

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

WELYNTON ARAUJO RAMOS

**ESTUDO DE INFRAESTRUTURA URBANA COM A UTILIZAÇÃO DO
MÉTODO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) NA ÁREA
URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL**

CAÇAPAVA DO SUL

2022

WELYNTON ARAUJO RAMOS

**ESTUDO DE INFRAESTRUTURA URBANA COM A UTILIZAÇÃO DO
MÉTODO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) NA ÁREA
URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL**

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. José Waldomiro Jiménez Rojas

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima

CAÇAPAVA DO SUL

2022

R175e Ramos, Welynton Araujo

ESTUDO DE INFRAESTRUTURA URBANA COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) NA ÁREA URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL / Welynton Araujo Ramos.

100 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2022.

"Orientação: José Waldomiro Jiménez Rojas".

1. GPR. 2. Infraestrutura urbana. 3. Geofísica rasa. 4. Geotecnia. 5. Caçapava do Sul. I. Título.

WELYNTON ARAÚJO RAMOS

ESTUDO DE INFRAESTRUTURA URBANA COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) NA ÁREA URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL

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 e aprovado em: 24 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Waldomiro Jimenez Rojas
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dra. Jéssica Weiler
UNIPAMPA

Me. Ary Sá de Figueiredo
CORSAN



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 22/06/2022, às 09:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JESSICA WEILER, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 04/07/2022, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0770416** e o código CRC **DB3CDCAC**.

Dedico este trabalho à minha mãe, Mara, e à minha tia, Maria, que foram as maiores incentivadoras dessa conquista, e também ao meu irmão Geovany por me apoiar nos estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e sabedoria para continuar os estudos.

Agradeço também à toda minha família, em especial à minha mãe, Mara, que teve todo o tempo de graduação junto comigo, à minha tia Maria, ao meu irmão Geovany e à minha prima Nataly que nunca mediram esforços, amor, paciência para conseguir com que eu me formasse.

Agradeço à Unipampa pela oportunidade de estudar em uma universidade pública e de altíssima qualidade. Também agradeço por disponibilizar o equipamento GPR.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Rojas, em aceitar o convite para me orientar e sugerir o tema para o Trabalho de Conclusão de Curso, e pela paciência que teve comigo e todas as ajudas durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcus Vinicius, por todas as ajudas durante o Trabalho de Conclusão de Curso, e pelos ensinamentos em sala de aula, e pela paciência que teve comigo durante a realização desse trabalho.

Agradeço a todos os professores da Unipampa pelos ensinamentos em sala de aula e pelas oportunidades durante a graduação, um agradecimento em especial aos professores: Prof. Dr. Éverton Frigo, Prof^a Dra. Anelise Schmidt, Prof. Dr. Osmar Giuliani, Prof. Dr. Alexandre Bonatto, Prof. Dr. Felipe Caron, Prof. Dr. Felipe Guadagnin, Prof. Dr. Ezequiel Galvão, Prof. Dr. José Pedro, Prof. Dr. Mário Rosales e Prof. Dr. Maximilian Fries.

Agradeço ao mestre e técnico da Unipampa, Lenon Melo, por todas as ajudas e dicas em campo durante a graduação e também nesse Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que fiz durante a graduação em especial: Patrick, Guilherme, Paulo Roberto, Ana Laura, Lorena, Victor, Matheus Fernandes, Matheus Freire, Mayra, Filipi Godinho, Presida, Jonas, Nicolas, Lessandro, Issacar, Jean Carlo, Paulo, Parazão e ao motorista Beto pelas parcerias e pelas ajudas em todas as atividades e etapas que passamos juntos.

Agradeço ao colega Frederick pelas ajudas na aquisição dos dados de GPR desse Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço ao mestre Felipe Augusto pelas ajudas, dicas e sugestões durante o processamento dos dados de GPR desse Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço aos amigos e colegas da Mecânica e Retificadora Muller Becker, por compreender os momentos de ausência do serviço para realizar o Trabalho de Conclusão de Curso, em especial: Beto, Mico, Bodão, Caçamba, Nelson, Ronaldo, Leandro, Filipe, Márcio, Maurel e Rafinha.

Agradeço aos membros da banca, Prof^a. Dra. Jéssica Weiler e Me. Ary Sá de Figueiredo, pelas sugestões e contribuições na defesa desse Trabalho de Conclusão de Curso.

“Nunca deixe para amanhã o que alguém pode fazer hoje.”

(Benjamin Franklin)

RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo de infraestrutura urbana, no qual foi utilizado o método Radar de Penetração no Solo (*GPR*) a fim de delimitar interferências subterrâneas, como tubulações de água, tubulações de esgoto e cabos elétricos, aos quais são materiais utilizados para o abastecimento das empresas e das casas de moradores da Rua Benjamin Constant, localizada no centro urbano do município de Caçapava do Sul - RS. A metodologia utilizada consiste na coleta de dados provenientes de perfis de *GPR* no decorrer da Rua Benjamin Constant, com início da linha na Rua XV de novembro e fim na Rua Bento Gonçalves. Para a aquisição dos dados de *GPR*, foi utilizado o arranjo de afastamento comum (*common offset*) através de antenas monoestáticas blindadas de frequência central de 80 MHz e 200 MHz, desenvolvidas pela empresa italiana *Ingegneria Dei Sistemi* (IDS) e disponibilizadas pela Universidade Federal do Pampa (Unipampa). Os dados foram processados no *software ReflexW* da empresa alemã *Sandmeier Geophysical Research*, utilizando etapas de processamento, como: edição dos dados, filtragem temporal, filtragem espacial, correção do tempo zero, aplicação de ganhos e corte no tempo. Com a análise dos resultados, foi verificado 6 padrões de reflexão destacando os padrões de reflexão hiperbólicos (PR1), relacionados às interferências subterrâneas, se as mesmas tinham alguma continuidade entre os perfis, onde pôde-se analisar/visualizar 10 continuidades correlacionadas com tubulações atravessando a rua Benjamin Constant. As possíveis interferências enterradas no subsolo foram delimitadas a fim de possibilitar a criação de um documento técnico norteador, o qual permitirá aos gestores de infraestrutura do município terem acesso às estruturas enterradas de forma ágil, reduzindo assim, os riscos de acidentes e o tempo de cada intervenção no solo.

Palavras-chave: *GPR*; infraestrutura urbana; geofísica rasa; geotecnia; Caçapava do Sul.

ABSTRACT

In the present work, a study of urban infrastructure was carried out, in which the Ground Penetration Radar (GPR) method was used in order to delimit underground interferences, such as water pipes, sewage pipes and electrical cables, which are materials used to supplying companies and homes to residents of Benjamin Constant Street, located in the urban center of the municipality of Caçapava do Sul - RS. The methodology used consists of collecting data from GPR profiles along Benjamin Constant Street, starting at XV de Novembro Street and ending at Bento Gonçalves Street. For the acquisition of GPR data, the *common offset* arrangement was used through shielded monostatic antennas with central frequency of 80 MHz and 200 MHz, developed by the Italian company Ingegneria Dei Sistemi (IDS) and made available by the Federal University of Pampa (Unipampa). The data were processed in the ReflexW software from the German company Sandmeier Geophysical Research, using processing steps such as: data editing, temporal filtering, spatial filtering, time zero correction, application of gains and time cut. With the analysis of the results, 6 reflection patterns were verified, highlighting the hyperbolic reflection patterns (PR1), related to underground interferences, if they had any continuity between the profiles, where 10 continuities correlated with pipes crossing the Benjamin Constant Street can be seen. The possible interferences buried underground were delimited in order to enable the creation of a guiding technical document, which will allow the municipality's infrastructure managers to have access to buried structures in an agile way, thus reducing the risks of accidents and the time of each ground intervention.

Keywords: GPR; urban infrastructure; shallow geophysical; geotechnics; Caçapava do Sul

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização e acesso à área de estudo	6
Figura 2 – Mapa destacando o perfil da área de estudo	7
Figura 3 - Mapa do contexto geológico da área de estudo	8
Figura 4 - Mapa de solos do município de Caçapava do Sul.....	9
Figura 5 - Perfil Longitudinal da área de estudo.....	9
Figura 6 – Esquema de aplicação do método GPR.....	10
Figura 7 - Elementos básicos de um sistema GPR: (1) Unidade de controle; (2) Antena transmissora; (3) Antena receptora; (4 e 5) Unidade de exibição/monitoramento; (6) Odômetro	19
Figura 8 - Esquema de funcionamento de uma antena blindada	20
Figura 9 - Esquema de funcionamento de uma antena não blindada.....	20
Figura 10 – Representação da técnica de aquisição de perfil de reflexão com o arranjo common offset.....	25
Figura 11 - Croqui da rua Benjamin Constant apresentando os perfis realizados e os pontos em superfície	26
Figura 12 - Aquisições dos dados de GPR com antena de 80 MHz	27
Figura 13 - Aquisições dos dados de GPR com antena de 200 MHz	28
Figura 14 - Fluxograma de processamento dos dados de GPR	29
Figura 15 – A) Janela de importação dos dados no ReflexW e B) Janela de edição de cabeçalho no ReflexW	31
Figura 16 – Radargrama de exemplo com dado bruto da antena de 200 MHz.....	32
Figura 17 – Radargrama de exemplo com remove header gain aplicado	33
Figura 18 – Radargrama de exemplo com filtro Dewow aplicado	34
Figura 19 – Radargrama de exemplo com correção de tempo zero aplicada	35
Figura 20 – Radargrama de exemplo com ganho AGC aplicado	36
Figura 21 – Radargrama de exemplo com filtro passa-banda trapezoidal aplicado	36
Figura 22 – Radargrama de exemplo com filtro background removal aplicado.....	37
Figura 23 – Radargrama de exemplo com time cut aplicado em 150 ns	38
Figura 24 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 549 metros)	39
Figura 25 – Radargrama do Perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)	40

Figura 26 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)	41
.....	
Figura 27 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)	42
.....	
Figura 28 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)	43
.....	
Figura 29 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)	43
.....	
Figura 30 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 450 a 549 metros)	45
.....	
Figura 31 - Apresentação de radargramas de GPR com antenas de 250 MHz (esquerda) e 500 MHz (direita) mostrando a presença de uma tubulação (padrão hiperbólico) em subsuperfície	46
.....	
Figura 32 - Apresentação de um radargrama de GPR com antena de 270 MHz sobre diferentes tubulações (preenchidas com água e vazias) instaladas no SCGR-II.	46
.....	
Figura 33 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 549 metros)	48
.....	
Figura 34 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)	48
.....	
Figura 35 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)	49
.....	
Figura 36 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)	50
.....	
Figura 37 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)	51
.....	
Figura 38 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)	52
.....	
Figura 39 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 450 a 549 metros)	53
.....	
Figura 40 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 530 metros)	55
.....	
Figura 41 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)	55
Figura 42 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)	56
.....	

Figura 43 – Radargrama do perfil CC’ com antena de 80 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)	56
.....	
Figura 44 – Radargrama do perfil CC’ com antena de 80 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)	57
.....	
Figura 45 – Radargrama do perfil CC’ com antena de 80 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)	58
.....	
Figura 46 – Radargrama do perfil CC’ com antena de 80 MHz (intervalo de 450 a 530 metros)	58
.....	
Figura 47 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 533 metros)	60
.....	
Figura 48 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)	60
Figura 49 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)	61
.....	
Figura 50 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)	61
.....	
Figura 51 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)	62
.....	
Figura 52 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)	62
.....	
Figura 53 – Radargrama do perfil DD’ com antena de 80 MHz (intervalo de 450 a 530 metros)	63
.....	
Figura 54 – Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 549 metros)	65
Figura 55 - Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)	66
Figura 56 – Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)	67
Figura 57 – Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)	68
Figura 58 – Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)	69
Figura 59 – Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)	70

Figura 60 – Radargramas dos perfis AA’ e BB’ lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 450 a 549 metros)	71
Figura 61 – Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 530 metros)	72
Figura 62 - Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)	73
Figura 63 - Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)	74
Figura 64 - Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)	75
Figura 65 - Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)	76
Figura 66 - Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)	77
Figura 67 - Radargramas dos perfis CC’ e DD’ lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 450 a 530 metros)	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade elétrica (σ) e permissividade dielétrica (ϵ_r) de alguns materiais ...	14
Tabela 2 - Velocidade de propagação (m/ns) e atenuação (dB/m) de alguns materiais	18
Tabela 3 - Relação entre a frequência central das antenas, resolução vertical teórica e profundidade máxima de penetração	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 JUSTIFICATIVA	2
2 ESTUDOS ANTERIORES	4
3 DADOS DISPONÍVEIS.....	6
3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO.....	6
3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO	7
3.3 PERFIL LONGITUDINAL.....	9
4 CONCEITOS SOBRE O MÉTODO <i>GROUND PENETRATING RADAR</i>	
(GPR)	10
4.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO MÉTODO <i>GROUND PENETRATING RADAR</i> (GPR) ..	10
4.2 COMPORTAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS	15
4.3 EQUIPAMENTO GPR	19
4.3.1 ANTENAS	19
4.3.2 RESOLUÇÃO X PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	21
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
5.1 PLANEJAMENTO DE CAMPO	23
5.2 PARÂMETROS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS GPR	23
5.3 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS GPR	24
5.4 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE GPR.....	25
6 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GPR	29
6.1 IMPORTAÇÃO E EDIÇÃO DOS DADOS	30
6.2 DADO BRUTO	32
6.3 REMOVER GANHO DE CABEÇALHO	33
6.4 FILTRO 1D – DEWOW	33
6.5 CORREÇÃO DE TEMPO ZERO	34
6.6 GANHO AGC.....	35

6.7 FILTRO PASSA-BANDA TRAPEZOIDAL	36
6.8 FILTRO 2D – BACKGROUND REMOVAL.....	37
6.9 CORTE NO TEMPO	37
7 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	39
7.1 RADARGRAMAS DO PERFIL AA'	39
7.2 RADARGRAMAS DO PERFIL BB'	47
7.3 RADARGRAMAS DO PERFIL CC'	54
7.4 RADARGRAMAS DO PERFIL DD'	59
8 VISUALIZAÇÃO DOS RADARGRAMAS EM PERSPECTIVA 3D	65
8.1 VISUALIZAÇÃO DOS PERFIS AA' E BB' LADO A LADO	65
8.2 VISUALIZAÇÃO DOS PERFIS CC' E DD' LADO A LADO	72
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
10 TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população urbana e avanços tecnológicos, a infraestrutura das grandes cidades teve que ser reorganizada para a subsuperfície a fim de instalar redes subterrâneas de distribuição de água, esgoto, energia elétrica, gás e telecomunicações.

Conhecer a subsuperfície anteriormente as obras de manutenção e consertos de redes enterradas em solos urbanos é de grande importância. Um exemplo é a facilidade para as empresas de abastecimentos de águas, como a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), identificar tubulações de água e esgoto em subsuperfície, contribuindo para uma maior rapidez e segurança na execução dos serviços.

Outro problema muito recorrente nos grandes centros urbanos é o entupimento das tubulações das redes de esgoto. Normalmente isso ocorre pelo descarte de lixo doméstico em locais indevidos, que com o complemento das chuvas acabam carregando para as bocas de lobo e obstruindo-as.

Com o uso de métodos geofísicos, aos quais são ferramentas essenciais que podem ser empregadas para fornecer informações da subsuperfície de forma indireta e não-invasiva, destaca-se o método eletromagnético Radar de Penetração no Solo (*GPR*). Esse método é muito utilizado na engenharia civil, na parte de infraestrutura urbana, para: detecção de vazios ou cavidades, localização de armaduras de aço no concreto, investigações de fundações geotécnicas e localização de materiais (tubulações, cabos elétricos) em solo urbano, ao qual é o tema abordado neste estudo (BENEDETTO E PAJEWSKI, 2015).

