta unidade é representada predominantemente por rochas graníticas com idade entre 650-550 Ma (HARTMANN et al., 2000; PHILLIP & MACHADO, 2005) e retrabalhamento de uma crosta Paleoproterozóica (2.3 – 2.0 Ga) e, mais raramente, arqueana (CHEMALE et al, 2000).

Terreno Tijucas: de uma forma abrangente esta unidade é composta por unidades gnáissicas, graníticas e anfibolíticas de idade Paleoproterozóica (idade 2.3- 2.0 Ga), retrabalhadas ou não por um evento orogênico de 800-770 Ma, e por unidades vulcano-sedimentares geradas entre 800-770 Ma a partir de material de idade predominantemente Paleoproterozóica (CHEMALE, 2000).

Terreno São Gabriel: de uma forma geral, esta unidade é representada por rochas granítico gnáissicas e vulcano-sedimentares com uma assinatura isotópica juvenil de idade Neoproterozóica, tendo os principais processos magmáticos e deformacionais ocorrido entre 850-700 Ma (CHEMALE, 2000).

Terreno Taquarembó: localizado na porção sudoeste do ESRG, é limitado ao norte pelo lineamento de Ibaré, a leste pela anomalia magnética de Caçapava do Sul e, a oeste e sul, é recoberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná. A unidade principal que o compõem é o Complexo Granulítico Santa Maria Chico, que é composto por rochas metamórficas de alto grau.

Bacia do Camaquã: a Bacia do Camaquã localiza-se na porção central do ESRG e consiste em uma bacia alongada segundo direção preferencial NE-SW. Sua sequência deposicional é marcada por depósitos vulcano-sedimentares com uma espessura aproximada de 6 a 7 mil metros, acumulados desde o final do Neoproterozóico ao Ordoviciano (PAIM et al., 2000).

3.3 Geologia local

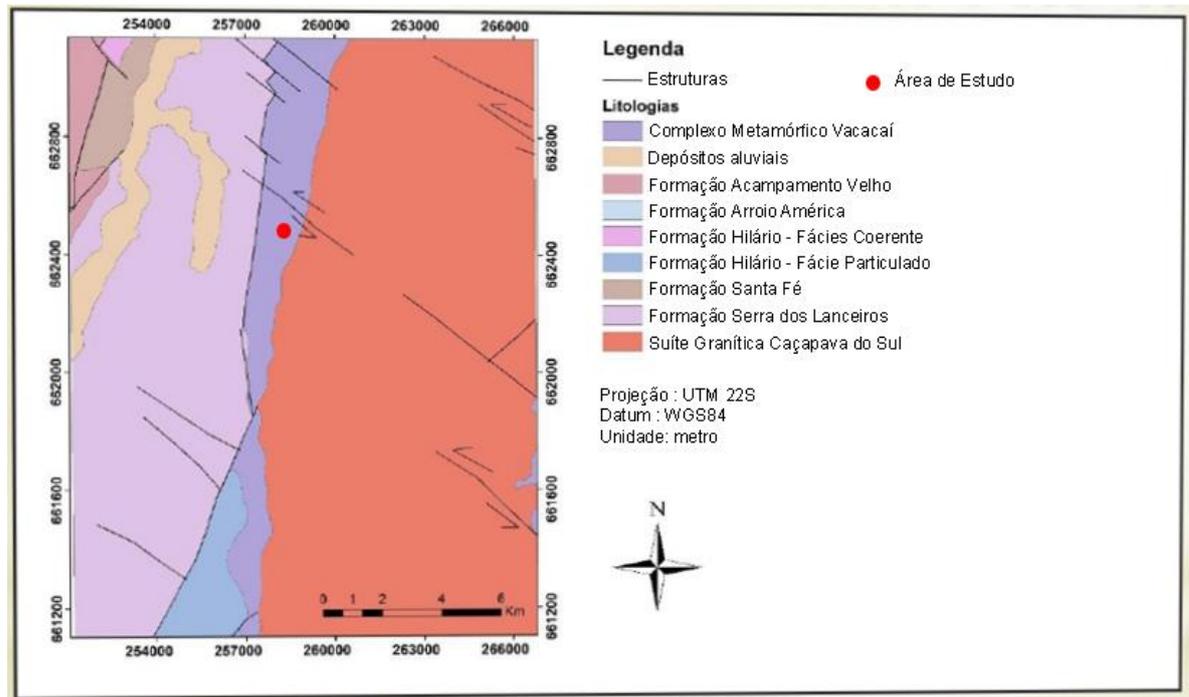
Dentro da Bacia do Camaquã e do Terreno São Gabriel se encontra a área de estudo desse trabalho. Conforme mostra a Figura 6, o contexto geológico local compreende ao Complexo Metamórfico Vacacaí e pela Suíte Granítica Caçapava do Sul. O Complexo Metamórfico Vacacaí é composto por duas associações, uma metavulcânica e outra metassedimentar (CPRM, 2000), já a Suíte Granítica Caçapava do Sul, formada por dois corpos graníticos intrusivos no Complexo Metamórfico Vacacaí.

Mais especificamente a área de estudos esta sobre a associação metassedimentar do Complexo Metamórfico Vacacaí, que possui uma faixa de orientação variável ente N-S e NE-SW (CPRM, 2000), caracterizado por anfibolitos, talco-xisto e mica-xisto (Figura 4, A1 e B).

Devido o estudo ser raso, de detalhe e envolvendo contaminação é necessário dar ênfase a determinação do tipo de solo e feições estruturais do local.

O solo na área de estudo é do tipo argiloso e o contexto geológico do local indica que a água subterrânea na região se dá através de aquíferos livres controlados por fraturas. Através da Figura 1, pode-se verificar a presença de duas fraturas na área, na Figura 6 pode-se ver um lineamento regional perto da área de estudo, possivelmente colaborando para presença de fraturas na região.

Figura 6 – Geologia local da área de estudo.

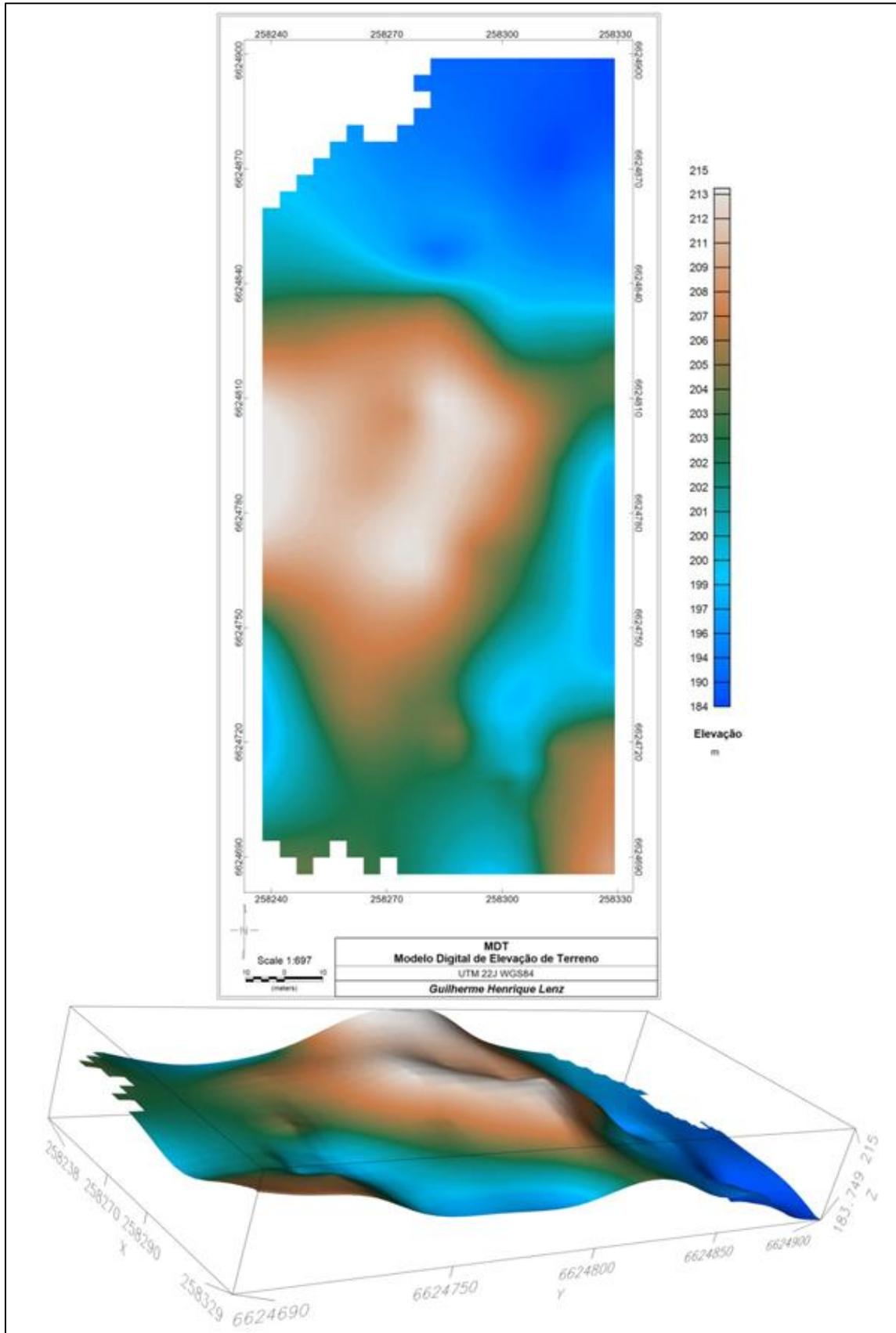


Fonte: modificado de CPRM (2000).

3.4 Modelo digital de elevação do terreno

A Figura 7 apresenta o modelo digital de elevação do terreno (MDT) baseado nos dados obtidos através de um levantamento de Satélite Diferencial de Posicionamento Global (DGPS). Observa-se que as maiores elevações topográficas estão localizadas na região central da área de estudo, com cotas variando de 205 a 210 metros. Nas extremidades da área nota-se uma topografia mais baixa, variando de 195 a 205 metros.

Figura 7 – Modelo Digital de Elevação de Terreno

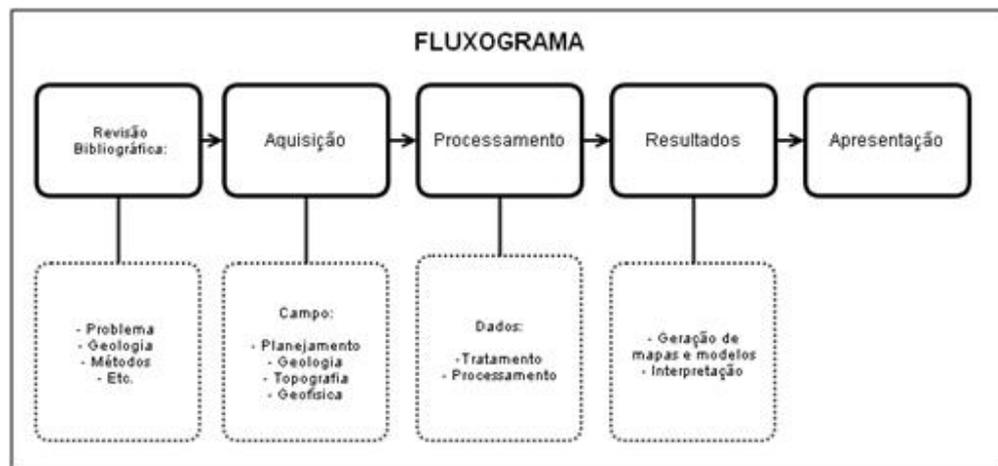


Fonte: Autor (2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho segue a metodologia apresentada na Figura 8, onde é dividido em cinco etapas principais, sendo elas revisão bibliográfica, aquisição, processamento, resultados e apresentação.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: Autor (2016).