O *GPR* é um método geofísico da classe dos métodos eletromagnéticos que podem ser utilizados para estudos em ambientes urbanos com o acoplamento de antenas blindadas, minimizando os problemas associados às interferências de ruídos externos e interferências as instalações existentes na área (PIRES E ARARUNA Jr, 2012).

O método *GPR* segundo os autores Jol (2009) e Porsani (1999) utiliza-se de ondas eletromagnéticas em altas frequências (10 MHz – 2,6 GHz) que são transmitidas para o solo, onde o sinal propagado sofre influência das propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície, possibilitando identificar e estimar a profundidade de redes de interferências urbanas.

No presente trabalho será tratado da aplicação do método geofísico *GPR* para a delimitação de interferências subterrâneas às quais são relacionadas a materiais que compõem a infraestrutura urbana da subsuperfície da rua Benjamin Constant no centro urbano do município de Caçapava do Sul. Este estudo poderá contribuir no planejamento e infraestrutura

de obras de expansão e manutenção da rua Benjamin Constant, tais como na delimitação de materiais em subsuperfície, que se perfurados podem ocasionar sérios problemas para a população.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral, utilizar o método geofísico Radar de Penetração no Solo (*GPR*) para delimitar materiais em subsuperfície relacionados à infraestrutura urbana de uma rua na cidade de Caçapava do Sul.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Coletar dados de *GPR*, para a delimitação de alvos em subsuperfície relacionados a infraestrutura da rua Benjamin Constant na cidade de Caçapava do Sul;
- Avaliar a viabilidade do método *GPR* na delimitação de interferências subterrâneas, com destaque às tubulações em subsuperfície no centro urbano;
- Realizar o processamento dos dados de *GPR*, a fim de realçar interferências subterrâneas desejadas;
- Correlacionar os dados de *GPR* com o contexto geológico/pedológico da área de estudo;
- Verificar a continuidade das interferências subterrâneas em perspectiva 3D.

1.3 Justificativa

A infraestrutura dos centros urbanos no decorrer dos anos, vem sendo ampliada para a subsuperfície, e em muitos casos de obras urbanas, muitas vezes utiliza-se métodos invasivos, como maquinários de retroescavadeira para auxiliar nas escavações dessas obras. Além disso, devido à falta de conhecimento prévio da subsuperfície, faz com que o rompimento ou perfuração de algum objeto gere prejuízos e atrasos para a realização desses serviços, como também, interromper o abastecimento da população.

Com o passar dos anos método não-destrutivos, com destaque aos métodos geofísicos, aos quais vêm sendo utilizados para investigar a subsuperfície de centros urbanos, auxiliando

na solução de problemas de infraestrutura urbana. Dentre os diversos métodos geofísicos que podem ser aplicados em áreas urbanas, pode-se destacar o método *GPR*, muito eficaz na identificação de interferências subterrâneas, como, tubulações de água e esgoto, instalações de cabos elétricos, dutos de gás, túneis, entre outros.

Como o método geofísico *GPR* é apropriado para se utilizar em meio urbano, devido a sua possibilidade de executar perfis contínuos da subsuperfície com maior rapidez e baixos custos se comparado as escavações, pode se obter resultados rápidos e de alta resolução. Ainda, por apresentar a delimitação/identificação dos locais com presença de materiais em subsuperfície, pode guiar o operador de retroescavadeira durante as escavações, reduzindo o tempo e os riscos de acidentes.

2 ESTUDOS ANTERIORES

A seguir serão apresentados estudos relevantes que tratam de assuntos relacionados com o tema principal desta pesquisa, que servirão de base para a mesma.

O Radar de Penetração no Solo, do inglês *Ground Penetrating Radar (GPR)* é um método não-destrutivo que pode, conseqüentemente, ser aplicado em ambientes urbanos e sensíveis. Outras aplicações do *GPR* são nas áreas geológicas, como no imageamento do solo raso e de estruturas de rocha em alta resolução, na localização de canais enterrados e no mapeamento do lençol freático. Em estudos não geológicos, como em arqueologia, pode ser utilizado para a localização de artefatos pré-históricos, paredes ou cavidades enterradas, e nas investigações forenses, para a localização de terrenos recentemente perturbados onde foram realizados enterros (KEAREY, 2009).

Segundo Dias (2012) com a utilização do método geofísico *GPR* é possível localizar antigas tubulações de diferentes tipos de materiais, compostas por concreto e ferro fundido, com vários diâmetros às quais são usadas para o escoamento de águas pluviais e rede de esgoto de grandes centros urbanos.

O Radar de Penetração no Solo pode ser usado para detectar e mapear características como paredes enterradas, tubos, túneis e obras de terraplenagem (DAVIS e ANNAN, 1989).

A aplicação do método geofísico *GPR* é constantemente utilizada por pesquisadores e profissionais da área, por ser um método não-invasivo que se destaca pela imagem de alta resolução e pelo baixo custo nos levantamentos, quando comparado com os outros métodos geofísicos (LEITE, 2009).

No trabalho de Dias (2012), utilizou-se perfis de *GPR* para a detecção de tubulações de água e esgoto, onde se utilizou uma antena blindada monoestática, da empresa *Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI)*, com frequência de 200 MHz, possibilitando verificar a direção, a profundidade e a continuidade das tubulações em 3D.

Os vazamentos em tubulações das redes de distribuição de água em vias públicas, geralmente ocasionam grandes transtornos, e a sua identificação nos centros urbanos é extremamente dificultada devido a impossibilidade de observação direta, acarretando diversos impactos econômicos, ambientais e sociais. Com isso, a utilização do método geofísico *GPR* é relevante para auxiliar na localização das tubulações com vazamentos de água, para assim fazer a manutenção adequada e amenizar maiores prejuízos econômicos e ambientais (TANIYAMA, 2019).

No trabalho de MATOS Jr (2009) o método geofísico *GPR* foi utilizado na identificação de barras de aço e zonas de vazios em concreto, porém apresentou algumas limitações para delimitar as dimensões dos alvos por não utilizar a frequência adequada da antena.

Em aplicações diretas nas áreas de planejamento e infraestrutura urbana das grandes cidades, para localização de redes de interferências, tais como tubulações metálicas, cabos elétricos e conduítes de plásticos, indica-se o método *GPR*. Esse método pode apresentar resultados satisfatórios na forma de *depth slices*, estimando as dimensões dos alvos e melhorando a visualização dos resultados (SANTOS, 2009).

Os órgãos governamentais responsáveis pela infraestrutura urbana muitas vezes desconhecem a posição exata das tubulações, e por não se ter uma gestão eficiente dos tubos, pode-se confrontar com situações perigosas em que os tubos subterrâneos são danificados durante as escavações. Com isso, a aplicação de alguma técnica não-destrutiva e eficiente na localização e no posicionamento de tubos subterrâneos torna-se importante. Para isso utiliza-se métodos geofísicos, como o método Radar de Penetração no Solo (TONG, 1993).

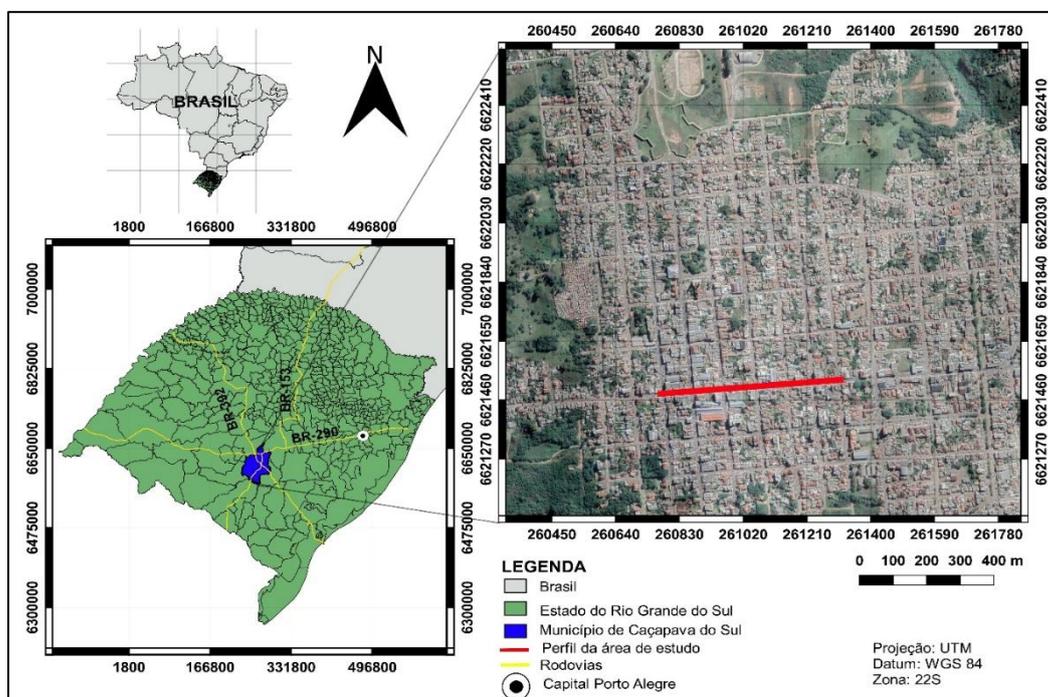
Ruy *et al.* (2012), utilizaram o *GPR* com antena de 200 MHz para auxiliar as obras de construção da Linha Amarela do metrô de São Paulo, mapeando as possíveis interferências enterradas na subsuperfície. Os resultados permitiram identificar tubulações associadas ao transporte de gás e água, cabos elétricos e telefônicos, e estruturas de concreto, servindo como guia para a equipe responsável por construir o túnel do metrô. Evitou-se, assim, problemas associados à ruptura acidental das redes de interferências no subsolo na rota do túnel do metrô, atestando a importância do uso do *GPR* em ambientes urbanos, antes de obras de grande porte (POLUHA, 2017).

3 DADOS DISPONÍVEIS

3.1 Localização e Acesso à Área de Estudo

A área de estudo está situada no estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul, onde o acesso se dá pelas BR-290 e BR-392 a partir da capital Porto Alegre (Figura 1).

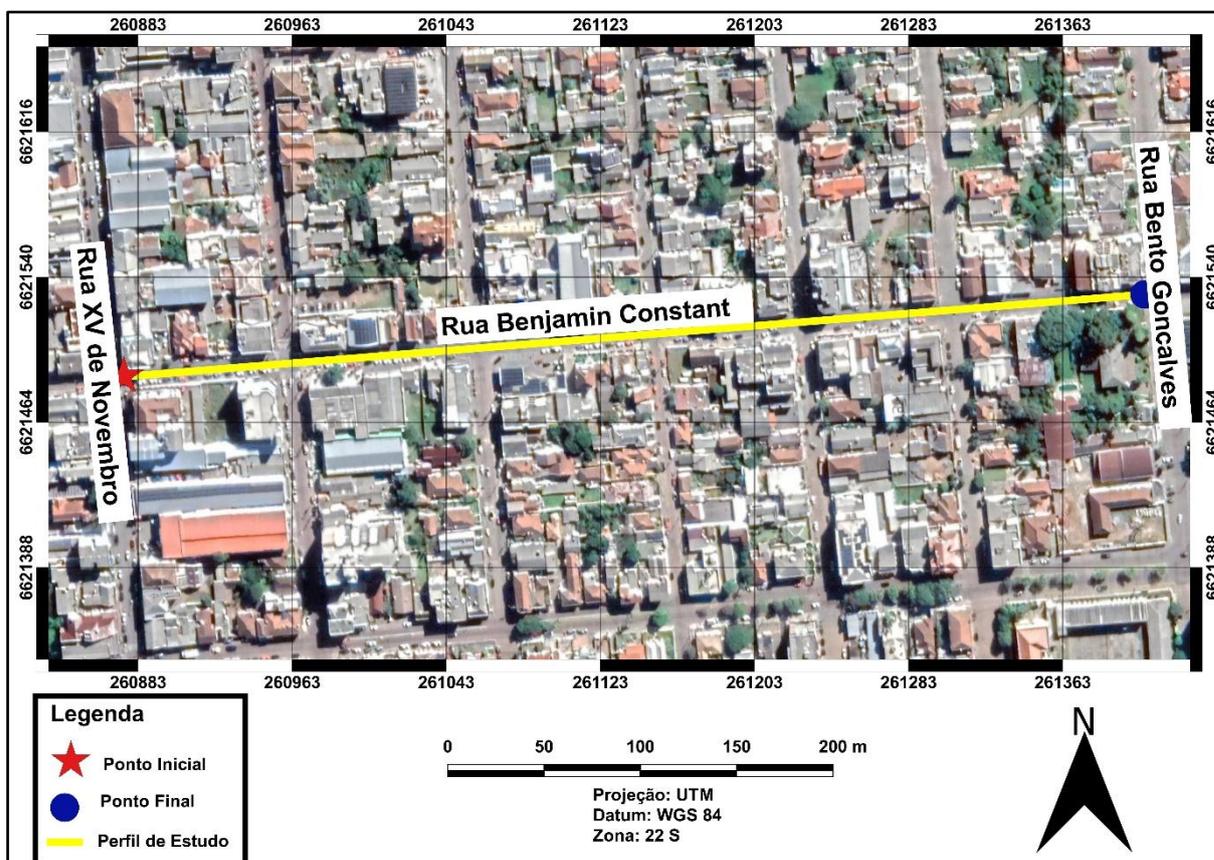
Figura 1 - Mapa de localização e acesso à área de estudo



Fonte: adaptado de Google Earth (2022) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006).

Na Figura 2 apresenta-se o mapa do centro urbano de Caçapava do Sul, destacado, em amarelo, onde serão realizados os perfis de *GPR*. O trecho é composto por duas camadas de pavimentos, sendo uma delas em asfalto e a outra em paralelepípedos graníticos que compõem o calçamento da rua Benjamin Constant. A Benjamin Constant é uma das principais ruas do centro urbano do município de Caçapava do Sul, a qual possui um intenso fluxo constante de veículos devido ao comércio local, fato pelo qual as aquisições dos dados de *GPR* foram realizadas em horário noturno.