Uma extensa pesquisa bibliográfica foi realizada durante toda execução do trabalho, conforme mostra a Tabela 1. Na etapa de aquisição, os métodos geofísicos selecionados para utilização neste trabalho, foram os geoeletricos, mais precisamente o método de eletrorresistividade que nos fornecerá uma resposta confiável a problemática do trabalho devido ao alto contraste de resistividade entre o ambiente (solo/rocha) e o alvo (contaminação), caso exista na área, e o método de IP, que devido a sua aquisição conjunta com o levantamento eletrorresistivo, pode trazer mais informações da subsuperfície a respeito das propriedades do alvo e o GPR que é muito utilizado em estudos ambientes devido a sua resolução. A análise laboratorial é realizada para a confirmação da presença de uma provável contaminação presente no local, quando comparado com dados de referência. As etapas de processamento e resultados serão discutidas em seções futuras deste trabalho.

6.1 Métodos geoeletricos

Os métodos geoeletricos de prospecção geofísica utilizam parâmetros elétricos de solos e rochas para caracterizar a geologia em subsuperfície. A prospecção elétrica envolve o

estudo dos efeitos produzidos pela injeção de uma corrente elétrica no solo ou o estudo da variação de parâmetros elétricos do mesmo sem a necessidade desta injeção (ORELLANA, 1972).

De acordo Kearey (2009), os métodos geoeletricos podem ser de eletrorresistividade, que são usados no estudo de discontinuidades horizontais e verticais em subsuperfície; de polarização induzida, que é usado no estudo da capacidade da subsuperfície em agir como um capacitor elétrico, mantendo a corrente elétrica por alguns instantes; e de potencial espontâneo, que é usado na determinação de corpos condutivos em subsuperfície através de correntes naturais.

Cada método possui diversos arranjos, cada arranjo possui sua geometria de disposição de eletrodos e finalidade, variando em função dos objetivos do trabalho e de situações gerais encontradas em campo (ORELLANA, 1972).

A profundidade real de investigação depende de diversos fatores, como a distribuição da resistividade em subsuperfície (camadas de sedimentos, tipos de rochas, embasamento, presença de outros materiais), razão sinal-ruído, efeito de cobertura vegetal, sensibilidade à heterogeneidade, efeitos laterais, topografia, entre outros. (ELIS, 2008).

6.1.1 Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade esta baseada na Segunda Lei de Ohm, que relaciona a resistência elétrica (R), com a corrente elétrica (I) e uma diferença de potencial (ΔV) pela equação (1):

$$\Delta V = RI \quad (1)$$

A resistência depende diretamente da propriedade física chamada resistividade (ρ , propriedade física alvo na aplicação deste método geofísico), dada em Ohm metro, do comprimento (L) e da seção (S) do objeto conforme equação (2):

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

Considerando uma corrente elétrica fluindo em um semi-espaco homogêneo e isotrópico é possível descrever a Segunda Lei de Ohm na forma diferencial, onde \vec{J} é a

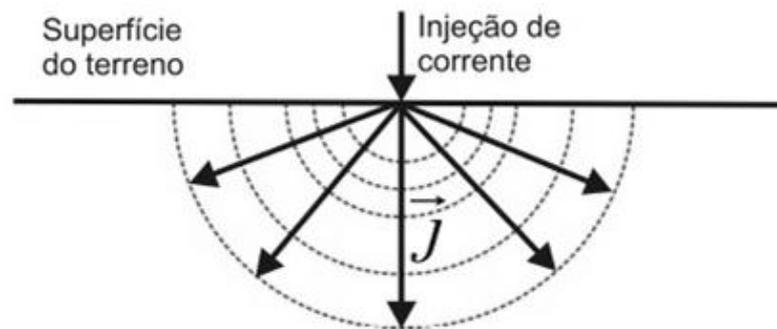
densidade de corrente (Ampere/área), ρ resistividade elétrica (Ohm m) e \vec{E} o campo elétrico (Volt/m), através da equação (3):

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (3)$$

A corrente elétrica no semi-espaco flui de forma radialmente na forma de uma semi-esfera. Assim a densidade de corrente (\vec{J}) para um semi-espaco homogêneo é equivalente à equação (4), onde r é a distância:

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (4)$$

Figura 9 – Direção do fluxo de corrente em um semi-espaco.



Fonte: Ustra (2008).

Com essas considerações, o potencial elétrico (V) a uma distancia (r) pode ser dada pela equação (5):

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (5)$$

Na prática se mede a diferença de potencial (ΔV) ao invés do potencial (V), e para determinar a região do semi-espaco estudada considera-se uma constante (K), que depende da geometria do arranjo dos eletrodos, gerando a equação (6) que fornece a relação fundamental para todas as técnicas geofísicas de eletrorresistividade:

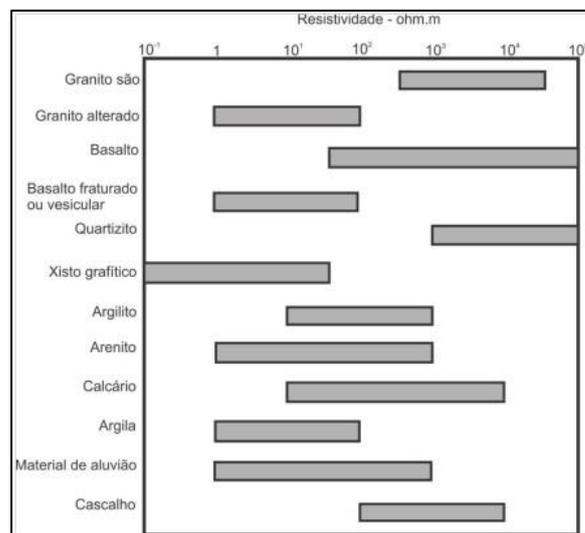
$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

O método consiste basicamente na injeção de corrente elétrica através de eletrodos em contato galvânico com o solo, gerando uma diferença de potencial ao percorrer o subsuperfície, então essa diferença de potencial é medida pelos eletrodos de potencial. Sobre áreas não homogêneas e/ou anisotrópicas, a resistividade medida é uma resistividade aparente (ρ_a), que varia com a posição e/ou direção do arranjo dos eletrodos. Cada medida de resistividade da subsuperfície é a resistividade aparente de um semi-espaço homogêneo equivalente. Não é necessariamente representativa da resistividade real de qualquer elemento, nem uma simples média das resistividades reais. Entretanto, ela varia sistematicamente através de uma seção geológica e pode ser o diagnóstico para camadas e para a presença de heterogeneidades resistivas (USTRA, 2008).

A resistividade dos solos e rochas possui um vasto intervalo de variações, como mostra a Figura 10 e é afetada principalmente pelos fatores:

- Composição mineralógica;
- Porosidade;
- Teor de água;
- Quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Figura 10 – Valores de resistividade comuns de solos e rochas.



Fonte: Pinto et al.(2013).

6.1.1.1 Sondagem elétrica vertical – SEV

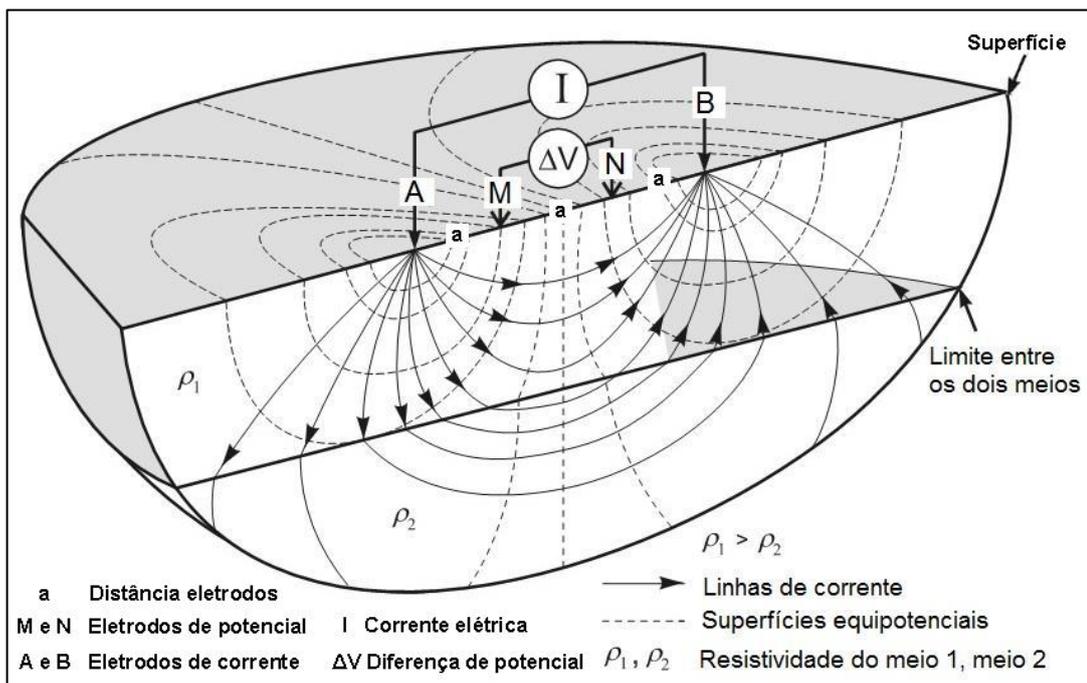
A técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) está inserida nos métodos de eletrorresistividade, é utilizada preferencialmente em terrenos compostos por camadas lateralmente homogêneas e limitadas por planos paralelos ao terreno. O resultado obtido através de uma SEV é a seção pontual do centro do arranjo utilizado, gerando assim um resultado em resistividades em pontual em profundidade (ORELLANA, 1972).

Um dos diversos arranjos dessa técnica é o arranjo Wenner, utilizado neste trabalho, consiste de dois eletrodos de corrente (*A* e *B*) e dois eletrodos de potencial (*M* e *N*) separados por uma mesma distância (*a*), conforme a Figura 11. Cada distância (*a*) equivale a uma profundidade de investigação teórica. Esse arranjo é aconselhável em alguns casos, pois evita saltos e embreagens na curva de resultados, resultando em uma precisão maior (ORELLANA, 1972).

A resistividade aparente (ρ_a) do meio pode ser obtida pela Equação (6). O fator geométrico (*K*) que complementa a Equação (6), relacionado ao arranjo Wenner é definido pela Equação (7):

$$K = 2\pi a \quad (7)$$

Figura 11 – Modelo esquemático do funcionamento da SEV, utilizando arranjo Wenner.



Fonte: modificado de Fontoura (2011).

6.1.1.2 Caminhamento elétrico – CE

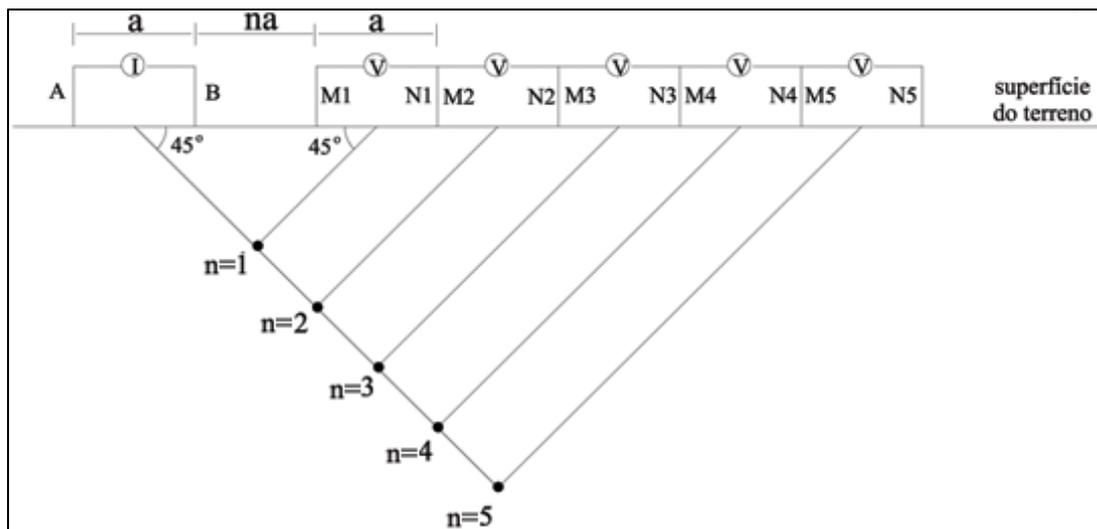
A técnica do caminhamento elétrico (CE), também está inserida nos métodos de Eletroresistividade, porém é aplicada em situações em que se visa determinar descontinuidades laterais nos materiais geológicos, tais como diques e soleiras, contatos geológicos, fraturamentos e/ou falhamentos, corpos mineralizados, mapeamento de plumas de contaminação no subsolo, ente outros. (ORELLANA, 1972).