Figura 2 – Mapa destacando o perfil da área de estudo



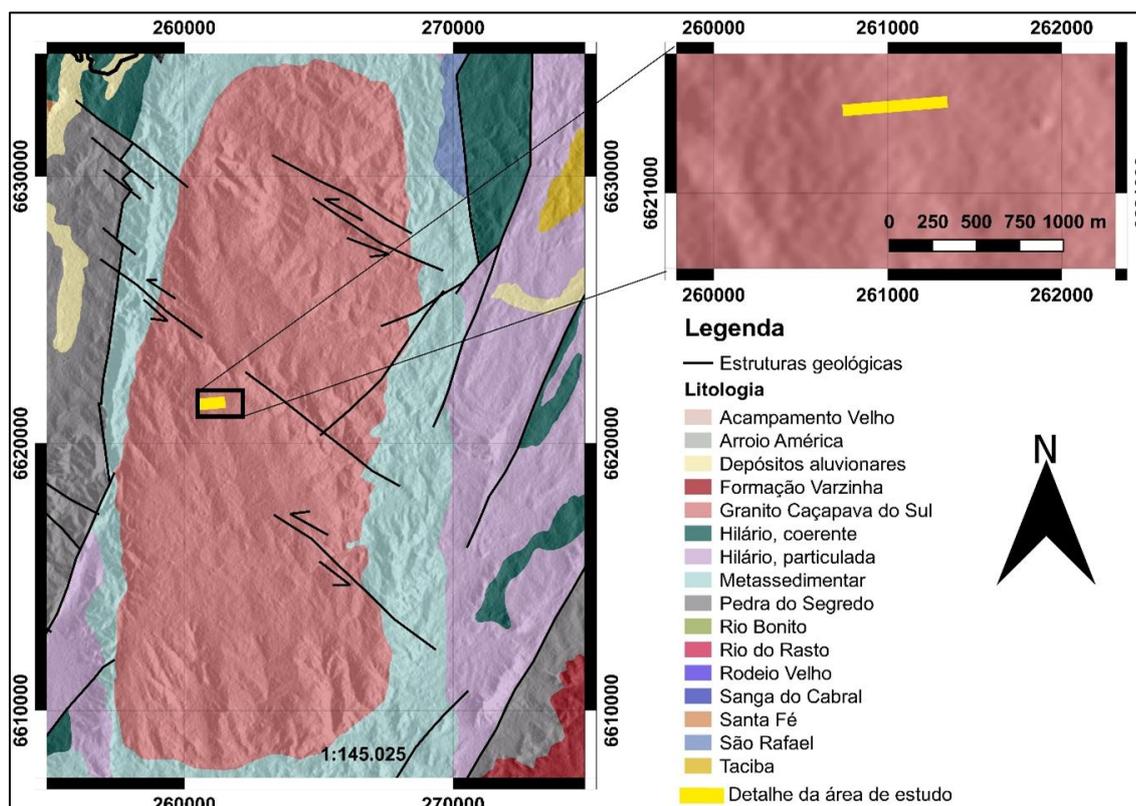
Fonte: adaptado de Google Earth (2022) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006).

3.2 Contexto Geológico

A geologia do município de Caçapava do Sul é composta por rochas que pertencem ao Complexo Granítico de Caçapava do Sul (CGCS), ao qual constitui de um corpo de aproximadamente 250 km² de extensão aflorante, intrusivo em metamorfitos de baixo grau (NARDI e BITENCOURT, 1993), como apresentado na Figura 3.

O Complexo Granítico de Caçapava do Sul é formado por três fácies principais: Biotita granitoides; Leucogranitóides e Granitóides transicionais. As fácies biotita granitoides são compostas por rochas de coloração cinza, tornando-se róseas quando intemperizadas contendo teores elevados de biotita e allanita como acessório característico. Já as fácies leucogranitóides são rochas de coloração rósea, com baixo teor de minerais máficos, contendo, localizadamente, granada e/ou muscovita, e as fácies granitóides transicionais, apresentam características entre as duas primeiras fácies (NARDI e BITENCOURT, 1983).

Figura 3 - Mapa do contexto geológico da área de estudo



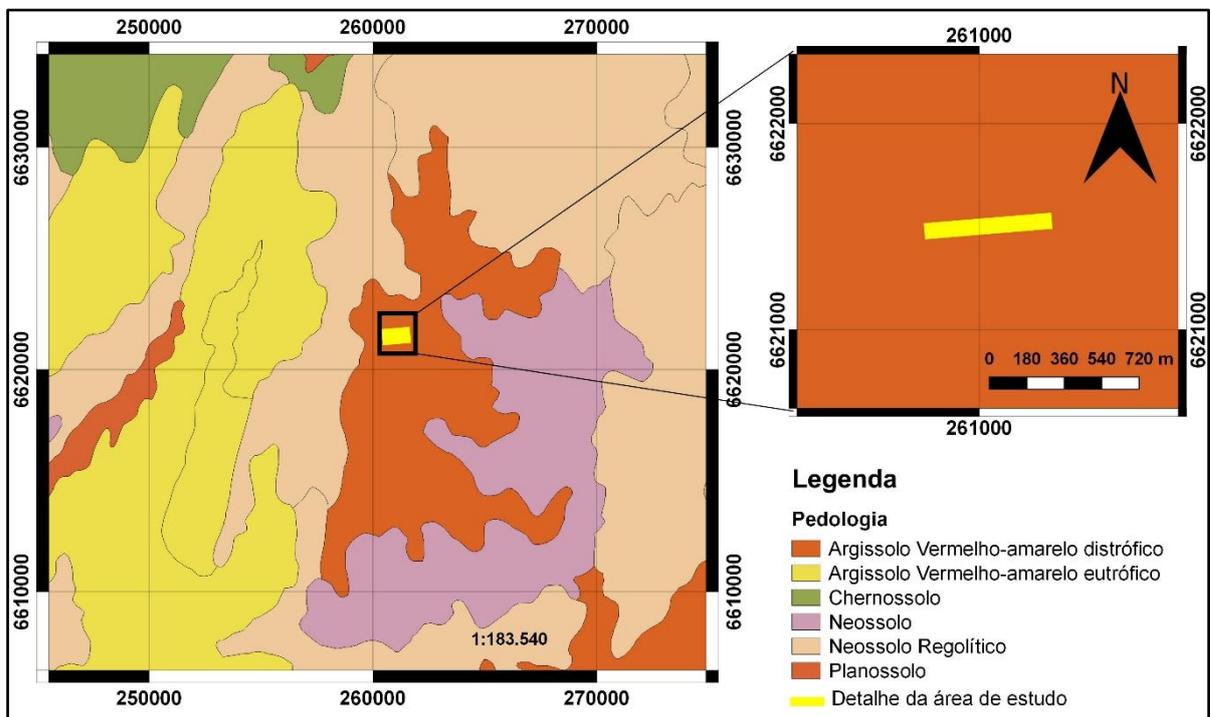
Fonte: adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2000).

Devido ao estudo ser de caráter local e da utilização de um método geofísico de investigação rasa, no caso o *GPR*, devem ser apresentados aspectos sobre a pedologia da área a ser estudada em Caçapava do Sul.

Segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (2000), o município de Caçapava do Sul é composto por diversos domínios pedológicos, devido à diversidade de formações geológicas da região.

Na Figura 4 apresenta-se o mapa pedológico da região de Caçapava do Sul, onde o domínio pedológico relacionado com a área de estudo apresentada, é o argissolo vermelho-amarelo distrófico apresentando-se com uma textura média cascalhenta/argilosa (CPRM, 2000).

Figura 4 - Mapa de solos do município de Caçapava do Sul



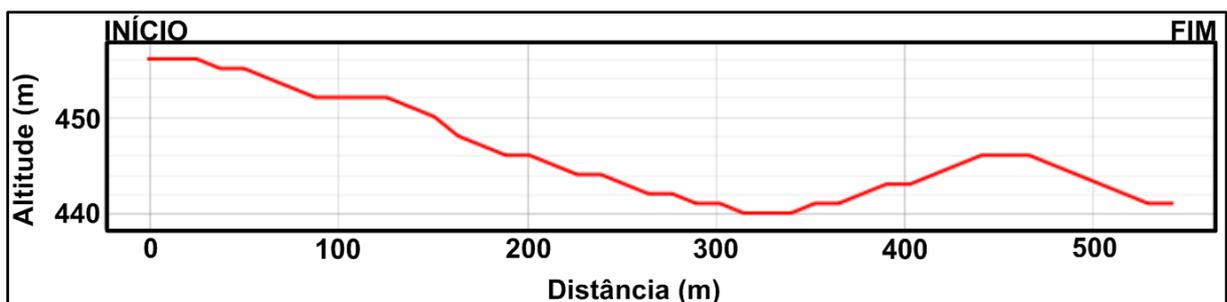
Fonte: adaptado de CPRM (2000).

3.3 Perfil Longitudinal

O perfil topográfico longitudinal da área de estudo, na Figura 5, foi apresentado para se ter noção de como posicionar os perfis de *GPR*. Observa-se no perfil topográfico longitudinal que se apresentam cotas variando de 458 metros, na parte mais alta, e 440 metros, na parte mais baixa, ao decorrer do perfil de estudo na Rua Benjamin Constant.

Os dados topográficos utilizados para a geração do perfil foram retirados do modelo Alos Palsar, o qual possui uma resolução espacial de 12,5 metros.

Figura 5 - Perfil Longitudinal da área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

4 CONCEITOS SOBRE O MÉTODO *GROUND PENETRATING RADAR (GPR)*

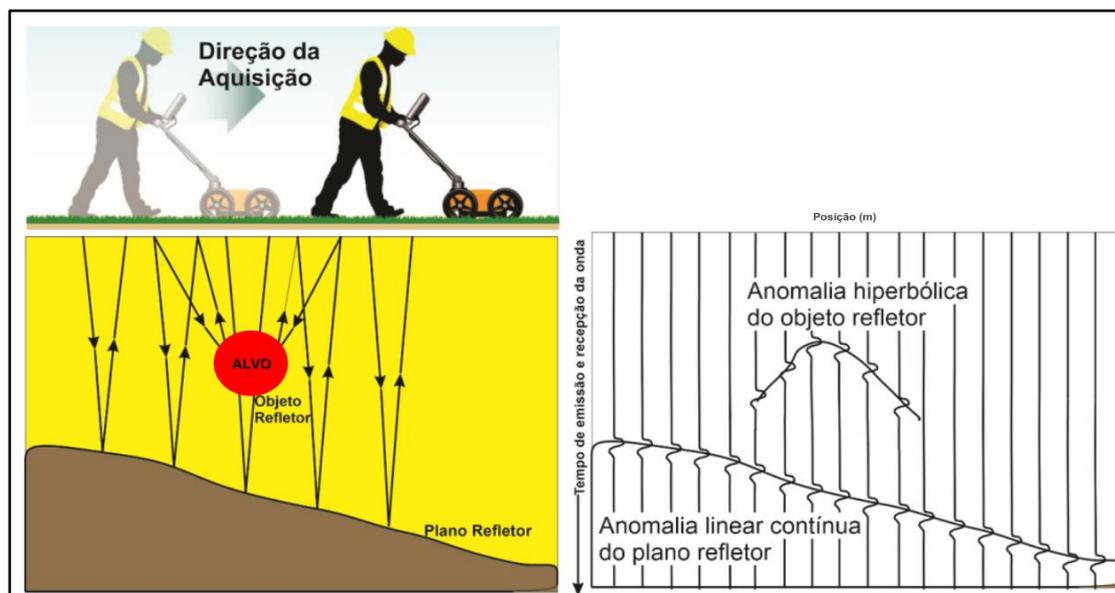
Nesta seção a seguir, serão apresentados os conceitos acerca da teoria da propagação das ondas eletromagnéticas, assim como as Equações de Maxwell e as relações constitutivas das propriedades eletromagnéticas dos materiais, base para o entendimento do método *GPR*.

4.1 Princípios Físicos do Método *Ground Penetrating Radar (GPR)*

Não se pode discutir sobre o método geofísico *Ground Penetrating Radar (GPR)* sem primeiro apresentar os princípios físicos que regem esse método, bem como a teoria do eletromagnetismo.

O método *GPR*, é classificado como um método eletromagnético que utiliza ondas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 MHz e 2,5 GHz) para localizar estruturas, feições geológicas rasas da subsuperfície e objetos enterrados pelo homem. O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados *GPR* é semelhante ao método sísmico de reflexão e a técnica sonar, porém é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (BORGES, 2007; PORSANI, 1999), como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Esquema de aplicação do método GPR



Fonte: adaptado de DA SILVA e UAGODA (2020).

A propagação de ondas eletromagnéticas em qualquer meio é descrita pela física e pela matemática e foram formuladas por Maxwell através de quatro equações, chamadas de

Equações de Maxwell, às quais descrevem transporte, dissipação, armazenamento e geração da energia eletromagnética nos meios materiais ou no vácuo (BORGES, 2002).

Segundo Borges (2002) estas equações relacionam o campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{H} , com variações no espaço, representadas pelo operador diferencial nabla (∇), e no tempo representadas pelo operador diferencial $\frac{\partial}{\partial t}$.

Nas Equações de Maxwell são apresentadas também as relações constitutivas, como densidade de corrente, \vec{J} , condutividade elétrica, σ , assim como duas grandezas relacionadas ao meio em que os campos eletromagnéticos se propagam: a permissividade dielétrica, ϵ , e a permeabilidade magnética, μ .

Segundo Telford (1990) para entender a propagação e atenuação das ondas eletromagnéticas é necessário usar as Equações de Maxwell de uma forma que relacione os vetores de campo elétrico e magnético. As Equações 1 e 2 são duas das Equações de Maxwell.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

em que:

\vec{J} → Densidade de corrente elétrica (A/m²);

\vec{E} → Campo elétrico (V/m);

\vec{B} → Densidade de fluxo magnético (Wb/m² ou T);

\vec{H} → Campo magnético (A/m);

\vec{D} → Deslocamento de corrente elétrica (C/m²);

t → Tempo (s).

A Equação 1 é uma afirmação matemática da Lei da Indução de Faraday em que um campo elétrico existe na região de um campo magnético variável no tempo, de modo que a força eletromagnética induzida (fem) é proporcional à taxa negativa de mudança do fluxo magnético (TELFORD, 1990).

Já a Equação 2 é uma confirmação matemática da Lei de Maxwell – Ampère, onde um campo magnético é gerado no espaço pelo fluxo de corrente e que esse campo é proporcional à corrente total em uma determinada região do espaço.

A partir da identidade vetorial $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{A} = 0$ obtém-se a Equação 3 utilizada para campos que variam no tempo.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) = 0 \quad (3)$$

em que

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (4)$$

similarmente,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \cdot \vec{D}) = 0 \quad (5)$$

Sabe-se que a divergência de densidade de corrente é equivalente à taxa de acúmulo de densidade de carga, \vec{Q} , partindo da Equação 5, em que

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \cdot \vec{D}) \quad (6)$$

portanto,

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \vec{Q} \quad (7)$$

As Equações 4 e 7 completam as outras duas Equações de Maxwell, em que a Equação 4 está relacionada com a Lei de Gauss para o campo magnético e a Equação 7 relaciona a Lei de Gauss para o campo elétrico.

Em regiões de condutividade finita, a carga não se acumula em nenhuma extensão durante o fluxo de corrente (omitindo condutores eletrolíticos), portanto, $\vec{Q} = 0$, de modo que

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (8)$$

Além da relação entre o deslocamento e o campo elétrico, também temos a seguinte relação entre \vec{B} e \vec{H} , onde

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (9)$$

Na Equação 8, ϵ_r é a permissividade dielétrica relativa e ϵ_0 é a permissividade dielétrica do vácuo = 8.85×10^{-12} (F/m). Na Equação 9, μ é a permeabilidade magnética do meio e μ_0 é a permeabilidade do vácuo $4\pi \times 10^{-7}$ H/m (Tm/A).

Como as Equações de Maxwell não são suficientes para descrever as interações dos campos eletromagnéticos com as propriedades físicas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética), foram formuladas as relações constitutivas que quantificam as propriedades eletromagnéticas dos materiais, as quais juntamente fornecem a base para descrição quantitativa dos sinais de *GPR* (JOL, 2009).

A primeira relação constitutiva, apresentada na Equação 10, que também pode ser conhecida como Lei de Ohm, mostra como as cargas livres (condutividade elétrica) de um material se comportam na presença de um campo elétrico externo, ou seja, expressa quantitativamente a capacidade que um material tem de conduzir corrente elétrica.

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (10)$$

em que:

$\sigma \rightarrow$ Condutividade elétrica do meio (mS/m);

$\vec{E} \rightarrow$ Campo elétrico (V/m);

$\vec{J} \rightarrow$ Densidade de corrente elétrica (A/m²)

A condutividade elétrica do meio geológico é controlada por vários fatores: teor de água, presença de minerais condutivos, porosidade, salinidade e a concentração de argila (KELLER, 1987). O aumento da condutividade elétrica do meio geológico faz com que tenha uma maior atenuação do sinal da onda eletromagnética do *GPR* e diminuição da profundidade de penetração dessa onda.

A segunda relação constitutiva relaciona o vetor campo elétrico \vec{E} ao vetor deslocamento elétrico ou polarização \vec{D} , onde ϵ é um fator de proporcionalidade denominado permissividade dielétrica do material, expresso em Farad/metro (F/m), mostrado na Equação 11.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (11)$$

Em estudos com *GPR* a permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica, representada pela letra k , é utilizada com valores adimensionais sendo expressa como mostra a Equação 12.

$$k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

em que:

$\varepsilon_0 \rightarrow$ Permissividade dielétrica do vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

$\varepsilon \rightarrow$ Permissividade dielétrica (F/m)

A Tabela 1 mostra valores de condutividade elétrica e permissividade dielétrica relativa de alguns materiais encontrados em meios geológicos.

Tabela 1 - Condutividade elétrica (σ) e permissividade dielétrica (ε_r) de alguns materiais

Materiais	σ(mS/m)	ε_r
Ar	0	1
Granito	0,01	5
Basalto	1	6
Diabásio	10	7
Arenito saturado	40	20 - 30
Areia de Cascalho	0,01	2 - 6
Argila	2	5
Solo arenoso	0,14	2,6
Solo argiloso	0,27	2,4
Calcário	0,5	4
Ferro	109	1
PVC	0	8
Asfalto	0	3 - 5
Concreto	0	5,5

Fonte: modificado de Davis e Annan (1989).

A terceira relação constitutiva, a qual relaciona o vetor campo magnético \vec{H} ao vetor densidade de fluxo magnético \vec{B} , por meio de um fator de proporcionalidade denominado permeabilidade magnética do meio μ e expresso em Henry/metro (H/m), apresentado na Equação 13. A permeabilidade magnética expressa a quantidade de energia armazenada através do surgimento da indução magnética.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (13)$$

A permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos, exceto os materiais ferromagnéticos, não apresenta variação significativa com a frequência da onda eletromagnética. Pode-se então considerar em estudos com o método *GPR* que o valor da permeabilidade magnética relativa é de aproximadamente 1 (OLHOEFT, 2000).

A permeabilidade magnética relativa é a razão entre a permeabilidade magnética absoluta do material μ e a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m), expressa na Equação 14. Porém, segundo Annan (2001), os efeitos de uma forte permeabilidade magnética não podem ser totalmente desprezados nos estudos com *GPR*.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (14)$$

4.2 Comportamento dos campos eletromagnéticos

O comportamento dos campos eletromagnéticos é regido pelas equações de Maxwell às quais foram demonstradas anteriormente. Para entender o comportamento ondulatório dos campos eletromagnéticos precisa reescrever as Equações de Maxwell com intuito de eliminar o campo elétrico \vec{E} ou o campo magnético \vec{H} , para então obter a equação da onda eletromagnética.

Primeiramente reescrevendo às equações de Maxwell em termos do campo elétrico \vec{E} , obtém-se a equação da onda transversal.

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (15)$$

A equação da onda transversal, mostrada na Equação 15, pode ser descrita em função da distância na direção de propagação da onda, à qual é $\beta = \vec{r} \cdot \vec{k}$, onde \vec{r} refere-se ao vetor posição espacial e \vec{k} o vetor direção de propagação.

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) = 0 \quad (16)$$

No caso de considerar a propagação da onda eletromagnética em um meio sem perda, onde $\sigma = 0$, então a Equação 16 pode ser simplificada para a Equação 17.

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) = 0 \quad (17)$$

Reescrevendo a Equação 17 em termos da velocidade de propagação, obtém-se a Equação 18.

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) \quad (18)$$

Como a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética tem uma relação com as propriedades eletromagnéticas dos materiais geológicos, como μ e ε , então pode ser reescrita como mostra a Equação 19.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (19)$$

em que:

$c \rightarrow$ Constante de velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s);

$\mu_r \rightarrow$ Permeabilidade magnética relativa (≈ 1 para rochas não magnéticas);

$\varepsilon_r \rightarrow$ Permissividade dielétrica relativa.

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética em um meio geológico é de extrema importância, pois a partir dela pode ser realizada uma conversão de tempo duplo de viagem (em nanosegundos) para profundidade (em metros), a partir da Equação 20.

$$v = \frac{h}{2t} \quad (20)$$

em que:

$v \rightarrow$ Velocidade de propagação (m/ns);

$h \rightarrow$ Profundidade (m);

$2t \rightarrow$ Tempo duplo de viagem (ns);

Em casos em que os materiais apresentam condições de baixa perdas, que geralmente é atribuída a $\sigma > 0$, a Equação 18 irá resultar na forma da Equação 21.

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt)e^{\pm\alpha\beta} \quad (21)$$

Pode-se observar na Equação 21 que surge um novo termo α elevado na exponencial, atribuído como constante de atenuação. Na Equação 22 é expressada a constante de atenuação em termos de σ , ε e μ com unidade no SI em dB/m.

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

A Tabela 2 mostra valores de velocidade de propagação (m/ns) e atenuação (dB/m) de alguns materiais que são encontrados em meios geológicos.

Tabela 2 - Velocidade de propagação (m/ns) e atenuação (dB/m) de alguns materiais

Materiais	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	0,3	0
Água doce	0,033	0,1
Água destilada	0,033	2×10^{-3}
Água do mar	0,01	10^3
Areia seca	0,15	0,01
Areia saturada	0,06	0,03 – 0,3
Calcário	0,12	0,4 - 1
Silte	0,07	1 - 100
Argila	0,06	1 - 300
Granito	0,13	0,01 - 1

Fonte: modificado de Davis e Annan (1989).

No caso em que a propagação da onda eletromagnética é reescrita em função da amplitude, chega-se à Equação 23.

$$A = A_0 e^{\alpha\beta} \quad (23)$$

em que:

A_0 → Amplitude inicial;

α → Constante de atenuação da onda eletromagnética (dB/m);

β → Constante de propagação da onda eletromagnética.

4.3 Equipamento GPR

O equipamento utilizado em sistemas *GPR* consiste em cinco principais elementos, isto é, a unidade transmissora, a unidade receptora, o odômetro, a unidade de controle e a unidade de exibição/monitoramento (DAVIS e ANNAN, 1989). Na Figura 7 apresenta-se um esquema de um sistema *GPR* semelhante ao equipamento utilizado neste trabalho.

Figura 7 - Elementos básicos de um sistema GPR: (1) Unidade de controle; (2) Antena transmissora; (3) Antena receptora; (4 e 5) Unidade de exibição/monitoramento; (6) Odômetro



Fonte: modificado de Utsi (2017).

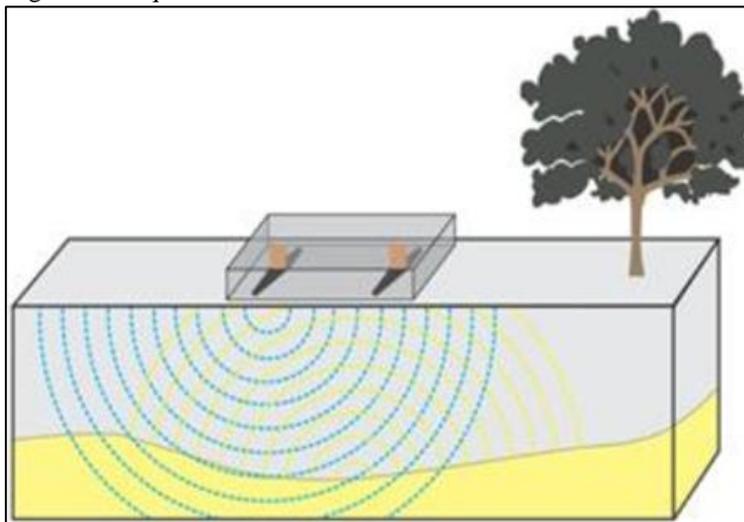
Segundo Davis e Annan (1989), a unidade transmissora produz um pulso de alta voltagem de duração mínima, ao qual é irradiado para a subsuperfície pela antena transmissora. Ao encontrar um refletor em subsuperfície, os sinais refletidos viajam de volta para a antena receptora e depois para a unidade receptora, que amplifica e digitaliza os sinais pela unidade de controle, que por fim é apresentado na unidade de exibição/monitoramento.

4.3.1 Antenas

Um sistema *GPR* é composto por duas antenas, uma antena transmissora (Tx) na qual tem a função de transmitir um pulso eletromagnético em subsuperfície, e uma antena receptora (Rx) que consegue detectar os sinais provindos dos refletores.

As antenas podem ser blindadas e não blindadas, onde as antenas blindadas, na maioria das vezes são de alta frequência, e são utilizadas para aquisição de dados *GPR* com a técnica de perfis de reflexão com o arranjo de afastamento comum (*common offset*). Na Figura 8 pode se observar uma antena blindada, onde são colocadas a distâncias e orientações fixas, dentro de uma “caixa” que protege de interferências externas.

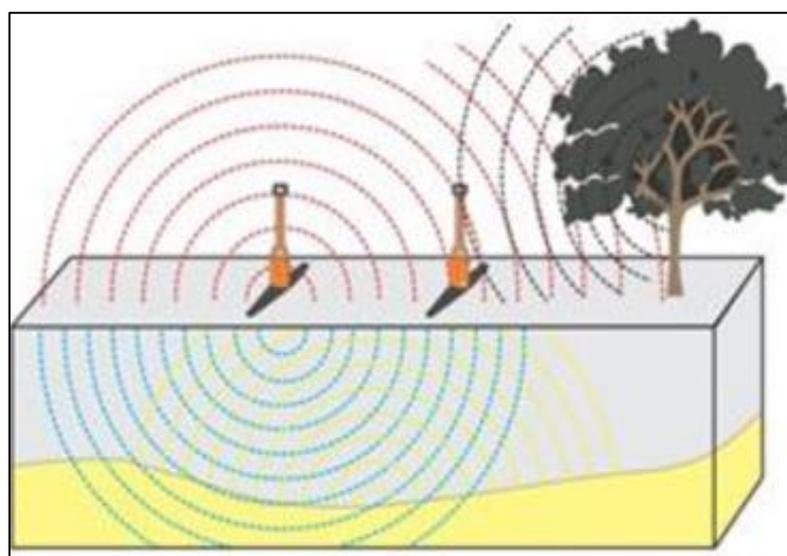
Figura 8 - Esquema de funcionamento de uma antena blindada



Fonte: retirado de Borges (2013).

Já as antenas não blindadas podem ser utilizadas com diversas orientações entre as antenas transmissora e receptora, podendo ainda variar as distâncias entre elas, porém podem sofrer interferências de ruídos eletromagnéticos externos, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Esquema de funcionamento de uma antena não blindada



Fonte: retirado de Borges (2013).

Outra consideração sobre as antenas de *GPR* é que as mesmas podem ser monoestática e biestática. Segundo Reynolds (2011), as antenas são consideradas monoestáticas quando o transmissor e o receptor estão contidos na mesma unidade, em uma “caixa”. Já no caso das antenas biestáticas, os dipolos do transmissor e do receptor são colocados separados e podem ser movidos independentemente um do outro.

4.3.2 Resolução x Profundidade de Penetração

A resolução e a profundidade de penetração do sinal *GPR* são influenciadas pela frequência central da antena utilizada em um levantamento *GPR*. Segundo Reynolds (2011), a resolução dos dados de *GPR* é uma medida da capacidade de se reconhecer e diferenciar dois sinais adjacentes, podendo indicar a posição e os atributos geométricos de um alvo (como tamanho, forma e espessura), à qual pode ser dividida em duas componentes, a resolução vertical e a resolução horizontal (JOL, 2009).

No caso da resolução vertical a mesma implica na capacidade de diferenciar dois sinais distintos no tempo (em profundidade), enquanto a resolução horizontal expressa a capacidade de identificar a continuidade lateral de um ou mais sinais, podendo diferenciá-los ao longo de um resultado de *GPR* (radargrama).

A resolução dos dados *GPR* é diretamente proporcional a frequência central da antena utilizada, obedecendo a seguinte relação: quanto maior a frequência, maior será a resolução do dado, porém menor será a profundidade de penetração. Matematicamente essa relação é descrita pela Equação 24, e em termos práticos a resolução vertical corresponde a 1/4 do comprimento de onda (λ), e a resolução horizontal 1/2 do comprimento de onda (λ).

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (24)$$

em que:

λ → Comprimento de onda (m);

v → Velocidade de propagação da onda eletromagnética (m/ns);

f → Frequência central da antena (MHz);

c → Constante de velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s);

ϵ_r → Permissividade dielétrica relativa do material.

Na Tabela 3 são apresentadas relações de alguns valores de frequências centrais de antenas *GPR* com as suas respectivas resoluções verticais e profundidades de penetração.

Tabela 3 – Relação entre a frequência central das antenas, resolução vertical teórica e profundidade máxima de penetração

Frequência Central (MHz)	Resolução Vertical Teórica (m)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	-	1
400	-	2
200	0,125 - 0,25	4
100	0,25 - 0,5	25
50	0,5 - 1	30
25	1 - 2	40
10	-	50

Fonte: adaptado de Porsani (1999); Annan (2001).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Planejamento de Campo

Primeiramente antes de se realizar um levantamento geofísico com o método *GPR* em áreas urbanas, deve ser realizado um planejamento de campo. Alguns pontos importantes são: verificar o melhor horário para coletar os dados, lembrando que em horário comercial (turno dia) o fluxo de pessoas e carros, é intenso; verificar os materiais que serão utilizados (equipamentos, fitas métricas, cadernetas e canetas para anotação de pontos em superfície); gerar mapas de localização com as linhas traçadas, mapas geológicos/pedológicos e perfis topográficos que servirão de base para os levantamentos dos dados.

Para a geração dos mapas de localização, geologia, pedologia e topografia utilizou-se os softwares *Global Mapper 18*, *Surfer 14*, *Qgis 2.18.14*, onde foram importados *shapefiles* do Brasil com os municípios, das litologias e dos solos da área de estudo retirados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), e uma imagem de satélite georreferenciada, destacando a área de estudo. Com o mapa aberto no compositor de impressão do software *Qgis 2.18.14* foi traçado um perfil da área de estudo (Figura 2).

5.2 Parâmetros para Aquisição de Dados GPR

Para se realizar aquisições de dados com o método *GPR*, alguns parâmetros para a configuração do equipamento são apresentados a seguir, como frequência central da antena (f_c), abertura da janela temporal (T_w), intervalo de amostragem temporal (Δt) e intervalo de amostragem espacial (Δx).

Frequência Central da Antena (f_c): Escolher a frequência central da antena para o levantamento *GPR* vai depender do objetivo do estudo, da profundidade que se deseja alcançar e da resolução dos dados. No caso de alvos rasos (baixa profundidade) uma antena com maior frequência terá dados com maior resolução.

Abertura da Janela Temporal (T_w): A abertura da janela temporal trata-se do intervalo de tempo em que a janela temporal deve ficar aberta para que o sinal seja transmitido, refletido e captado pela antena receptora, na qual está relacionada com a frequência de *Nyquist*, como mostra a Equação 25.

$$T_w = \frac{N_a}{f_c} \times 1000 \text{ (ns)} \quad (25)$$

em que:

N_a → Número de amostras;

f_c → Frequência central da antena (MHz).