No arranjo Dipolo-Dipolo da técnica de CE, conforme mostra a Figura 12, os eletrodos de corrente (A e B) e os eletrodos de potencial (M e N) geralmente possuem a mesma distância (a), ocorrendo o afastamento crescente dos centros dos dipolos (na). O grau de profundidade de investigação (n) é teórico em função da geometria do arranjo.

A resistividade do meio com esta técnica também pode ser obtida pela Equação (6), porém aqui o fator geométrico (K) relacionado ao arranjo Dipolo-Dipolo é definido pela Equação (8):

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (8)$$

Figura 12 – Modelo esquemático do caminhamento elétrico, utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo.



Fonte: Gandolfo (2007).

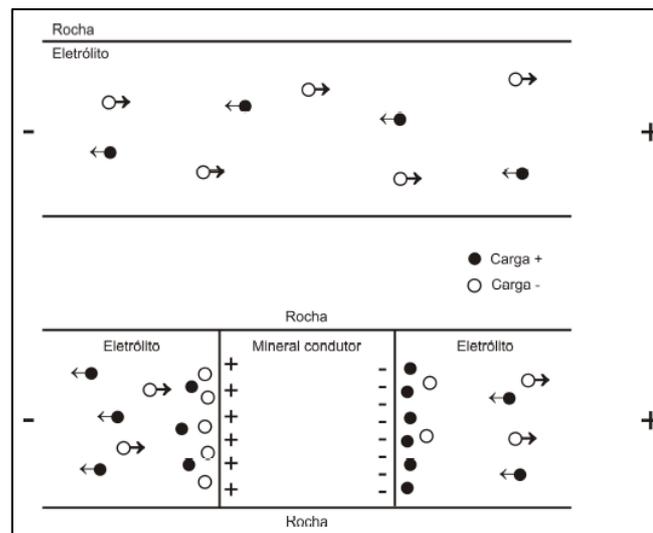
6.1.2 Polarização induzida – IP

A polarização induzida (IP) é um fenômeno elétrico, onde um material estimulado por corrente elétrica apresenta uma resposta retardada à voltagem, basicamente uma corrente elétrica atravessando um material, quando interrompida, não desaparece bruscamente, mas é atenuada gradualmente (USTRA, 2008), conforme mostra a Figura 15.

Os responsáveis por esse efeito de IP tem origem eletroquímica e podem ser divididos em dois tipos:

Polarização de eletrodo: ocorre principalmente com a presença de minerais metálicos, onde uma rede de cargas de sinais opostos é formada em cada face do mineral, resultando o acúmulo de íons em sua face. Com o cessar da corrente responsável por esse efeito, as cargas do mineral e os íons se rearranjam, dando o efeito de queda gradual do sinal elétrico. (VINEGAR & WAXMAN, 1984), conforme a Figura 13.

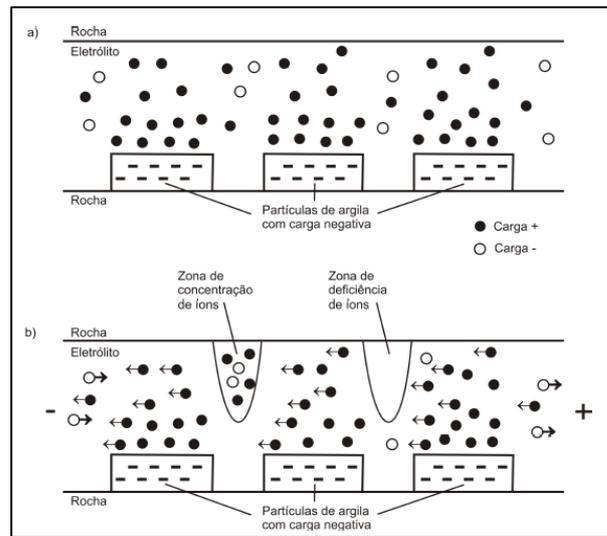
Figura 13 – Modelo esquemático do efeito de polarização de eletrodo.



Fonte: Ustra (2008).

Polarização de membrana: ocorre geralmente em material poroso e com pouca presença de minerais metálicos. Aqui o meio gera zonas de acúmulos de cargas, resultando em gradientes de densidade de carga, quando a corrente é interrompida, essas cargas voltam a sua posição de equilíbrio, produzindo o efeito de queda gradual do sinal elétrico (VINEGAR & WAXMAN, 1984), conforme a Figura 14.

Figura 14 – Modelo esquemático do efeito de polarização de membrana.

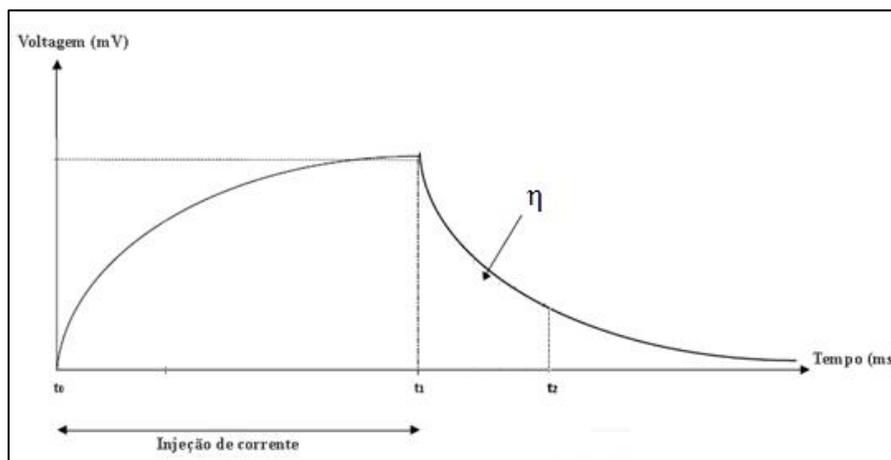


Fonte: Ustra (2008).

A leitura do parâmetro de IP pode ocorrer logo após a do parâmetro de eletrorresistividade, aproveitando assim obter dois parâmetros como resposta em um único levantamento. O parâmetro medido pelo método de IP é a cargabilidade (η) com unidade (milivolt/volt, mV/V), através da equação (9), que depende diretamente da voltagem (V) e do tempo de atenuação (t).

$$\eta = \frac{1}{V_1} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \tag{9}$$

Figura 15: Curva resultado do efeito de polarização induzida.



Fonte: modificado de Terrapulus (2003).

6.2 Métodos eletromagnéticos

Os métodos geofísicos eletromagnéticos (EM) se baseiam na propagação de campos eletromagnéticos, contínuos ou transitórios, e sua interação com a subsuperfície. A base teórica dos fenômenos eletromagnéticos é descrita pelas Equações de Maxwell, definidas por vetores de intensidade de campo elétrico (\vec{E}), intensidade de campo magnético (\vec{H}), densidade de fluxo elétrico (\vec{D}), densidade de fluxo magnético (\vec{B}), densidade de cargas elétricas (q) e tempo (t) (JOL, 2009), apresentados nas seguintes equações:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = q \quad (12)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (13)$$

Como essas equações não apresentam relações com as propriedades físicas do meio, faz-se necessário apresentar as suas relações constitutivas. Relações constitutivas são a forma de descrever a resposta do meio ao campo eletromagnético em relação a propriedades elétricas e magnéticas do meio. Elas representam as características físicas do meio, fornecendo uma descrição macroscópica do comportamento dos elétrons, átomos e moléculas se comportam mediante a aplicação de um campo eletromagnético (JOL, 2009), sendo dadas pelas equações:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (14)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (15)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (16)$$

Onde ε permissividade dielétrica, σ condutividade, μ permeabilidade magnética. Mediante a aplicação de um campo elétrico a permissividade dielétrica quantifica a capacidade de polarização de um material, no vácuo, esta grandeza assume o valor constante $\varepsilon^0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m (Farad por metro), existe também a constante dielétrica (k) que é a razão entre a permissividade dielétrica no vácuo e a permissividade dielétrica de um material. A permeabilidade magnética quantifica a predisposição de um meio em ser magnetizado quando

submetido a um campo magnético, assumindo o valor constante $\mu^0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m (Henrys por metro) no vácuo. A condutividade elétrica (dada em Siemens por metro, S/m) quantifica as cargas elétricas em movimento na presença de um campo elétrico, ou seja, a capacidade que um material tem de conduzir corrente elétrica, sendo a relação expressa na equação (15) (DANIELS, 2004; JOL 2009).

6.2.1 Radar de Penetração de Solo – GPR

O radar de penetração de solo (GPR), ou georadar, é um método geofísico que utiliza ondas de rádio com frequências entre 10 MHz a 2,5GHz. Apesar de pertencer aos métodos eletromagnéticos seus princípios de funcionamento e aquisição se assemelham muito a sísmica de reflexão e ao sonar, com exceção da natureza da onda utilizada.

Este método se baseia no princípio de transmissão de ondas eletromagnéticas, que são repetidamente radiadas para subsuperfície por meio de uma antena transmissora colocada junto à superfície, as ondas refletidas e difratadas em subsuperfície são recebidas através de outra antena receptora, também colocadas na superfície. A propagação do sinal eletromagnético é função da frequência da antena transmissora e das propriedades eletromagnéticas dos materiais em subsuperfície. A principal propriedade física na utilização do GPR é a permissividade dielétrica (ϵ), pois é o contraste da sua constante (k) entre os materiais que irá gerar um refletor no radargrama (registro).

6.2.1.1 Natureza das ondas eletromagnéticas e atenuação

O GPR explora as características ondulatórias do campo eletromagnético. As equações de Maxwell descrevem a variação do campo elétrico e do campo magnético no tempo. Existindo a dependência direta da magnitude relativa da perda de energia (associada à condutividade) para a energia armazenada (associada à permissividade e permeabilidade), desta maneira os campos podem difundir ou propagar como ondas; sendo que, para estudos de GPR serem viáveis as condições do meio devem ser favoráveis para respostas do sinal de radar como propagação de onda (JOL, 2009).

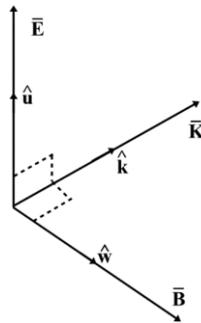
O caráter de onda torna-se mais evidente quando as equações de Maxwell são reformuladas, utilizando o campo elétrico e os parâmetros das relações constitutivas, temos a equação para o vetor da onda (JOL, 2009):

$$\nabla^2 \times \bar{E} + \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (17)$$

As soluções da equação transversa da onda são denominadas de soluções de ondas planas das equações de Maxwell. Essas soluções assumem a forma (Figura 16):

$$\bar{E} = f(\vec{r} \cdot \hat{k}, t) \hat{u} \quad (18)$$

Figura 16 – Relação vetorial ortogonal, entre \bar{E} , \bar{B} e \hat{k} .



Fonte: modificado de Jol (2009).

Onde, \vec{r} é o vetor no qual descreve a posição espacial e $f(r \cdot \hat{k}, t)$ satisfazem a equação (19), sendo $\beta = \vec{r} \cdot \hat{k}$ a distância na direção de propagação (JOL, 2009):

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\alpha \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (19)$$

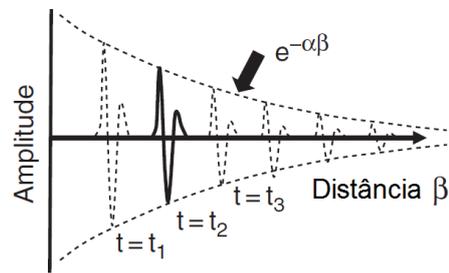
Em condições de baixa perda ($\sigma \approx 0$), sendo v a velocidade da onda e α a atenuação (Figura 17) do sinal:

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) e^{\pm \alpha \beta} \quad (20)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (21)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (22)$$

Figura 17 – Modelo de atenuação do sinal em ambientes de baixa perda.