Intervalo de Amostragem Temporal (Δt): Está relacionado com o intervalo entre pontos de amostragem do sinal gravado. De modo a não ocorrer falsa amostragem do sinal, deve ser obedecido o critério de amostragem de *Nyquist*, expresso na Equação 26.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad (26)$$

em que Δt é o intervalo de amostragem temporal e f é a frequência de *Nyquist*, a qual será a frequência mais alta que será gravada.

Intervalo de Amostragem Espacial (Δx): Está relacionado com o intervalo espacial, ou seja, o espaçamento entre os traços do radargrama. Segundo Jol (2009), para satisfazer os critérios de amostragem de *Nyquist*, o intervalo de amostragem de *Nyquist* é expresso pela Equação 27

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f} \quad (27)$$

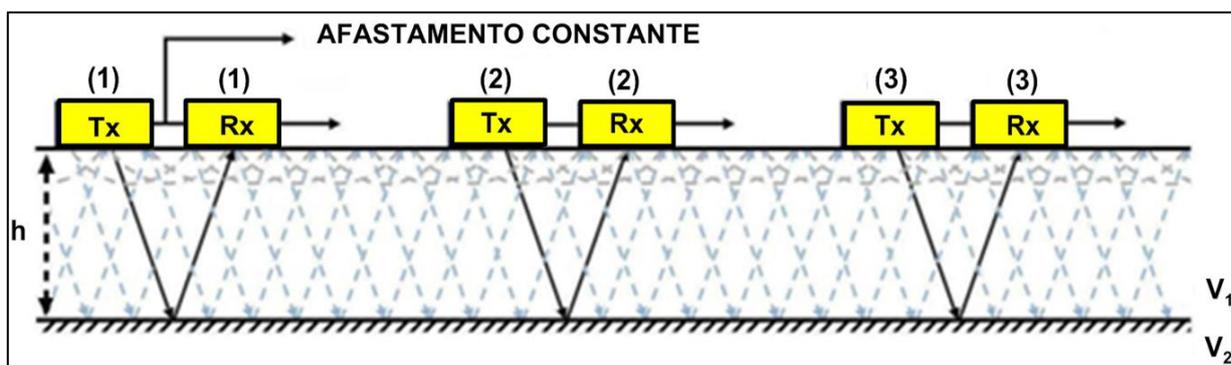
onde f é a frequência de *Nyquist*.

5.3 Técnicas de Aquisição de Dados GPR

Os sistemas de *GPR*, podem ser utilizados com três técnicas básicas para a aquisição de dados, aos quais são o perfil de reflexão, sondagem de velocidade (*CMP* e *WARR*) e transiluminação. No presente trabalho será somente abordada a técnica de aquisição, perfil de reflexão.

Perfil de Reflexão: A técnica de aquisição mais utilizada em levantamentos de *GPR* é o perfil de reflexão com a utilização do arranjo afastamento comum entre fonte e receptor (*common offset*), onde as antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx) são implantadas com uma geometria fixa, ou seja, separação e orientação iguais, onde o resultado obtido será um perfil em que no eixo horizontal são apresentadas as posições das antenas (distâncias) e no eixo vertical o tempo duplo dos refletores (tempo de ida e volta do sinal *GPR*), Figura 10. No presente trabalho será utilizada essa técnica para a aquisição dos dados devido o sistema *GPR*, juntamente com as antenas de 80 MHz e 200 MHz, disponibilizados pela Unipampa, ser com o espaçamento fixo entre as antenas transmissora e receptora.

Figura 10 – Representação da técnica de aquisição de perfil de reflexão com o arranjo common offset



Fonte: modificado de Reynolds (2011).

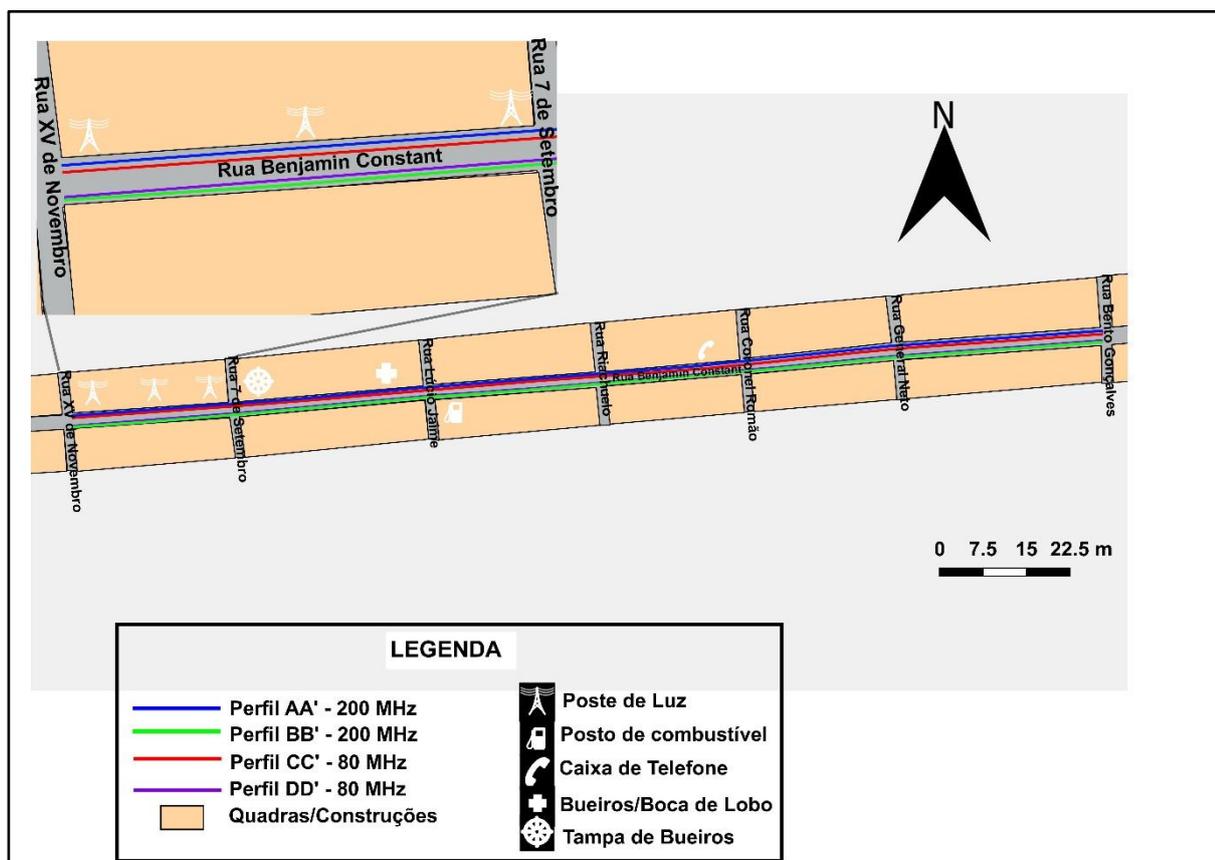
5.4 Aquisição dos Dados de GPR

Para a aquisição dos dados de *GPR* foram utilizadas antenas monoestáticas blindadas com frequências centrais de 80 MHz e 200 MHz (Figuras 12 e 13), desenvolvidas pela empresa italiana *Ingegneria Dei Sistemi (IDS)* e disponibilizadas pela Universidade Federal do Pampa (Unipampa). Para realizar as aquisições utilizou-se o arranjo afastamento comum de fonte e receptor (*common offset*) com a orientação de antenas paralelas entre si.

Primeiramente antes de se realizar a coleta de dados foi instalado o sistema *GPR* e configurado com parâmetros de aquisição do *software*, onde utilizou 1024 para número de amostragem e 650 para janela temporal, podendo assim ser realizada uma calibração na roda métrica (odômetro) para verificar se o equipamento estava registrando a mesma distância estabelecida pela fita métrica. Foram realizados quatro perfis de *GPR*, sendo dois perfis AA'

(W-E) e BB'(E-W) com as antenas de 200 MHz e dois perfis CC' (W-E) e DD'(E-W) com as antenas de 80 MHz, todos com aproximadamente 540 metros de distância, adquiridos em lados opostos da rua Benjamin Constant, como mostrado na Figura 11. No momento da coleta de dados de *GPR*, também foram anotadas posições de pontos em superfície (bueiros, tampas de bueiros, caixas de telefone e postes de luz), correlacionando-os com as distâncias no radargrama de aquisição.

Figura 11 - Croqui da rua Benjamin Constant apresentando os perfis realizados e os pontos em superfície



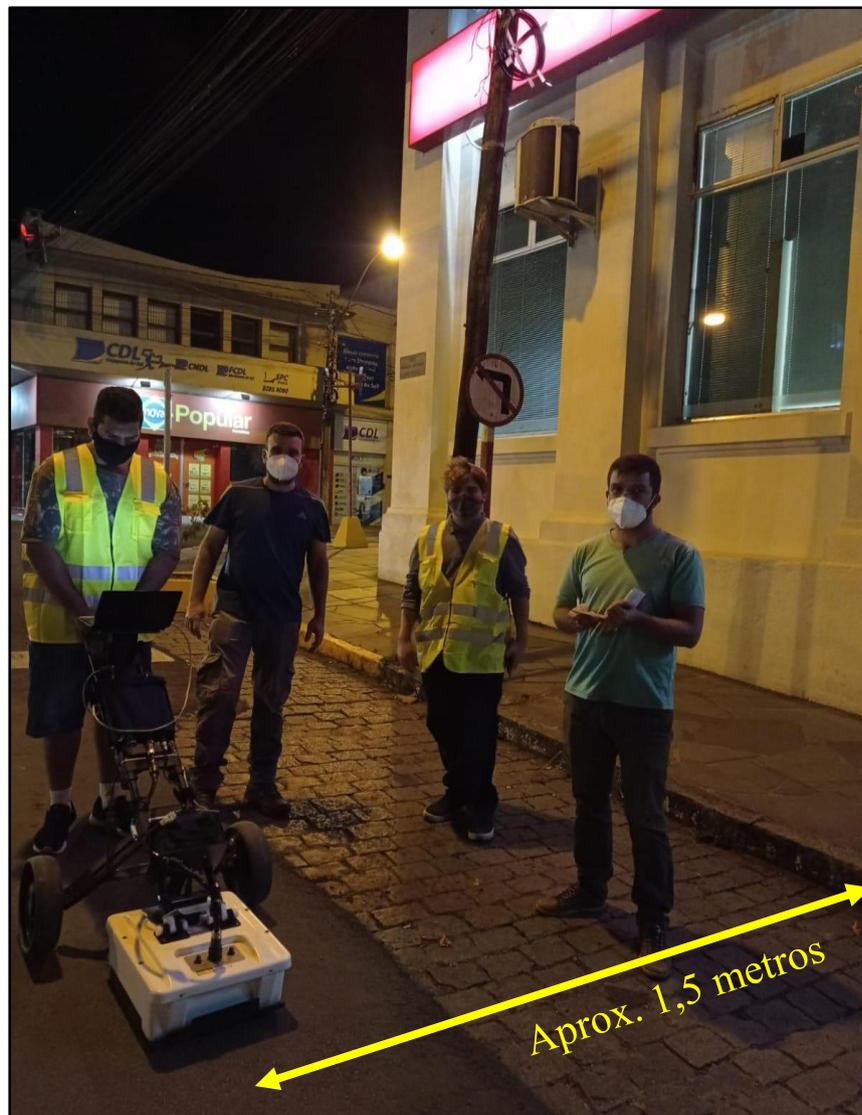
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 12 - Aquisições dos dados de GPR com antena de 80 MHz



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 13 - Aquisições dos dados de GPR com antena de 200 MHz

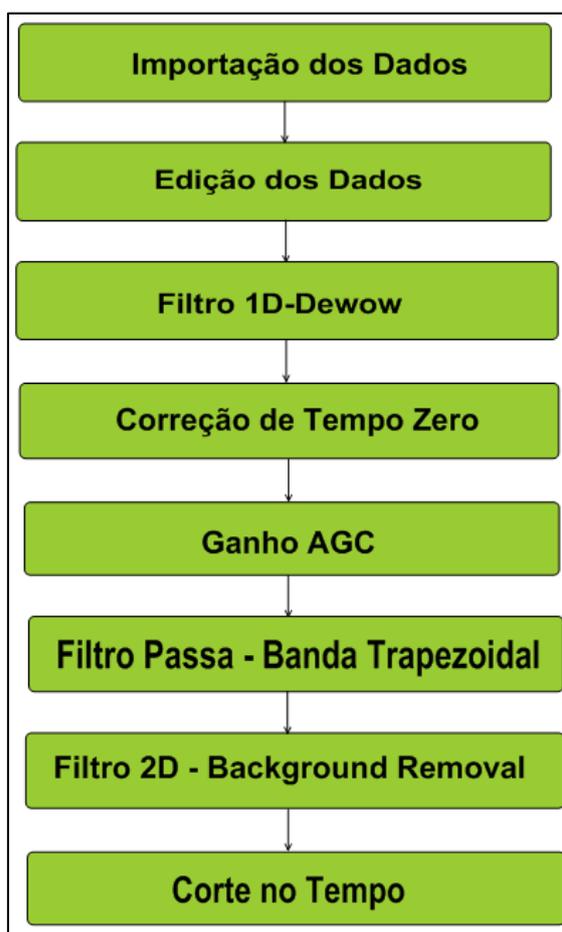


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GPR

O principal objetivo do processamento de dados de *GPR* é melhorar a visualização do radargrama para que possa ser facilmente interpretado (SANDMEIER, 2014). Para isso são realizadas etapas de processamento, como: edição dos dados, filtragem temporal, correção do tempo zero, aplicação de ganhos, corte no tempo e filtragem espacial, conforme mostra o fluxograma na Figura 14. Para realizar o processamento dos dados foi utilizado o *software ReflexW*, desenvolvido pela empresa alemã *Sandmeier Geophysical Research*.

Figura 14 - Fluxograma de processamento dos dados de GPR



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.1 Importação e Edição dos Dados

A seguir serão apresentadas algumas etapas para importação e edição dos dados de *GPR* no *software ReflexW*.

Abre-se um diretório de trabalho com 5 pastas geradas (*ASCII*, *ROHDATA*, *LINEDATA*, *PROCADATA*, *MODEL*);

Coloca-se os arquivos das linhas de 80 MHz e 200 MHz, com formato *.dt, na pasta *ASCII*;

Escolhe-se o módulo “*2D-data-analysis*” para processar dados de perfil 2D;

É importada a linha que será processada em “*File > Import > Data Import > Convert to Reflex*”, então será escolhido na pasta *ASCII* o arquivo *PERFIL_AA.dt*;

Em “*Data Import*” poderá ser configurada algumas informações referentes a aquisição dos dados, nome do perfil, coordenadas, tipo de dado, formato da antena (*IDS*), unidade de tempo (ns), entre outros como mostrado na Figura 15A.