Fonte: Porsani (1999).

6.2.1.2 Coeficiente de reflexão

Em estudos de GPR supõe-se que as ondas EM se propagam com incidência normal às interfaces das camadas (ANNAN, 1992). Essas camadas possuem diferentes propriedades elétricas que causam uma impedância, determinando assim a quantidade de sinal refletido, expressa pelo coeficiente de reflexão (WARD, 1990).

A amplitude do coeficiente (A_z) de reflexão pode ser escrita em termos de permissividade dielétrica (ϵ), definida por:

$$A_z = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (23)$$

6.2.1.3 Resolução e profundidade de investigação

Resolução é a capacidade de se identificar separadamente duas feições distintas um conjunto de dados. Esta característica no GPR é governada pela frequência da antena, para que duas interfaces ou dois objetos distintos possam ser identificados eles devem possuir uma separação espacial que depende da frequência empregada no sistema.

A separação espacial mínima (Δr) para resolução vertical é dada pelo critério de *Rayleigh*, que estabelece esta distância mínima deve ser equivalente a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (λ) (DANIELS, 2004; JOL, 2009), conforme mostra a equação (24):

$$\Delta r \geq \frac{\lambda}{4} \quad (24)$$

A frequência da antena de GPR utilizada também influencia em outro fator, a profundidade de investigação, conforme mostra a Tabela 3. A profundidade de investigação (*skindepth*) é um valor teórico aproximado, pois depende também das propriedades eletromagnéticas do meio (condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética).

Através disso, temos a relação inversa entre profundidade de investigação e resolução, onde quanto maior a frequência da antena, maior a resolução e menor a profundidade de investigação, e vice-versa (Borges, 2007).

Tabela 2 – Relação entre frequência da antena e profundidade de investigação.

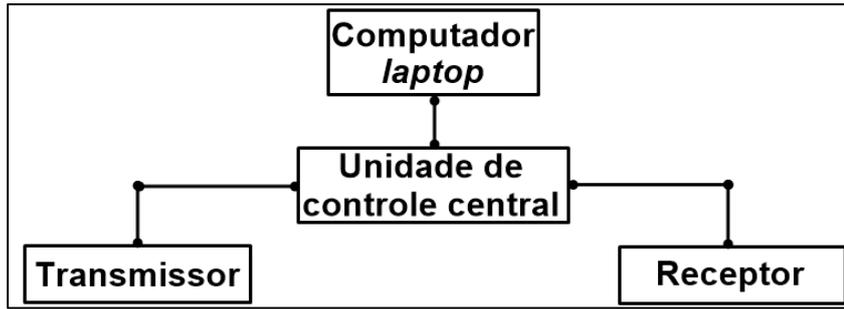
Frequência Central (MHz)	Profundidade máxima de investigação teórica (m)
1000	1
500	1,5
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Fonte: Porsani (1999).

6.2.1.4 Sistema de aquisição do GPR

O sistema de aquisição do GPR é composto essencialmente por uma antena transmissora (Tx), uma antena receptora (Rx), uma unidade central de controle, e um computador para armazenar e pré-visualizar os dados, conforme a Figura 18.

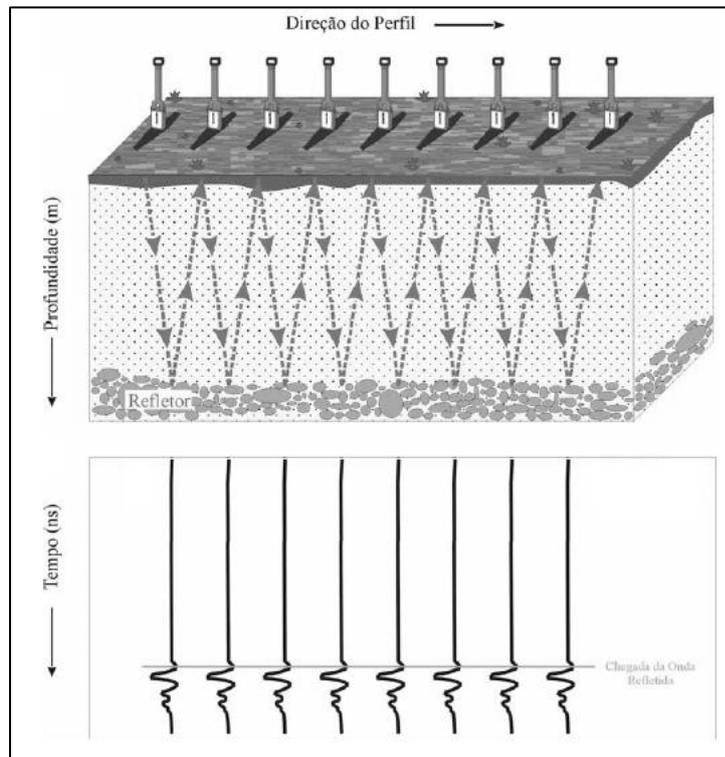
Figura 18 – Modelo simplificado de um sistema de aquisição GPR.



Fonte: modificado de Oliveira (2006).

Um dos arranjos de aquisição de dados de GPR é o *constant offset*, que consiste em manter uma distância constante entre as antenas transmissora e receptora, como mostra a Figura 19, assim a energia refletida é registrada em função do tempo de atraso, amplificada, digitalizada e armazenada no computador.

Figura 19 – Modelo esquemático de aquisição GPR, utilizando o arranjo *constant offset*, juntamente com modelo do sinal obtido.



Fonte: modificado de Borges (2007).

6.3 Análise laboratorial de águas

A presença de contaminantes nas águas acaba alterando a quantidade e concentrações de diversos elementos químicos e biológicos, além de alterar as suas propriedades físicas. Obter alguns parâmetros podem colaborar diretamente na identificação de águas contaminadas. Com base nisso foram selecionados alguns parâmetros, apresentados na Tabela 3, para serem analisados em amostras de águas da área de estudo.

Tabela 3 – Parâmetros analisados em laboratório.

pH	Condutividade	Alcalinidade
DBO	Dureza	

Legenda Tabela 3: DBO- Demanda Biológica de Oxigênio. Fonte: Autor (2016).

6.4 Análise geoestrutural

As identificações de estruturas geológicas da área possibilitam entender melhor o contexto geológico local, auxiliando a interpretação dos resultados geofísicos, como a presença de falhas, dobras e fraturas, suas direções e de mergulhos preferências, entre outros.

Foi realizada uma análise estrutural em afloramentos encontrados na área de estudo, com a utilização de uma bussola e o método “trama” ou *dip direction*, que consiste em medir a direção para qual o plano mergulha e o mergulho do plano. (BICCA, 2014).

6.5 Equipamentos e aquisição

Os equipamentos utilizados foram o Syscal PRO, para levantamento dos dados geoeletricos e o RIS One com antena de 80 MHz para os dados de GPR, os dois equipamentos estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Syscal PRO e RIS One



Fonte: Iris Instruments; Autor (2016).

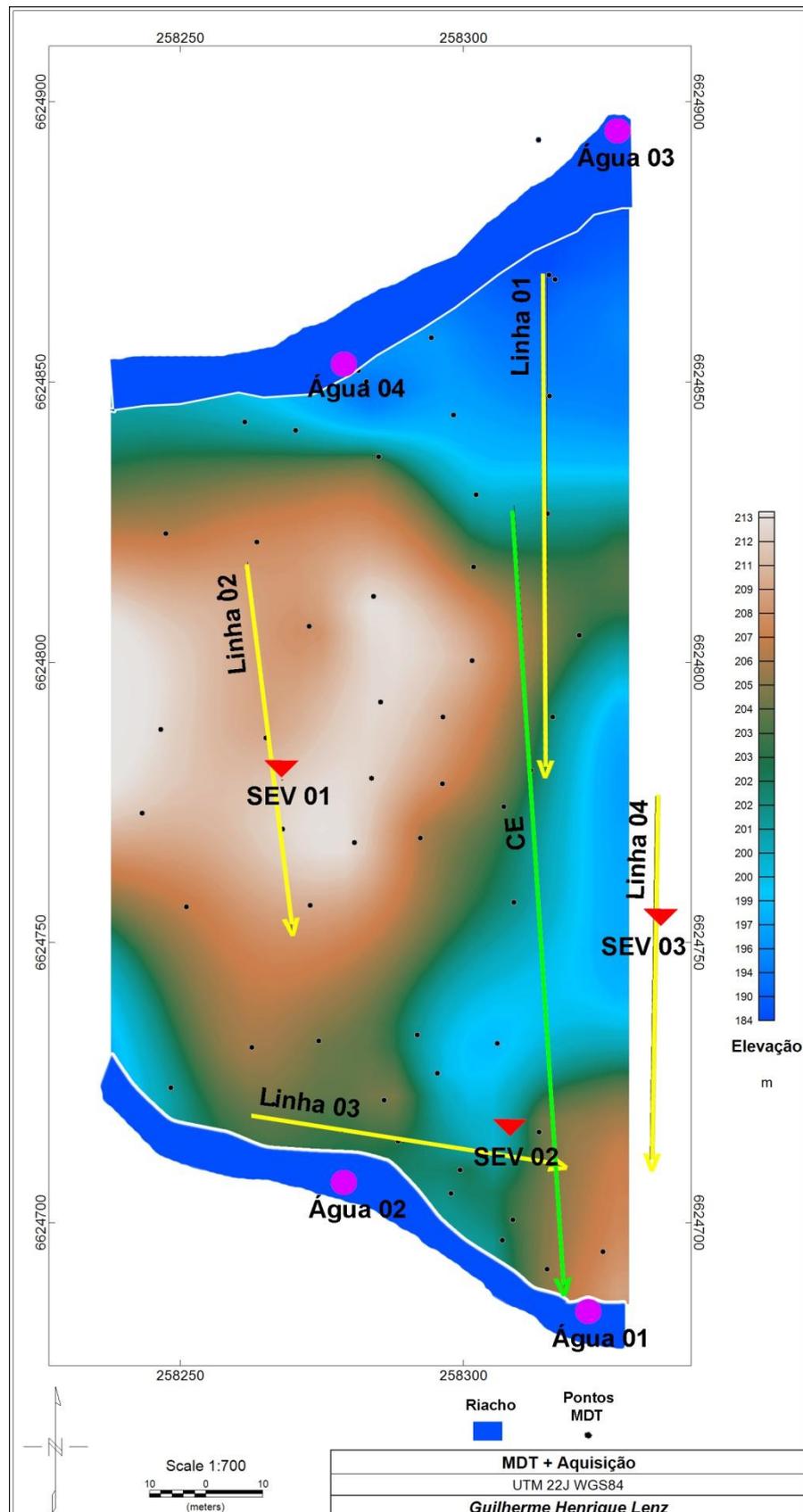
A Figura 21 mostra a localização de aquisição dos dados geofísicos, topográficos e de coleta de águas. Os pontos pretos indicam as medidas de elevação obtidas com DGPS, os pontos roxos indicam as coletas de água para análise laboratorial, os triângulos vermelhos indicam os locais onde foram realizadas as SEVs juntamente com medidas de IP, as linhas amarelas indicam os perfis de GPR e a linha verde indica o perfil de CE.

As análises geoestruturais foram realizadas em campo com uma bússola nos afloramentos da Figura 4 nos detalhes A1 e B.

A coleta de água foi realizada na montante e na jusante de cada um dos riachos que cortam a área (um ao norte outro ao sul), nos locais indicados na Figura 21.

As SEVs 01 e 03 tiveram uma abertura de AB/2 de até 39 m, enquanto a SEV 02 utilizou uma abertura de AB/2 de 30 m, todas utilizaram o arranjo Wenner. As linhas de GPR tiveram uma extensão variável entre 60 e 88 metros, utilizando o arranjo *Constant-Offset*. O perfil de CE teve 142 metros de extensão, com dipolos de 2 metros, obtendo um total de 2079 leituras de resistividade.

Figura 21 – Localização das SEVs, linhas de GPR e CE, pontos de amostragem de águas superficiais.