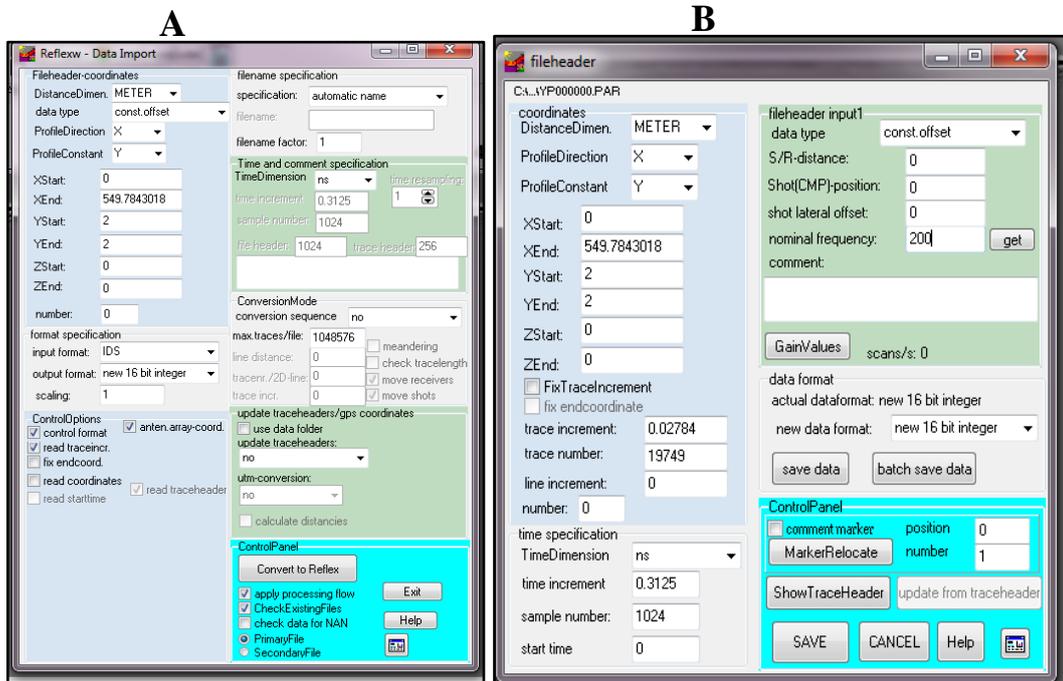
Ao clicar em “*Convert to Reflex*” o dado será convertido do formato *.dt para o formato *.dat e salvo na pasta “*ROHDATA*”.

Após a importação do dado, será realizada a edição do arquivo de cabeçalho em “*File > Edit File Header*” onde serão editados, unidade de distância, coordenadas de início e fim do perfil, direção do perfil, frequência central da antena (200 MHz), distância entre as antenas transmissora e receptora, tipo de dado (afastamento constante), números de traços, incremento do traço (intervalo de amostragem espacial ΔX), número de amostras, unidade de tempo (ns), incremento do tempo (intervalo de amostragem temporal ΔT), como mostra a Figura 15B.

As linhas de *GPR* foram coletadas em sentidos opostos (W-E/E-W), para que as mesmas se mantivessem no mesmo sentido para fazer posteriores correlações, foi realizada uma edição em “*Processing > Trace interpolation/resorting > XFlipProfile*”.

Como as linhas de *GPR* foram coletadas em torno de 500 metros na rua Benjamin Constant, demarcando grande distância da aquisição de dados, foram então cortadas as linhas em espaçamentos menores, de 90 em 90 metros, o que equivaleria a mais ou menos uma quadra da rua Benjamin Constant, facilitando o processamento e também uma posterior interpretação e correlação com a posição de pontos em superfície. Para realizar essa edição foi utilizada a função “*EditTraces/TraceRange > Extract*” e então escolheu-se intervalos de traços correspondentes às distâncias a serem cortadas.

Figura 15 – A) Janela de importação dos dados no ReflexW e B) Janela de edição de cabeçalho no ReflexW

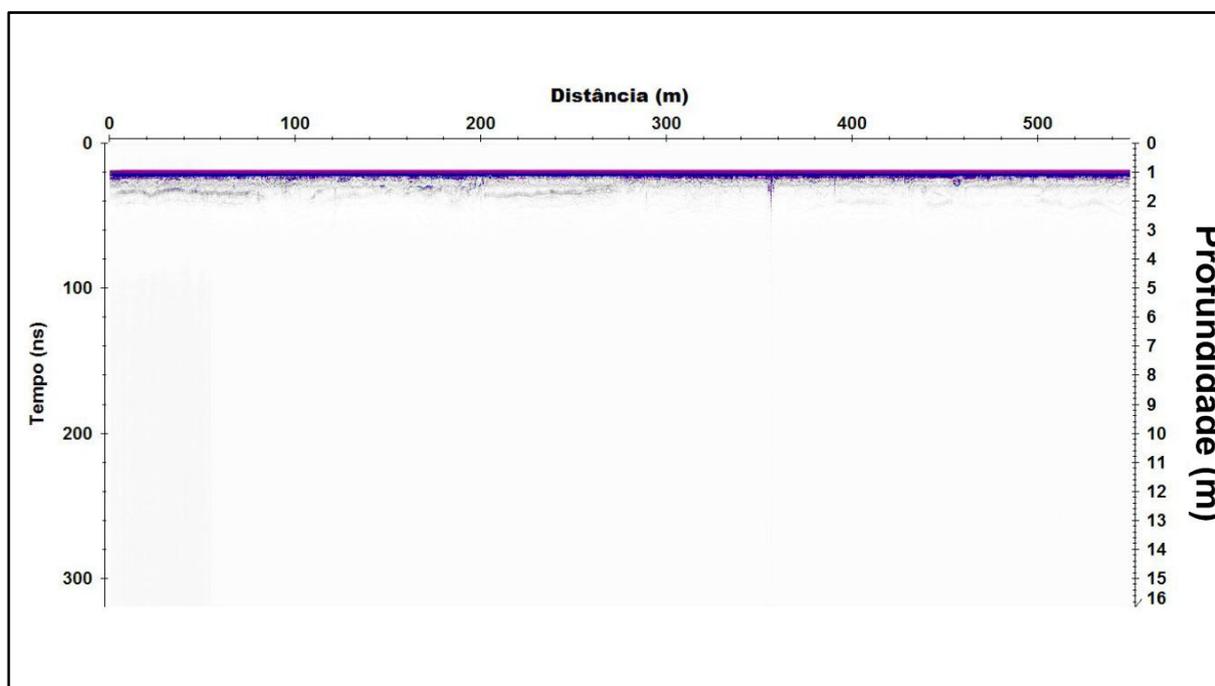


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

6.2 Dado Bruto

Após as importações e edições de cabeçalho é apresentado o dado bruto referente ao perfil, sem nenhum processamento realizado como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Radargrama de exemplo com dado bruto da antena de 200 MHz

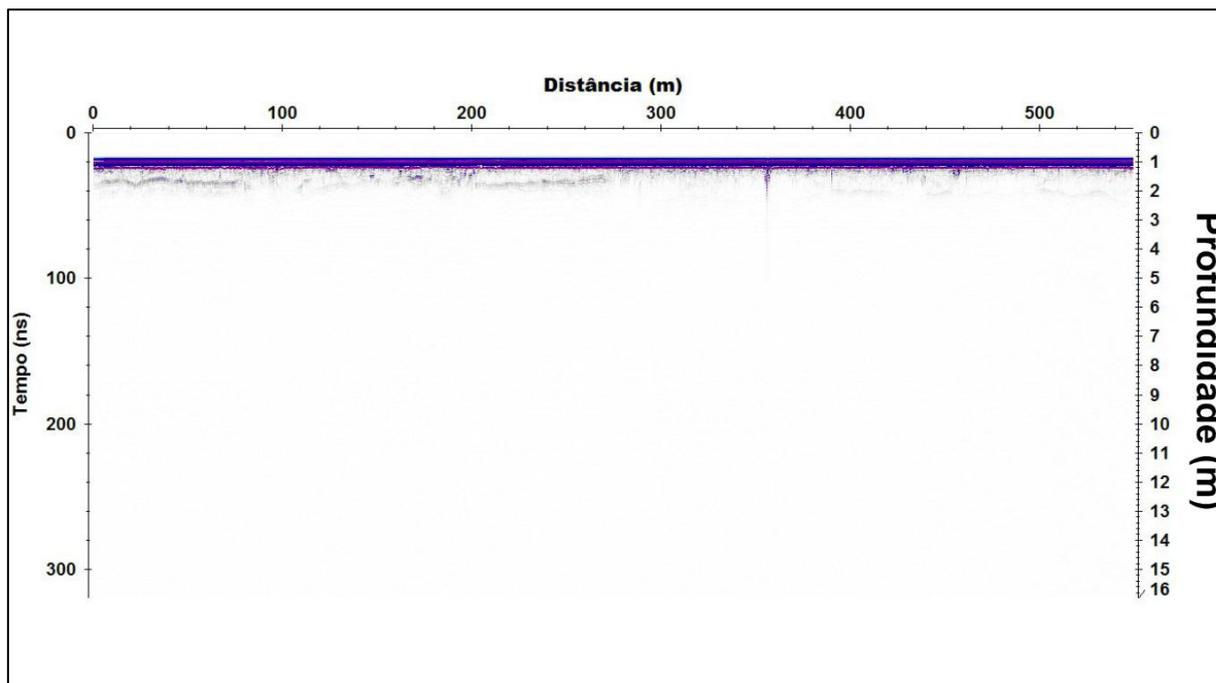


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.3 Remover Ganho de Cabeçalho

O *remove header gain* é um tipo de filtro utilizado para remover o ganho atribuído no momento da aquisição dos dados.

Figura 17 – Radargrama de exemplo com remove header gain aplicado



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

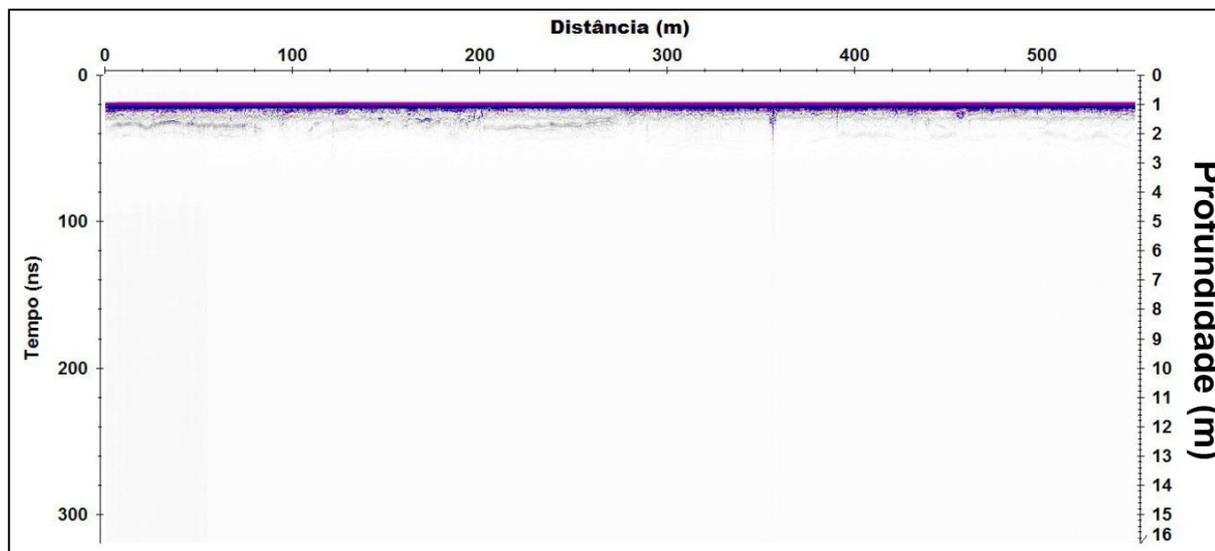
6.4 Filtro 1D – Dewow

O filtro 1D *dewow* é um dos primeiros a ser utilizado para o processamento de dados *GPR*, onde o mesmo atua como um filtro de altas frequências para a retirada da saturação do sinal, causada por bandas de baixas frequências mantendo fidelidade aos valores de banda da frequência central da antena utilizada. O sinal saturado está associado a fenômenos de indução ou aos limites eletrônicos da instrumentação na manipulação dos dados durante a aquisição. (ARANHA, 2011).

Para acionar o filtro *dewow* utiliza-se como parâmetro de entrada uma janela de tempo em ns, a qual em teoria equivale ao $1/T$ ou $2/T$ da frequência central da antena, onde T está relacionado com o período da onda eletromagnética (SANDMEIER, 2014).

Para os dados coletados com a frequência central de 200 MHz foram testados parâmetros de entrada para a janela de tempo, onde o parâmetro que mostrou uma melhora no radargrama foi o de 5 ns (Figura 18). Já para os dados coletados com a antena de 80 MHz utilizou-se como parâmetro de entrada para a janela de tempo um valor de 12,5 ns.

Figura 18 – Radargrama de exemplo com filtro Dewow aplicado

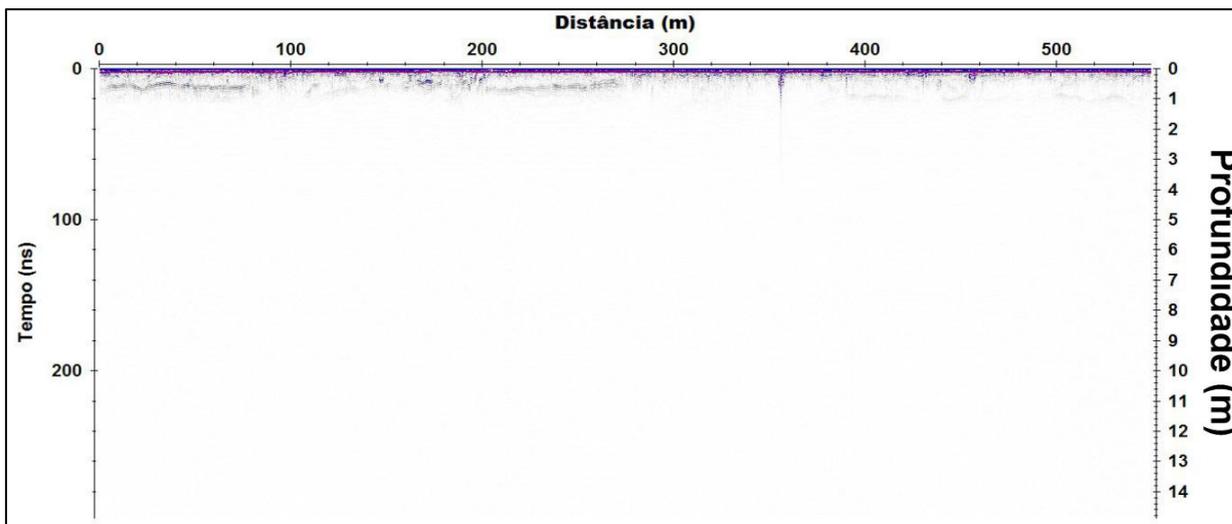


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.5 Correção de Tempo Zero

A correção do tempo zero é realizada para compensar o atraso de tempo da primeira chegada de onda apresentada no radargrama por uma linha contínua de maior amplitude. Para verificar a primeira quebra negativa, relacionada ao tempo inicial de chegada da onda direta e/ou onda aérea, é utilizada a função “*wiggle window*” no *ReflexW*, onde pode-se verificar em um traço de exemplo em qual instante de tempo que houve a quebra (mudança do sinal positivo para o negativo), a qual foi de -22,820 ns para os dados com antena de 200 MHz (Figura 19) e -37,918 ns para os dados com antena de 80 MHz.