Fonte: Autor (2016).

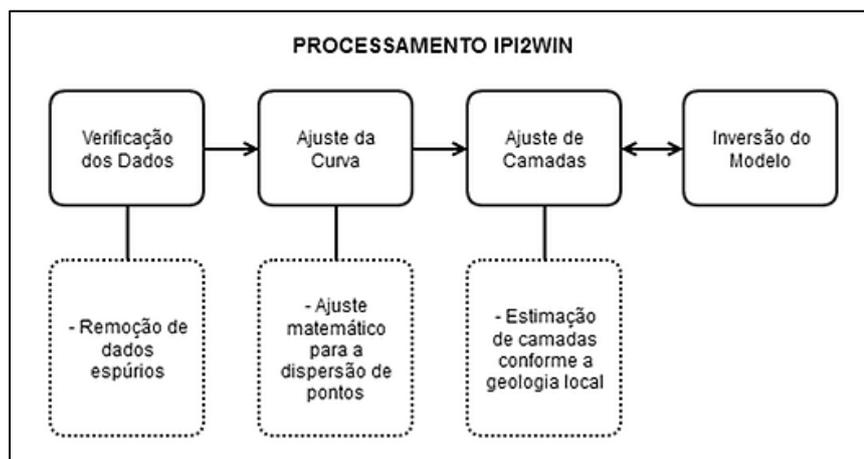
6.6 Processamentos e análises

As análises da água foram realizadas no Laboratório de Química da UNIPAMPA, em conjunto com a equipe do laboratório, os procedimentos realizados nas análises seguem o Manual de Procedimentos e Técnicas Laboratoriais Voltados para Análises de Águas e Esgotos Sanitário e Industrial.

Os dados geoestruturais obtidos em campo, foram processados através do uso do *software* livre Stereonet, desenvolvido pela *Visible Geology*.

Os dados geoeletricos de SEV e IP foram processados conforme o fluxograma da Figura 22, através do uso do *software* livre IPI2WIN, desenvolvido pela Universidade de Moscou.

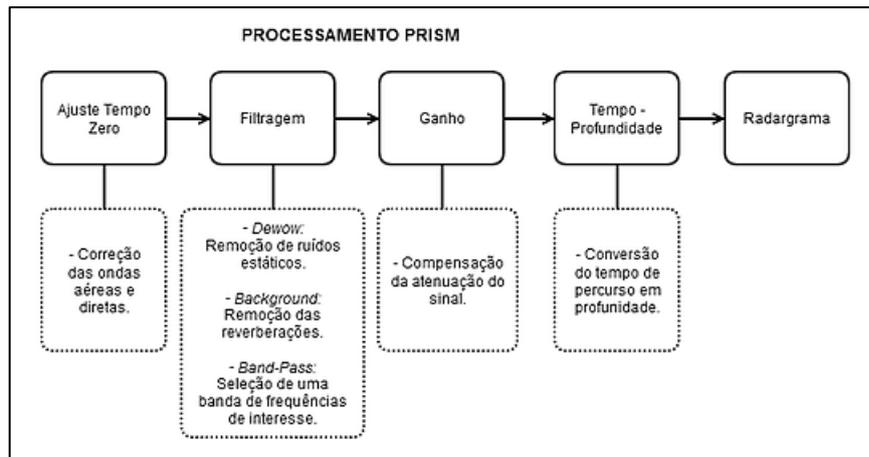
Figura 22 – Fluxograma do processamento realizado no IPI2IN para os dados de SEV e IP.



Fonte: Autor (2016).

Os dados de GPR foram processados conforme o fluxograma da Figura 23, através do uso do *software* PRISM, desenvolvido pela *Radar Systems Inc*.

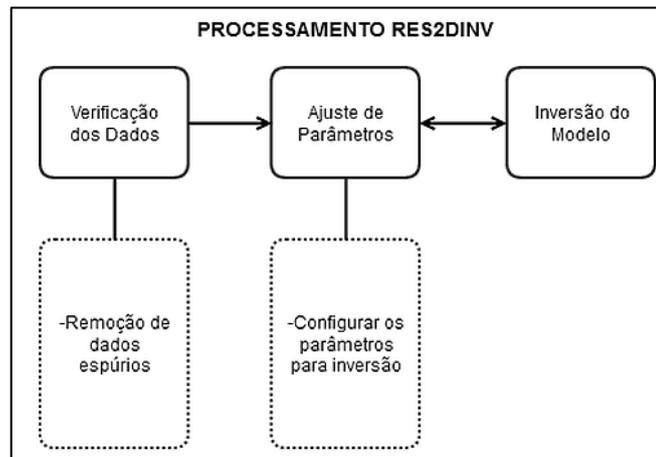
Figura 23 – Fluxograma do processamento realizado no PRISM para os dados de GPR.



Fonte: Autor (2016).

Os dados geoeletricos de CE foram processados conforme o fluxograma da Figura 24, através do uso do *software* RES2DINV, desenvolvido pela Geotomo.

Figura 24 – Fluxograma do processamento realizado no RES2DINV para os dados de CE.



Fonte: Autor (2016).

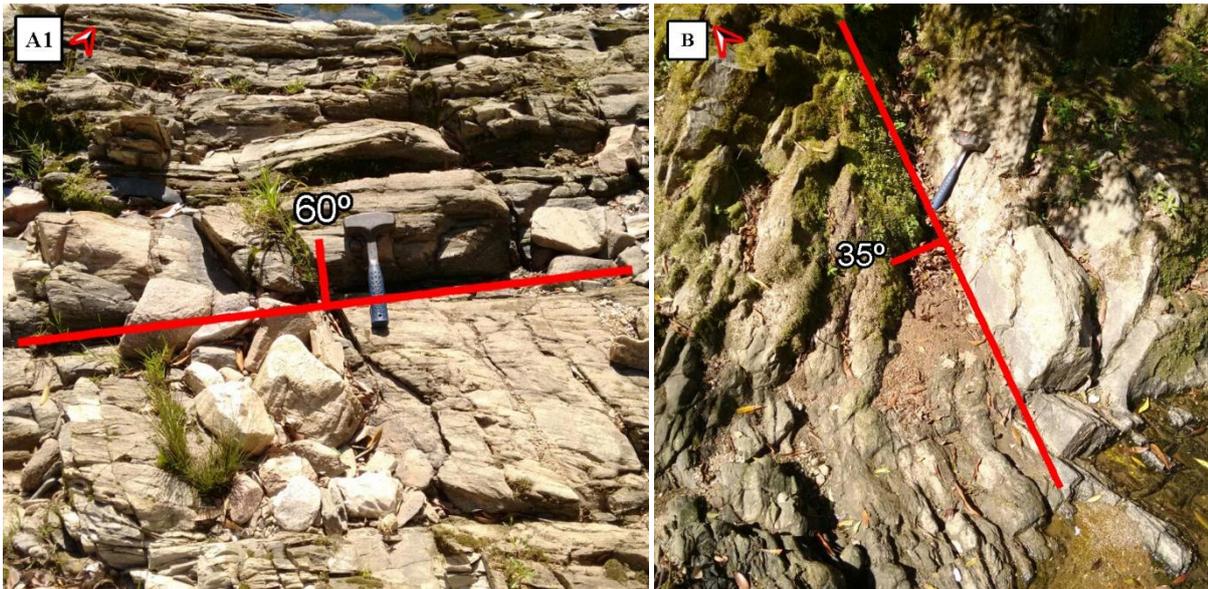
7 RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES

A seguir serão abordados os resultados obtidos, após os resultados serão integrados e discutidos para uma melhor interpretação, seguidos das considerações finais deste trabalho.

7.1 Resultados e discussões

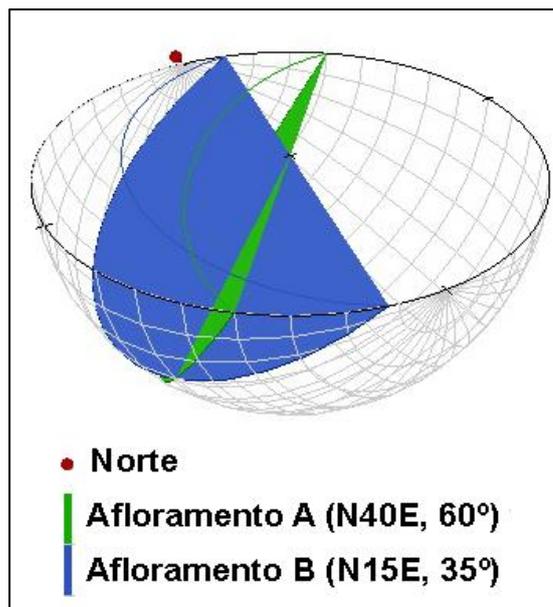
A Figura 25 apresenta as medidas geoestruturais obtidas nos afloramentos da área de estudo, seguidas do estereograma (Figura 26) gerado por essas medidas.

Figura 25 – Medidas geoestruturais obtidas nos afloramentos da área de estudo.



Fonte: Autor (2016).

Figura 26 – Estereograma estrutural da geologia local.



Fonte: Autor (2016).

Através da análise geoestrutural dos afloramentos da Figura 25, pode-se gerar o estereograma apresentado na Figura 26, onde se verifica a preferência na orientação NE-SW para as estruturas do mica-xisto no local, coincidindo com a orientação esperada e apresentada na Seção 2.2 (Geologia local).

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises laboratoriais das águas superficiais da área, utilizando dados de potabilidade da Cetesb (2001) e de aterros antigos conforme Farquhar (1989).

Tabela 4- Resultado das análises laboratoriais das amostras de água.

Parâmetro	Valores potabilidade	Aterro 20 anos	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
pH	6.0 – 9,5	7,5	8,39	9,17	7,84	7,76
Alcalinidade (mg/L)	-	< 500	50	52	61	58
Condutividade (uS/cm)	< 300	-	184,8	182,4	272	250
Dureza (mg/L)	< 500	-	56	58,5	85	102
DBO (O2 mg/L)	< 8	< 50	2,25	0,4	0,25	0,5

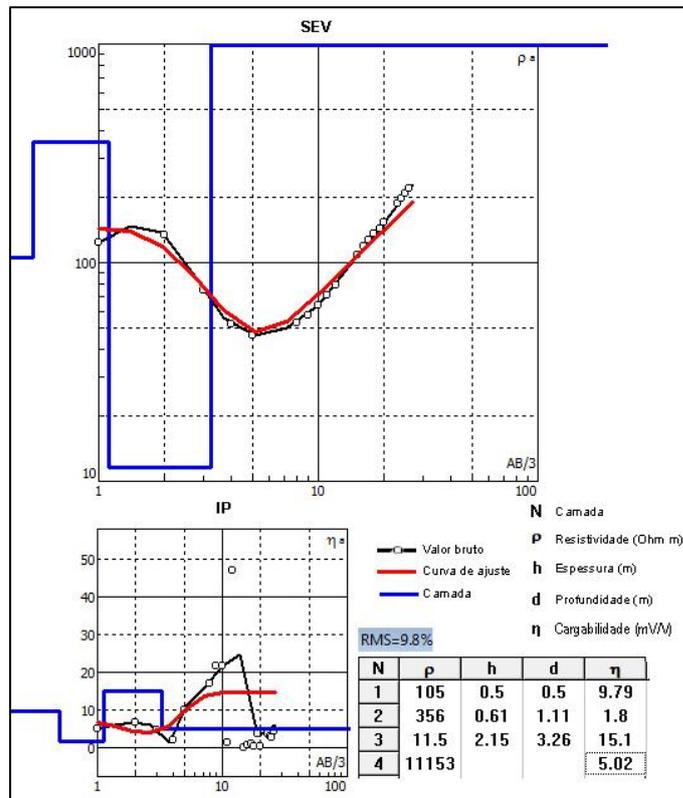
Fonte: Cetesb (2001) ; Farquhar (1989); Autor (2016).

Os valores obtidos pelas amostras de água, apresentados na Tabela 4, se encontram dentro dos valores estabelecidos para potabilidade e também dentro do esperado para aterros com mais de 20 anos desativados, porém esses resultados não compreendem todos os principais parâmetros que indicam contaminação (Demanda química de oxigênio, Coliformes, Resíduos totais, entre outros).