Figura 19 – Radargrama de exemplo com correção de tempo zero aplicada



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.6 Ganho AGC

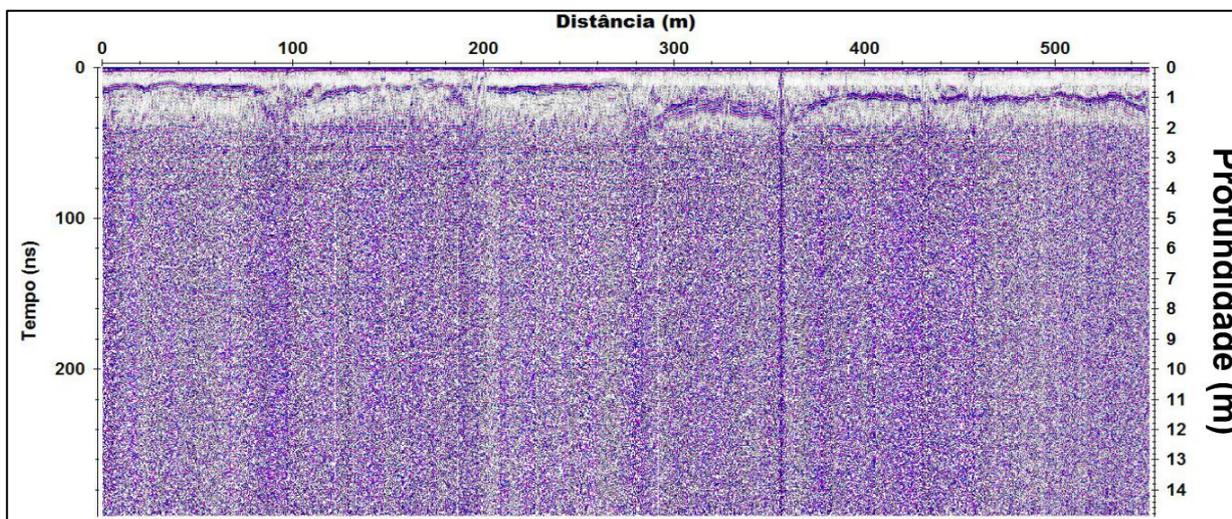
Quando o sinal do *GPR* se propaga em subsuperfície ele sofre uma atenuação devido as suas propriedades dielétricas, com isso as reflexões provenientes de grandes profundidades têm pouquíssima amplitude, isto é, são mais fracas, enquanto as reflexões provenientes dos refletores mais superficiais têm amplitudes mais fortes.

Para a visualização desses refletores mais profundos deve-se aplicar ganho variável com a profundidade para que reflexões com amplitudes mais fracas sejam realçadas e possam ser visualizadas conjuntamente com as reflexões mais fortes.

Uma forma de equalizar essas amplitudes é escolher uma janela de tempo na qual as amplitudes do sinal sejam normalizadas em relação à máxima amplitude - *AGC*. Esse procedimento é executado ao longo de todo o traço (ARANHA, 2011).

Para então visualizar melhor os refletores, foi utilizado ganho do tipo *AGC* (*Automatic Gain Control*) com parâmetros de 20 para “*window range*” e 0.6 para o “*scaling value*”, como mostra na Figura 20 o ganho aplicado.

Figura 20 – Radargrama de exemplo com ganho AGC aplicado

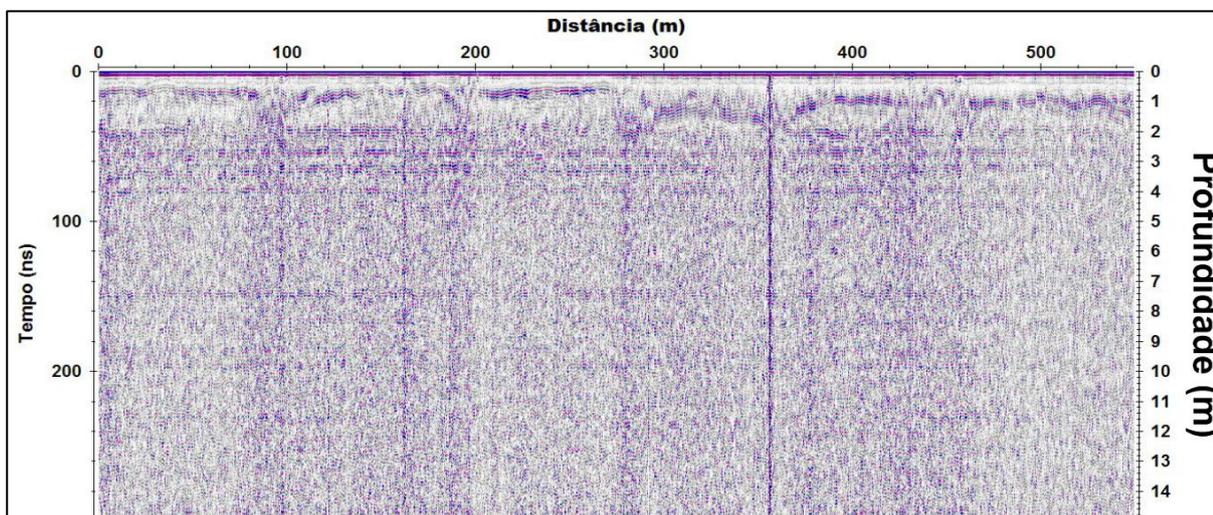


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.7 Filtro Passa-Banda Trapezoidal

O filtro passa-banda trapezoidal atua em cada traço de forma independente, no qual tem a função de aplicar uma filtragem do tipo passa-banda no domínio do tempo, onde a banda do filtro é especificada por quatro valores de frequência, a *lower cutoff*, que é a frequência de corte baixa, a *low plateau*, platô baixo, *up plateau*, platô alto e a *upper cutoff*, que é a frequência de corte alta (SANDMEIER, 2014). Na Figura 21 pode-se verificar o filtro passa-banda trapezoidal sendo aplicado no radargrama de exemplo.

Figura 21 – Radargrama de exemplo com filtro passa-banda trapezoidal aplicado

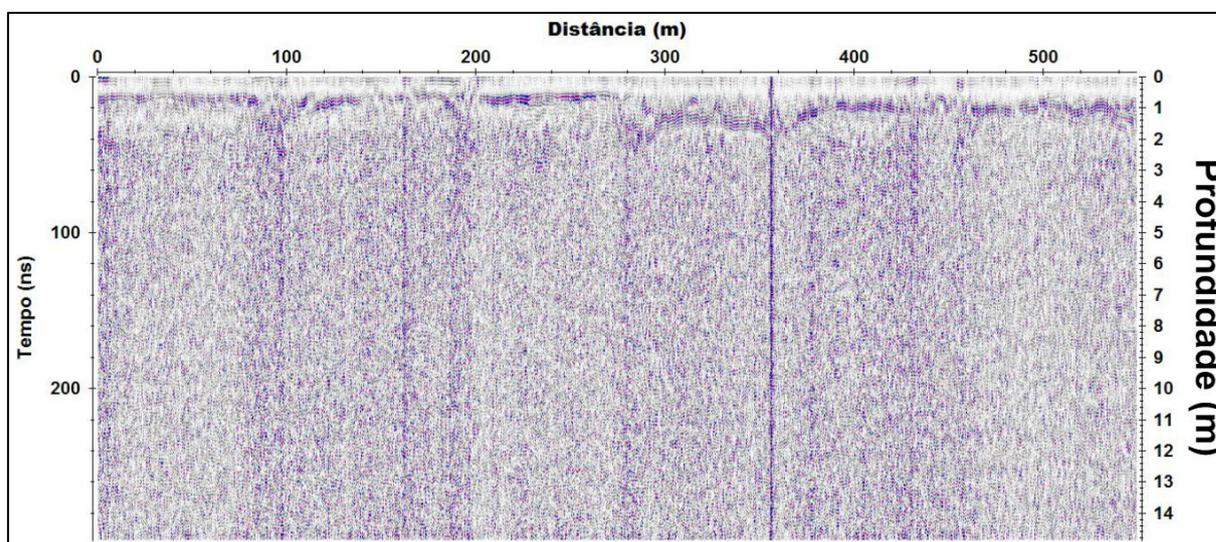


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.8 Filtro 2D – Background Removal

Os filtros espaciais (2D) realçam ou removem tipos de variações espaciais diferentes, atenuando ruídos provocados pelo deslocamento horizontal das antenas (PORSANI, 1999). O filtro 2D *Background Removal* (passa alta) foi utilizado objetivando remover as reverberações da antena e ruídos que se apresentam horizontalmente, e com isso buscando realçar refletores pontuais, horizontais e inclinados. Na Figura 22 pode-se verificar o filtro background removal sendo aplicado no radargrama de exemplo, que se comparar com a Figura 21 pode-se verificar que os ruídos, dispostos horizontalmente em todo o radargrama, foram removidos.

Figura 22 – Radargrama de exemplo com filtro background removal aplicado

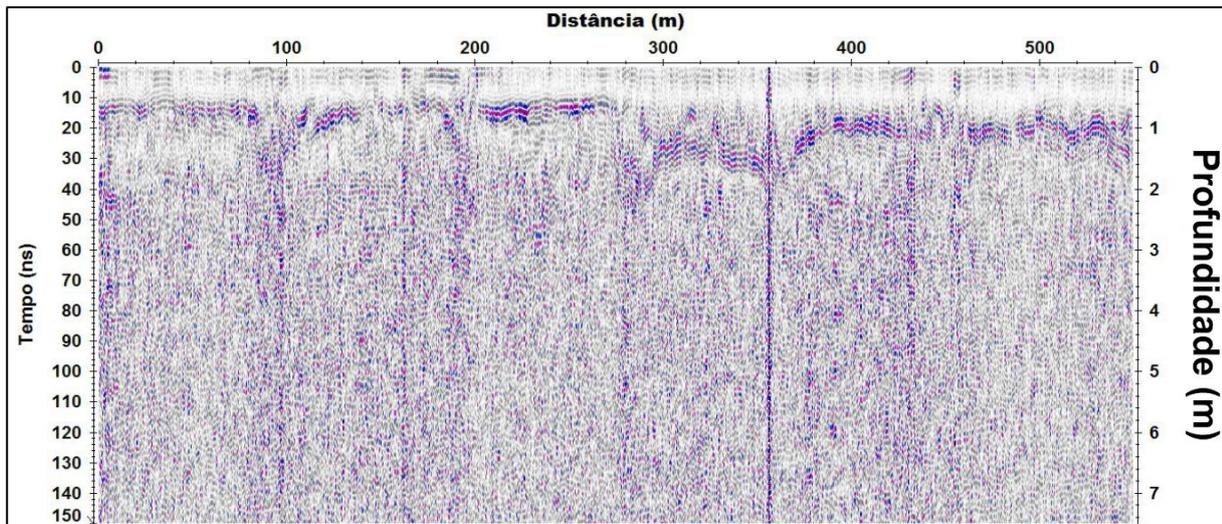


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

6.9 Corte no Tempo

O corte no tempo, chamado de “*time cut*”, é a etapa de processamento que oferece a possibilidade de cortar uma parte da janela temporal que apresenta grandes quantidades de ruídos, podendo assim definir um tempo máximo pré-definido (SANDMEIER, 2014).

Figura 23 – Radargrama de exemplo com time cut aplicado em 150 ns



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

7 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

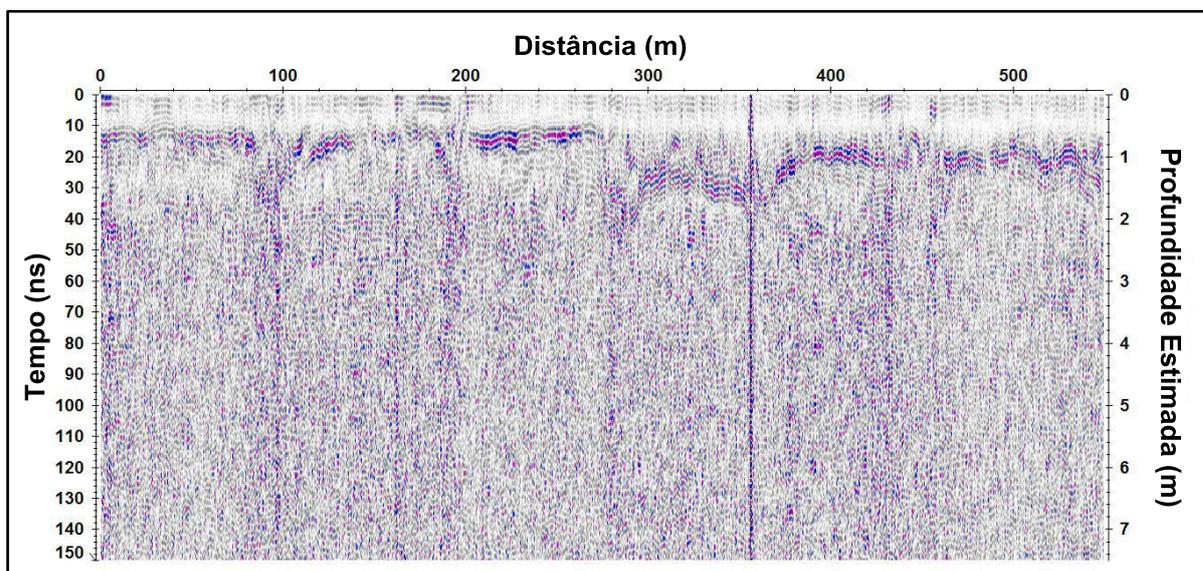
A seguir serão apresentados os resultados obtidos com a aquisição dos dados de *GPR* na rua Benjamin Constant em que são perfis chamados de radargramas. Esses radargramas serão apresentados a cada intervalo de 90 em 90 metros dos perfis AA', BB', CC' e DD'.

7.1 Radargramas do Perfil AA'

Na Figura 24 apresenta-se o radargrama referente ao perfil AA' ao qual se coletou dados com antena de 200 MHz e com aproximadamente 549 metros de distância.

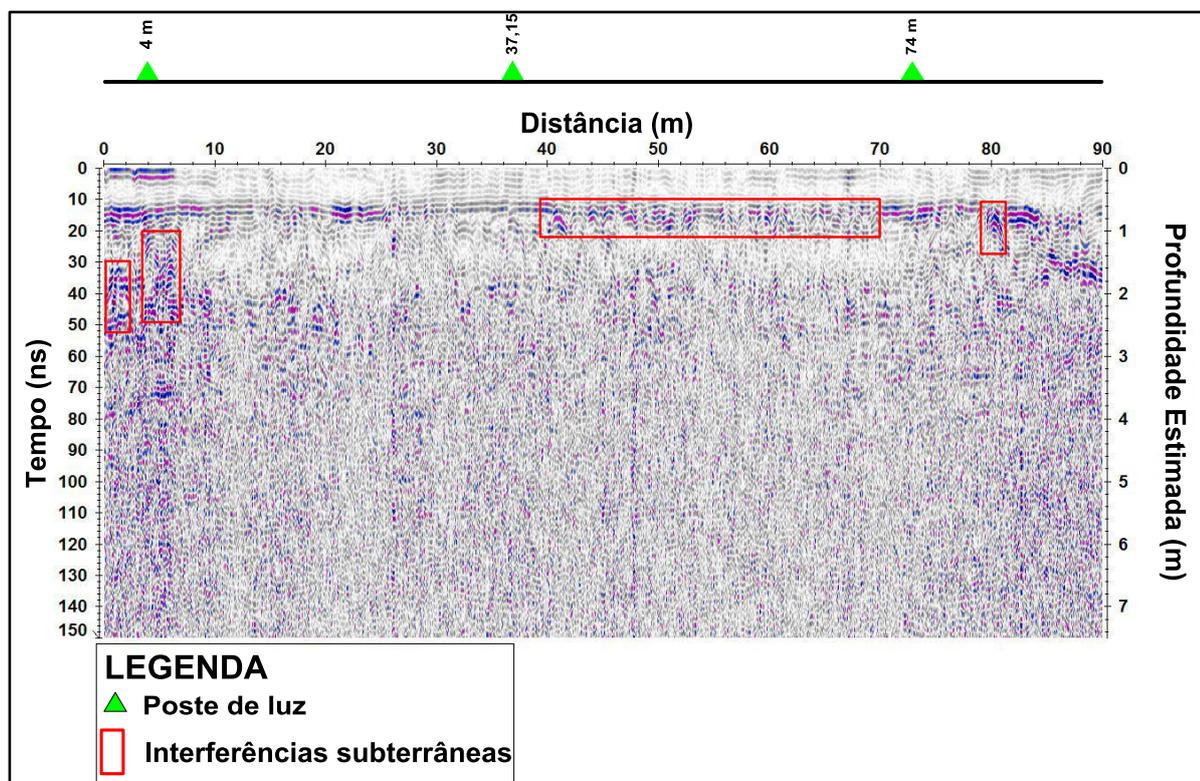
Devido ao perfil AA' ser de grande extensão (549 metros), para melhor processar, visualizar e analisar/interpretar os radargramas, foram realizados cortes em intervalos de 90 em 90 metros de distância, como apresentado da Figura 25 até a Figura 30.