Apesar da visível poluição causada pela presença do aterro às águas superficiais da proximidade, o fato da água ser corrente pode ser um agente dispersante da poluição, tornando difícil a verificação da contaminação pela análise das águas superficiais.

A seguir é apresentada as curvas das SEV (Figura 27,28 e 29) seguidas por sua interpretação (Tabela 5, 6 e 7).

Figura 27 – Curva de resistividade, camadas e cargabilidade da SEV 1.



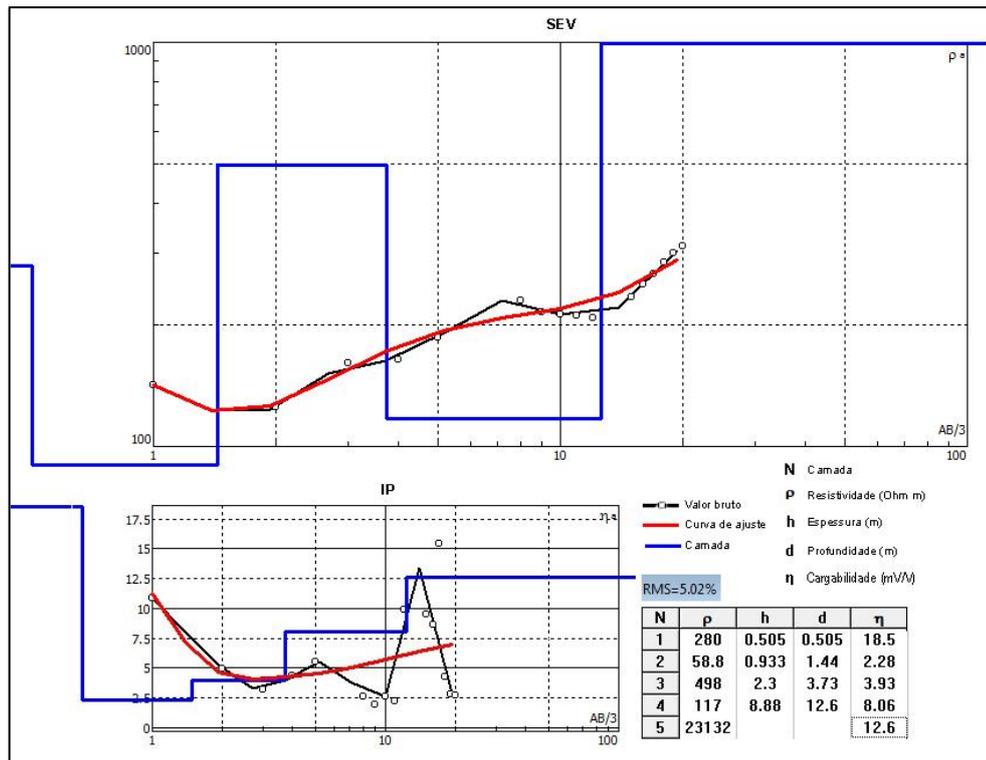
Fonte: Autor (2016).

Tabela 5 – Interpretação das camadas apresentadas na SEV 1.

CAMADA	1ª	2ª	3ª	4ª
INTERPRETAÇÃO	Solo argiloso e orgânico	Solo argiloso	Resíduos sólidos e chorume	Embasamento
PROFUNDIDADE (m)	0,50	1,11	3,26	
ESPESSURA (m)	0,50	0,61	2,15	
RESISTIVIDADE (ohm m)	105	356	11,5	11153
CARGABILIDADE (mV/V)	9,79	1,80	15,10	5,02

Fonte: Autor (2016).

Figura 28 – Curva de resistividade, camadas e cargabilidade da SEV 2.



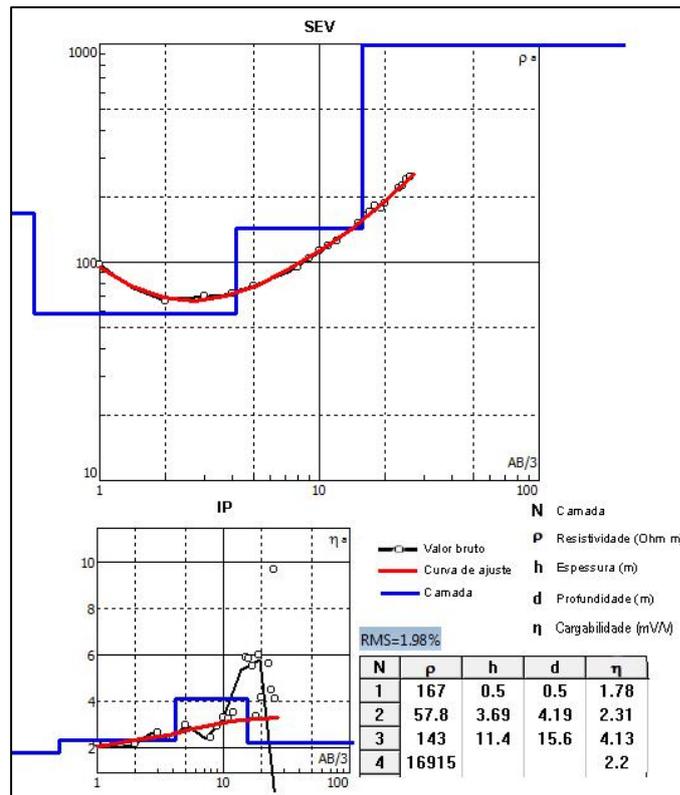
Fonte: Autor (2016).

Tabela 6 – Interpretação das camadas apresentadas na SEV 2.

CAMADA	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
INTERPRETAÇÃO	Solo argiloso e orgânico	Resíduos sólidos e chorume	Solo argiloso	Zona saturada (possível nível freático)	Embasamento
PROFUNDIDADE (m)	0,50	1,44	3,73	12,60	
ESPESSURA (m)	0,50	0,93	2,30	8,88	
RESISTIVIDADE (ohm m)	280	58,8	498	117	23132
CARGABILIDADE (mV/V)	18,50	2,28	3,93	8,06	12,60

Fonte: Autor (2016).

Figura 29 – Curva de resistividade, camadas e cargabilidade da SEV 3.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 7 – Interpretação das camadas apresentadas na SEV 3.

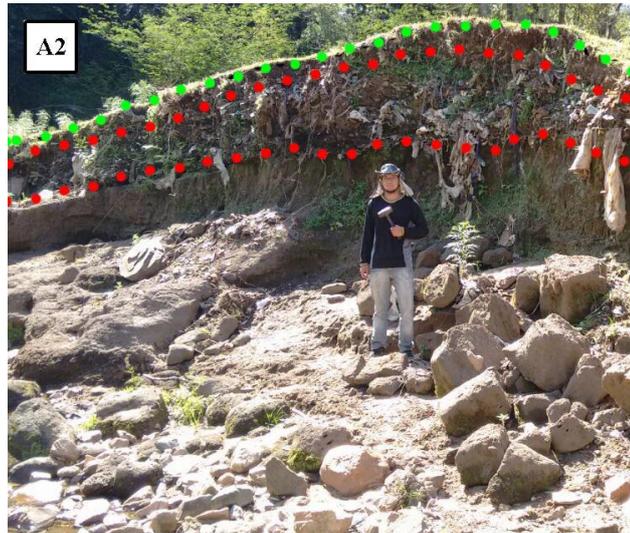
CAMADA	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
INTERPRETAÇÃO	Solo argiloso e orgânico	Solo argiloso e chorume (acredita-se que não há resíduos nesse local)	Zona saurada (possível nível freático)	Embasamento
PROFUNDIDADE (m)	0,50	4,19	15,60	
ESPESSURA (m)	0,50	3,69	11,40	
RESISTIVIDADE (ohm m)	167	57,8	143	169915
CARGABILIDADE (mV/V)	1,78	2,31	4,13	2,20

Fonte: Autor (2016).

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam a interpretação geoeétrica de cada camada das SEVs, baseado nos trabalhos anteriores na área (OLIVEIRA et al. 2010; MOREIRA et al.2011), geologia local e nos valores de resistividade tradicionais apresentados na Figura 10.

Um dos fatores locais que mais auxiliaram a interpretação das camadas apresentadas nas SEVs foi o afloramento em corte, Figura 29, presente na margem do riacho sul e alguns metros da SEV 2.

Figura 30 – Detalhe afloramento em corte.



Fonte: Autor (2016).

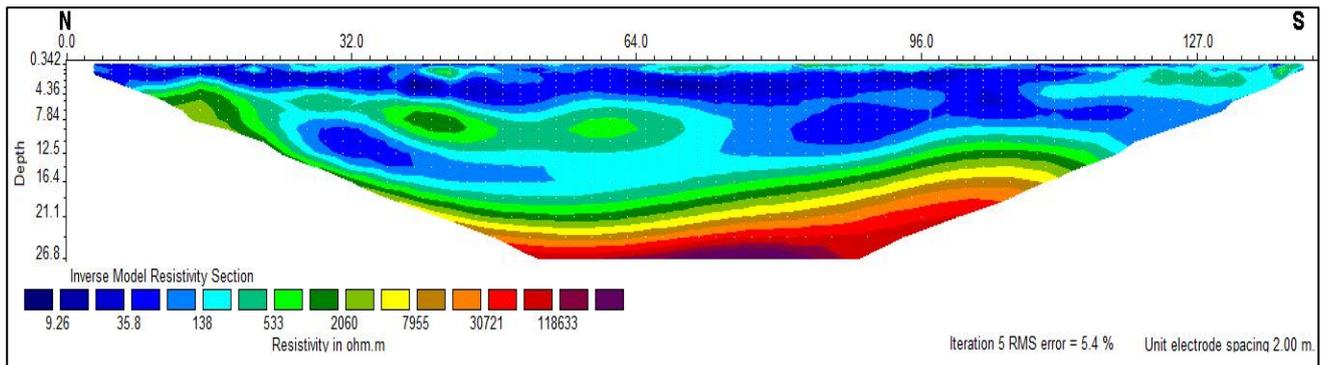
Através da Figura 30, pode ser observado uma camada inicial de solo contendo alguns poucos centímetro (entre 10 e 50 cm) marcado pela linha pontilhada verde, após essa camada inicial, existe uma camada de resíduos que varia entre 20 centímetros e 1,6 metros, marcada pela linha pontilhada vermelha, embaixo da camada de resíduos começa uma nova camada, um substrato argiloso.

Observando as Figuras 27, 28 e 29, as curvas de ajuste estão definidas pela resistividade, causando assim um pior ajuste para os valores de IP. Como a cargabilidade é um efeito que depende de alguns condicionantes (presença de determinados materiais e sua disposição) ela pode ser variável dentro de uma mesma litologia, sendo assim, os valores de cargabilidade obtidos são médias das camadas definidas pela resistividade das SEVs. (USTRA, 2013).

Na SEV 1 (Figura 27), o maior valor de cargabilidade foi relativamente alto (15,1 mV/V) e relacionado com a camada onde foi interpretada a presença de contaminação, nesse caso o responsável pela elevada cargabilidade deve ser a presença de resíduos metálicos, visto

que o chorume não se polariza (LAUREANO, 2006). Na SEV 2 (Figura 28) o maior valor de cargabilidade (18,5 mV/V) está relacionado com a primeira camada de solo, podendo ser causada pelo efeito de uma polarização de membrana. A SEV 3 (Figura 29) possui somente valores de cargabilidade relativamente baixos (MOURA & MALAGUTTI, 2003) menores que 15 mV/V.

Figura 31 – Seção de CE, sentido N-S.

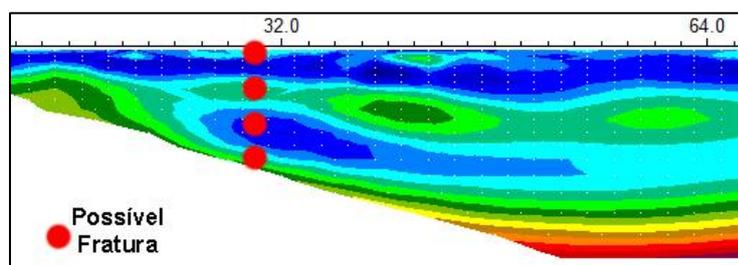


Fonte: Autor (2016).

Através da Figura 31, observa-se no perfil de CE, que o embasamento é mais profundo no meio do perfil e mais raso nas bordas do perfil. Os valores de menor resistividade (<70 ohm m) se encontram ao longo de todo perfil, levando a interpretação de que a presença do chorume pode estar também, ao longo de todo perfil, concordando com os resultado de Moreira et al.2011 (Figura 1).

Um detalhe do CE é a presença de uma anomalia que pode estar associada à presença de uma pequena fratura próximo aos 30 m do perfil, conforme mostra a Figura 32.

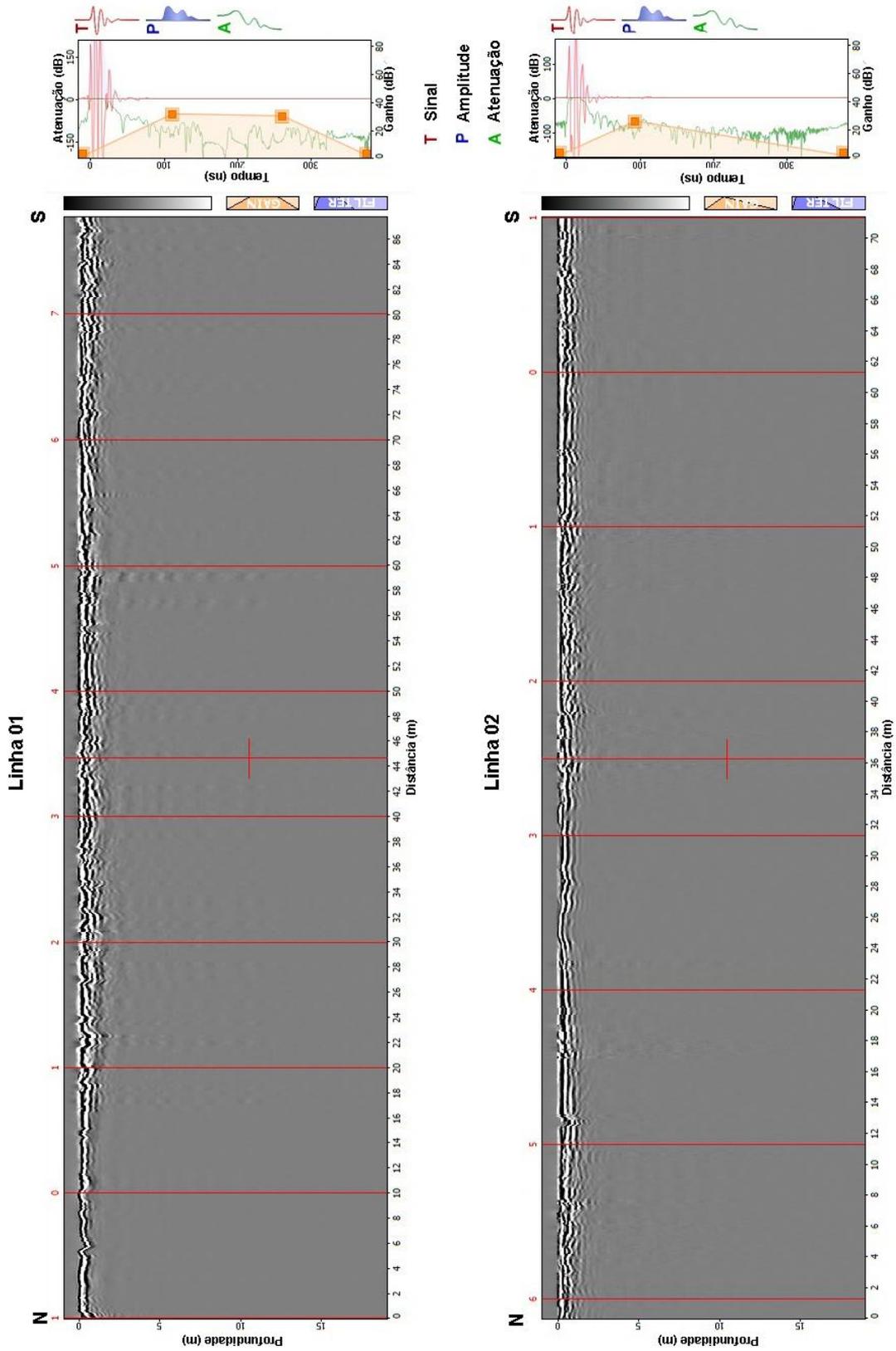
Figura 32 – Detalhe de possível fratura no CE.



Fonte: Autor (2016).

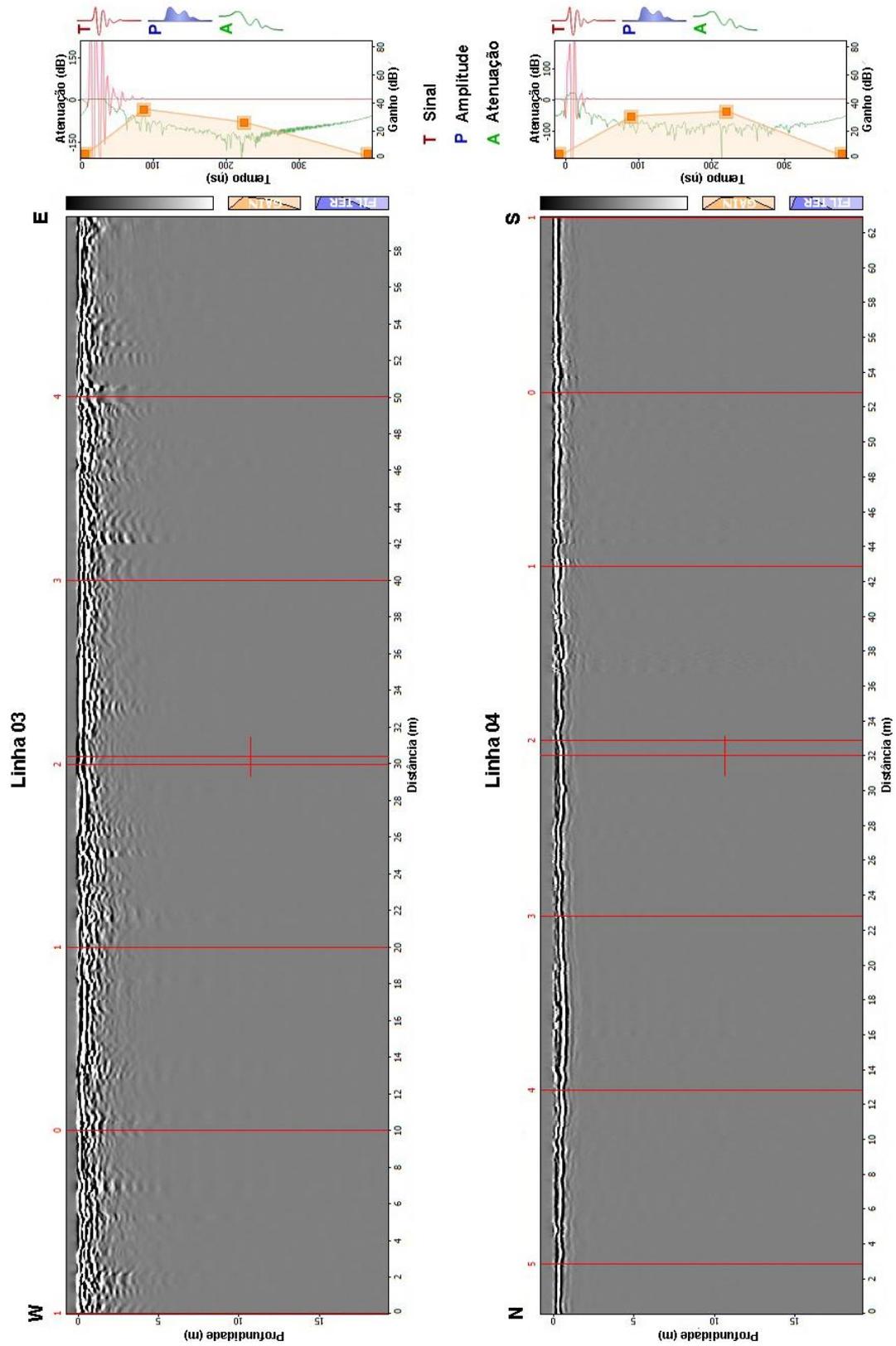
A seguir são apresentados os radargramas de GPR dos perfis 01 e 02 na Figura 33 e dos perfis 03 e 04 na Figura 34.

Figura 33 – Radargrama das linhas 01 e 02 de GPR.



Fonte: Autor (2016).

Figura 34 – Radargrama das linhas de 03 e 04 de GPR.



Fonte: Autor (2016).

Os radargramas de GPR apresentados nas Figuras 33 e 34 mostram uma fina camada de refletores com espessura que varia de alguns poucos centímetros (entre 20 e 30 centímetros) a alguns poucos metros (entre 1 e 2 metros). Após a marca de 2 metros de profundidade, em todos os radargramas, o sinal sofre uma forte atenuação devido, provavelmente, a alta condutividade da área (PORSANI et al., 2003), como é possível de ver no espectro de atenuação a direita de cada radargrama. A aplicação de ganhos não realçam outros refletores além dos apresentados nos radargramas.

Os radargramas das linhas 01 e 02 (Figura 33) ficam dentro da área do aterro e possuem algumas reverberações, possivelmente relacionadas à presença dos resíduos e também de raízes das árvores do local. O radargrama da linha 03 (Figura 34) é o que possui maior potência de sinal e também mais reverberações, na linha 03 (Figura 34) as reverberações são causadas somente pelos resíduos, pois não há árvores nas proximidades. O radargrama da linha 04 (Figura 34), que fica fora da área do aterro, possui refletores com menos reverberações do sinal, possivelmente por causa da ausência dos resíduos e de árvores.

Os resultados das SEVs (Figuras 27, 28 e 29) e do CE (Figura 31) apresentam os menores valores de resistividade em profundidade menores de 2 metros, concordando com a atenuação causada abaixo dessa profundidade nos radargramas.

7.2 Considerações

Estudos mostram que o chorume gerado em aterros, podem possuir uma vida maior que 30 anos (FARQUHAR, 1989), sendo o que parece ser o caso da problemática encontrada neste trabalho, onde mesmo com mais de 20 anos de encerramento das atividades, a área ainda é visivelmente impactada pelos resíduos depositados.

Os dados de GPR sofreram uma atenuação muito maior do que o esperado, impossibilitando uma melhor resposta em profundidade, e logo não contribuindo muito para os objetivos deste trabalho.

A análise de DBO pode ter sofrido alguma interferência na resposta, visto que o equipamento para realiza-la estava com problemas, gerando uma demora maior do que a ideal para começar a análise.

Os dados geoeletricos, apesar de poucos devido a problemas técnicos com o equipamento, obtiveram um bom resultado, principalmente os de eletrorresistividade (SEV e CE), contribuindo para a realização dos objetivos deste trabalho.

Entre os objetivos citados no início, podemos fazer algumas considerações a respeito deles:

- Delimitar a espessura e sequência das camadas em subsuperfície: a camada de solo superficial é menor do que 1 metro, as camadas de resíduos possuem espessura entre 1 e 5 metros, isso considerando somente os locais com dados obtidos.

- Identificar fraturas em subsuperfície: a geologia metamórfica do local propicia a presença de fraturas. Diferente de estudos já realizados no local, neste somente uma fratura foi interpretada através do CE, servindo provavelmente, como caminho para percolação do chorume da área.

- Estimar a profundidade do lençol freático: a presença de dois riachos próximos, o embasamento raso, a baixa altitude da área e a localização de camadas saturadas indicam que o lençol freático deve estar a alguns poucos metros, talvez nas camadas interpretadas como saturadas das SEVs, a falta de dados a respeito da morfologia do embasamento dificulta estimar tanto a profundidade como a direção do lençol freático.

- Verificar a presença de uma possível pluma de contaminação: a existência de zonas com baixa resistividade é o principal indicativo da presença de uma pluma de contaminação ainda ativa no local, e está presente em todos os dados geofísicos levantados neste trabalho.

- Realizar uma análise química da água superficial da área: apesar de não ter sido realizado uma análise completa, os parâmetros obtidos estão dentro da potabilidade e também dentro do que se espera para aterros muito antigos.

Por fim, alguns objetivos puderam ser em parte alcançados, servindo agora como um auxiliar para a Prefeitura Municipal de Caçapava do Sul na escolha de medidas de remediação a serem tomadas no futuro.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-ZEID, N.; BIANCHINI, G.; SANTARATO, G.; VACCARO, C. 2004. **Geochemical characterization and geophysical mapping of landfills: the Marozzo canal**. Environmental Geology.
- AL-TARAZI, E.; AL-NAGA, A.; EL-WAHEIDI, M.; ABU, J. R. 2006. **Electrical geophysical and hydrogeological investigations of groundwater aquifers in Ruseifa municipal landfill, Jordan**. Environmental Geology.
- AL-TARAZI, E.; ABU, J. R.; AL-NAGA, A.; EL-WAHEIDI, M. 2008. **Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa municipal landfill utilizing VLF-EM method**. Journal of Applied Geophysics.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 8849/1985. 1985. **Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos**.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 8419/1992. 1992. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**.
- ANNAN, A.P. 2005. **Ground-Penetrating Radar, Near-Surface Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists.
- BERNSTONE, C.; DAHLIN, T.; OHLSSON, T.; HOGLAND, W. 2000. **DC resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys**. Lund University.
- BRAGA, A. C. O.; CARDINALI, M. T. 2005. **Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos e contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos**. Revista Brasileira de Geofísica.
- BORGES, W. R. 2007. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. USP.
- BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. 2010. **Monitoramento temporal de contaminação por chorume usando métodos geoeletricos**. XII International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- CARLSON, N.; HARE, J.; ZONGE, K. 2001. **Buried landfill delineation with induced polarization: progress and problems**. SAGEEP.
- CAVALCANTI, S.; SATO, H.; LIMA, O. 2001. **Geofísica elétrica na caracterização da hidrogeologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, Salvador, Bahia**. Brazilian Journal of Geophysics.
- CESAR, H. **Métodos Elétricos**. 2014. DGAE – Unicamp.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 2001. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo, SP.

- CHEMALE, F. Jr. 2000. **Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense**. UFRGS.
- ÇNAR, H.; ALTUNDAS, S.; ERSOY, E.; BAK, K.; BAYRAK, N. 2015. **Application of two geophysical methods to characterize a former waste disposal site of the Trabzon-Moloz district in Turkey**. Environmental Earth Science.
- CPRM. Ministério de Minas e Energia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2000. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeira do Sul, Folha SH. 22-Y-A**. In: PORCHER, C. A.; LOPES, R. C.
- DAHLIN, T.; ROSQVIST, H.; LEROUX, V. 2010. **Resistivity-IP mapping for landfill applications**. Near Surface Geoscience.
- DANIELS, D. J. 2004. **Ground Penetrating Radar - end Edition**. London: The Institution Of Electrical Engineer.
- DEPONTIS, N.; HARRIS, C.; DAVIES, M. C. R.; KOUKIS, G.; SABATAKAKIS, N. 2005. **Application of electrical imaging to leachate plume evolution studies under in-situ and model conditions**. Environmental Geology.
- ELIS, V. R. & ZUQUETTE, L.V. 2002. **Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos**. Revista Brasileira de Geociências.
- ELIS, V. R.; MENDONÇA, C. A.; PORSANI, J. L.; STROBINO, E. F. 2008. **O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e depósitos de resíduos**. Revista Brasileira de Geofísica.
- FACHIN, S. J. S. 2007. **Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto-SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema**. IAG-USP.
- FACHIN, S. J. S. 2012. **O sinal de potencial espontâneo em investigações ambientais: fatores que condicionam a amplitude de uma anomalia**. IAG-USP.
- FARQUHAR G. J. 1989 **Leachate: production and characterization**. Canadian Journal of Civil Engineering.
- FONTOURA, M. J. 2011. **Estudo geológico e geofísico da dispersão de contaminantes em vazadouro controlado de resíduos sólidos urbanos na área metropolitana do porto**. FCUP.
- GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. 2007. **O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade**. Revista Brasileira de Geofísica.
- GODIO, A. **Magnetic data interpretation in a industrial waste landfill**. 2000. Annali di Geofísica .
- GOOGLE EARTH. Disponível em <google.com/earth/>. Acesso em 10 de outubro de 2016.

GOOGLE MAPS. Disponível em <maps.google.com >. Acesso em 10 de outubro de 2016.

HARTMANN, L. A.; SILVA, L. C.; REMUS, M. V. D.; LEITE, J.; PHILLIP, R. 1998. **Evolução geotectônica do sul do Brasil e Uruguai entre 3.3 Ga e 470 Ma.** Congresso Uruguayo de Geologia.

HARTMANN, L. A.; PORCHER, C. C.; REMUS, M. V. D. 2000. **Evolução das rochas metamórficas do Rio Grande do Sul.** UFRGS.

IKHIFA, I.; UMEGO, M. N. 2015. **Mapping groundwater contamination around a dumpsite in Benin City, Nigeria, using VLF-EM method.** Journal of geography, enviromental and earth science international.

IRIS INSTRUMENTS, **Iris Instruments.** Orleans, France.

JOL, H. M. 2009. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications.** Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science.

KEARY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. 2009. **Geofísica de Exploração.** Oficina de Textos.
LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. 2006. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP.** Revista Brasileira de Geofísica.

LAUREANO, A. T. **Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT.** UFMT. 2007.

LEROUX, V.; DAHLIN, T.; ROSQVIST, H. 2010. **Time-domain IP and Resistivity Sections Measured at Four Landfills with Different Contents.** Near Surface Geoscience.

MANTLIK, F.; MATIAS, M.; LOURENÇO, J.; GRANGEIA, C.; TARECO, H. 2009. **The use of gravity methods in the internal characterization of landfills: a case study.** Journal of Geophysics and Engineering,

MARTINHO, E.; ALMEIDA, F. 2006. **3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal.** Environmental Geology.

MONDELLI, G.; GIACHETI, H. L.; BOCOV, M. E. G.; ELIS, V. R.; HAMADA, J. 2007. **Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil.** Environmental Geology.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. 2008. **Anomalias de cargabilidade em aterro de resíduos sólidos domiciliares.** Revista Brasileira de Geofísica.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. 2009. **Decomposição de resíduos sólidos domiciliares e variações na resistividade e cargabilidade.** Revista Brasileira de Geofísica.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; FRIES, M. 2009. **Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh.** Revista Brasileira de Geofísica.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; HANSEN, M. A. F. 2011. **Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica.** Revista Brasileira de Geociências.

MOREIRA, C. A. OLIVEIRA, M. T. SILVA, A. C. 2011. **Estudo geofísico em aterro controlado disposto sobre rochas fraturadas.** Ambi-Água,

MOREIRA, C. A.; GODOY, L. H.; SARDINHA, D. S.; CONCEIÇÃO, F. T.; DEL ROVERI, C. 2012. **Caracterização geofísica em aterro de resíduo sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica.** Revista do instituto de geociências USP.

MOTA, R.; SANTOS, F. A. M.; MATEUS, A.; MARQUES, F. O.; GONÇALVES M. A.; FIGUEIRA, J.; AMARAL, H. 2004. **Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys.** Journal of Applied Geophysics.

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. 2003. **Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de rio claro – SP.** Geociências.

OKPOLI, C. C. 2003. **Application of 2D electrical resistivity tomography in landfill site: a case study of Iku-Ikare Akoko, Nigereia.** Hindawi.

OLIVEIRA, C. 2006. **Caracterização Geofísica do Solo para uso em Agricultura de Precisão.** USP.

OLIVEIRA, M. T.; MOREIRA, C. A.; MENEZES, A. M. C. 2010. **Aplicação do método de polarização induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul – RS.** Revista Brasileira de Geofísica.

OLOFSSON, B.; JEMBERG, H.; ROSENQVIST, A. 2005 **Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling.** Environmental Geology.

ONOJASUN, O. E. 2015. **2D electrical resistivity tomography investigation in landfill site: a case study of Millar Road landfill, Baldivis, Australia.** Internation Research Journal of Earth Sciences.

ORELLANA, E. 1972. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua.** Paraninfo.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE, F. Jr.; LOPES, R.C. 2000. **A Bacia do Camaquã.** CIGO/UFRGS.

PEREIRA, P. A.; LIMA, O. A. L. 2007. **Estrutura elétrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curtume no município de Alagoinhas-BA.** Revista Brasileira de Geofísica.

PINTO, L. G. R.; OLIVEIRA, C. E. S.; FARIA, B. M.; ANDRADE, J. B. F. 2013 **Estudos Geoelétricos (Sondagem Vertical e Caminhamento Elétrico) em Sedimentos Aluvionares do Rio Madeira - Município de Porto Velho-RO.** CPRM.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R. 2005. **The Late Neoproterozoic Granitoid magmatism of the Pelotas Batholith**, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*.

PHILIPP, R. P.; FORMOSO, M. L. L.; DOSSIN, I.; CHEMALE, F. Jr.; CAMPOS, R. S. 2010. **Estruturas primárias e tectônicas do Anortosito Capivarita, Pântano Grande (RS): significado e implicações na sua evolução petrológica**. *Revista Brasileira de Geociências*.

PORSANI, J. L. 1999. **Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP**. UNESP, Rio Claro-SP, Brasil.

PORSANI, J. L.; FILHO, W. M.; ELIS, V. R.; SHIMELES, F.; DOURADO, J. C.; MOURA H. P. 2003. **The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil**. *Journal of Applied Geophysics*.

PUJARI, P.; PARDHI, P.; MUDULI, P.; HARKARE, P.; NANOTI, M. **Assessment of pollution near landfill site in Nagpur, India by resistivity imaging and GPR**. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007.

SAMSUDIN, A. R.; HAMZAH, U.; YAACOB, W. Z. W.; RAHIM, B. E. A.; SZE, L. Y. 2003. **Application of geophysical method to delineate contamination in waste disposal site of Ampar Tenang**. *Geological Society of Malaysia*.

SANTOS, F. M. 2005. **Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuiabá-MT**. UFMT.

SANTOS, A. C. O.; MELLO, F. V.; KAMPHORST, J. S. C. 2010. **Estudos geofísicos em aterro controlado no município de Caçapava do Sul – RS**. Unipampa.

SHIRAIWA, S.; LISOVSKY, S. P.; ELIS, V. R., PORSANI, J. L., BORGES, W. R. 2002. **Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá-MT**. *Brazilian Journal of Geophysics*.

STANTON, G. P. & SCHRADER, T. P. 2001. **Suface geophysical investigation of a chemical waste landfill in northwestern Arkansas**. *United States Geological Service*.

STEVANATO, R.; FERREIRA, F. J. F.; WOSNIAK, R.; SIMIONI, M. T. S. 2004. **Mapeamento de pluma de contaminação no aterro sanitário de Coronel Vivida-PR**. I Simpósio Sociedade Brasileira Geofísica.

TERRAPLUS. 2003. **Syscal PRO – Users manual**.

USTRA, A. T. 2008. **Utilização dos métodos eletrorresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru-SP**. IAG-USP.

USTRA, A. T. 2013. **Estudo da resposta IP de solos argilosos contaminados por hidrocarbonetos e chorume**. IAG-USP.

VINEGAR, H. J.; WAXMANN, M. H. 1984. **Induced polarization of shaly sands** **Geophysics**.

WARD, S.H. 1990. **Geotechnical and Environmental Geophysics**. Volume I: Review and Tutorial. SEG, Tulsa.

WU, T.; HUANG, Y. 2006. **Detection of illegal dump deposit with GPR: case study**. ASCE.

XAVIER, F. F.; BERKENBROCK, P. G. 2005. **Mapeamento geométrico no aterro sanitário do município de Blumenau-SC**. XI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.