Figura 24 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 549 metros)



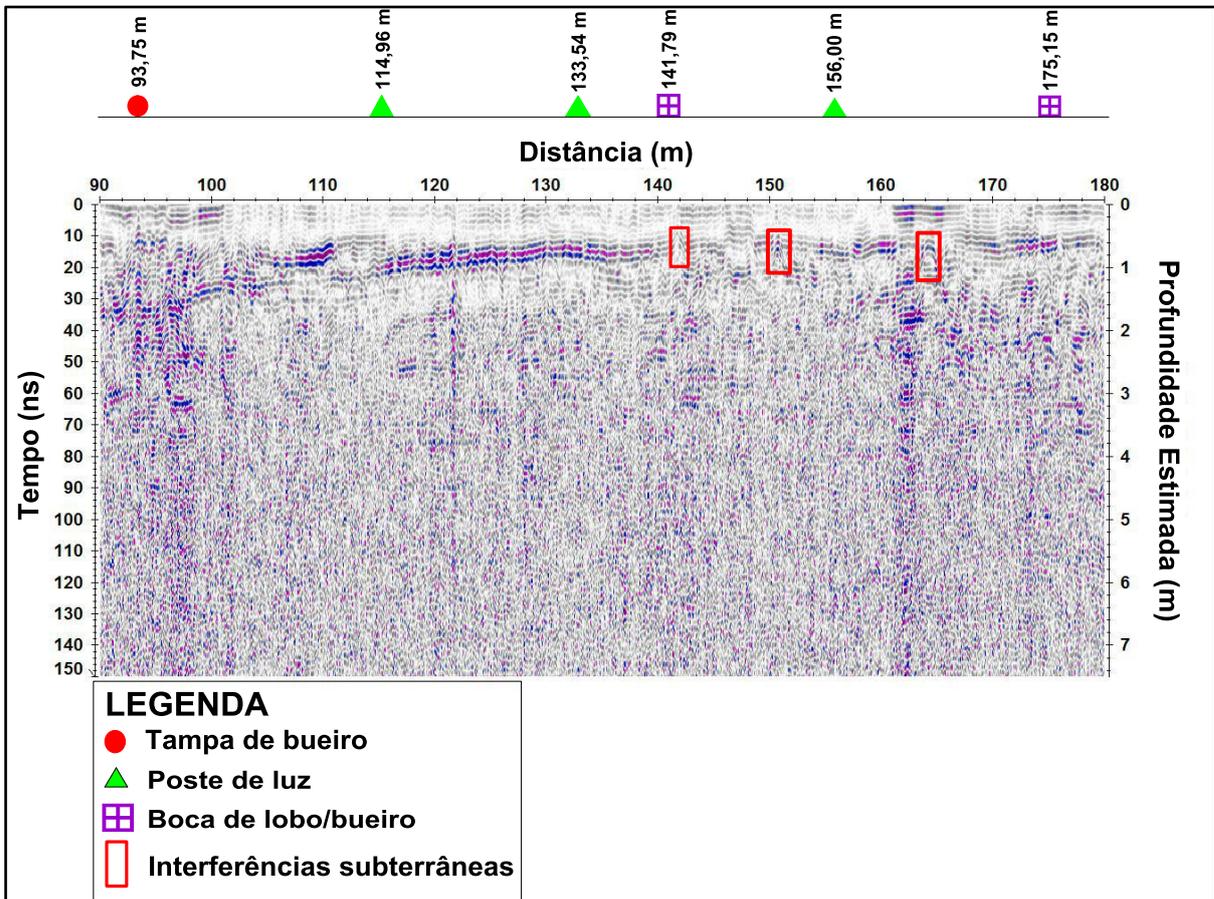
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 25 – Radargrama do Perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)



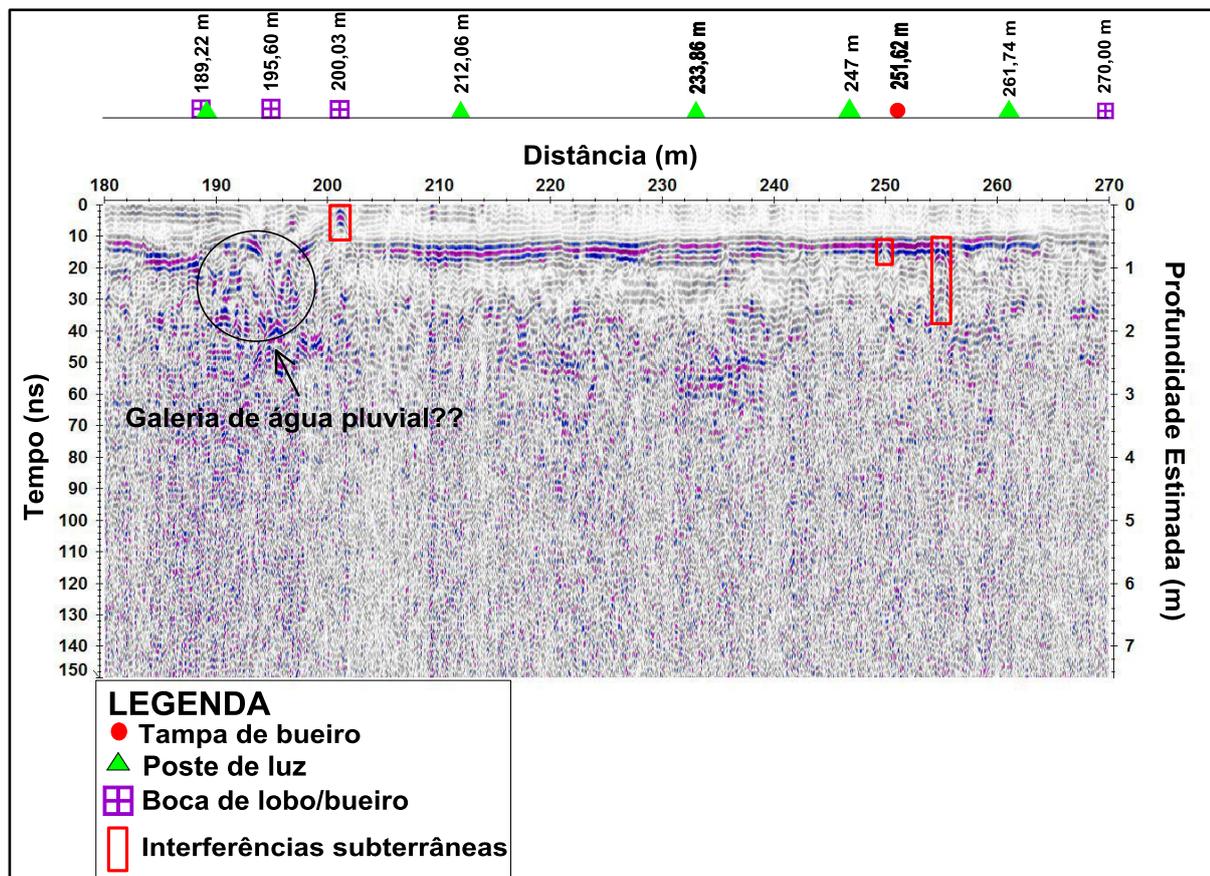
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 26 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)



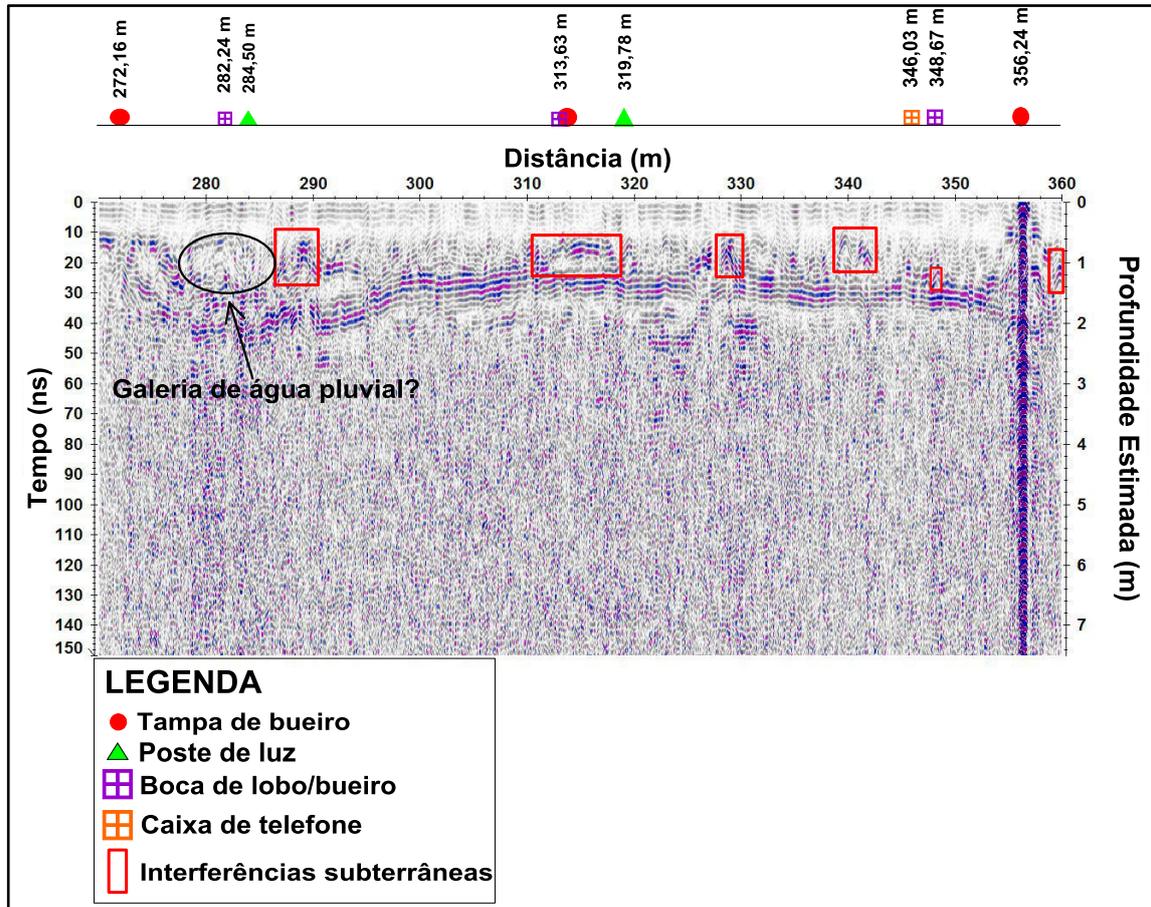
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 27 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)



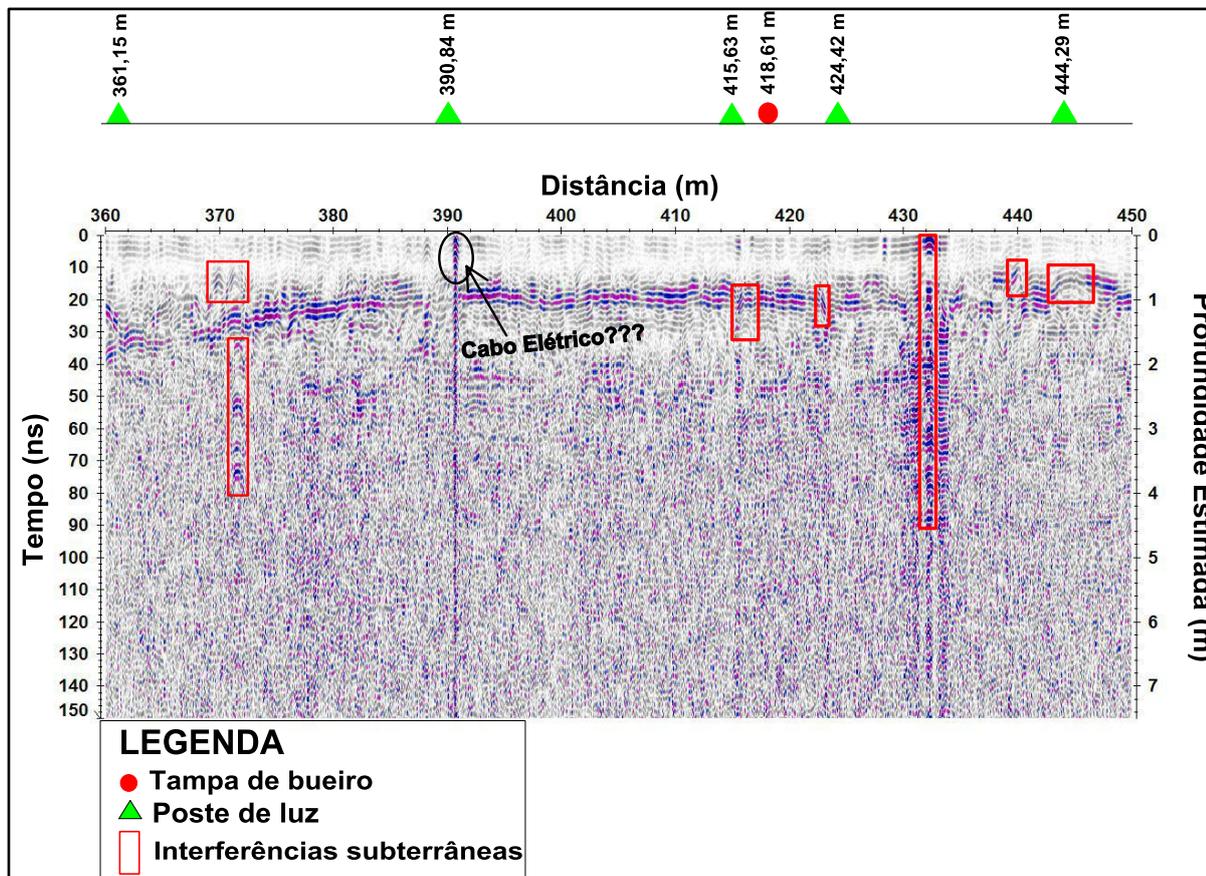
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 28 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)



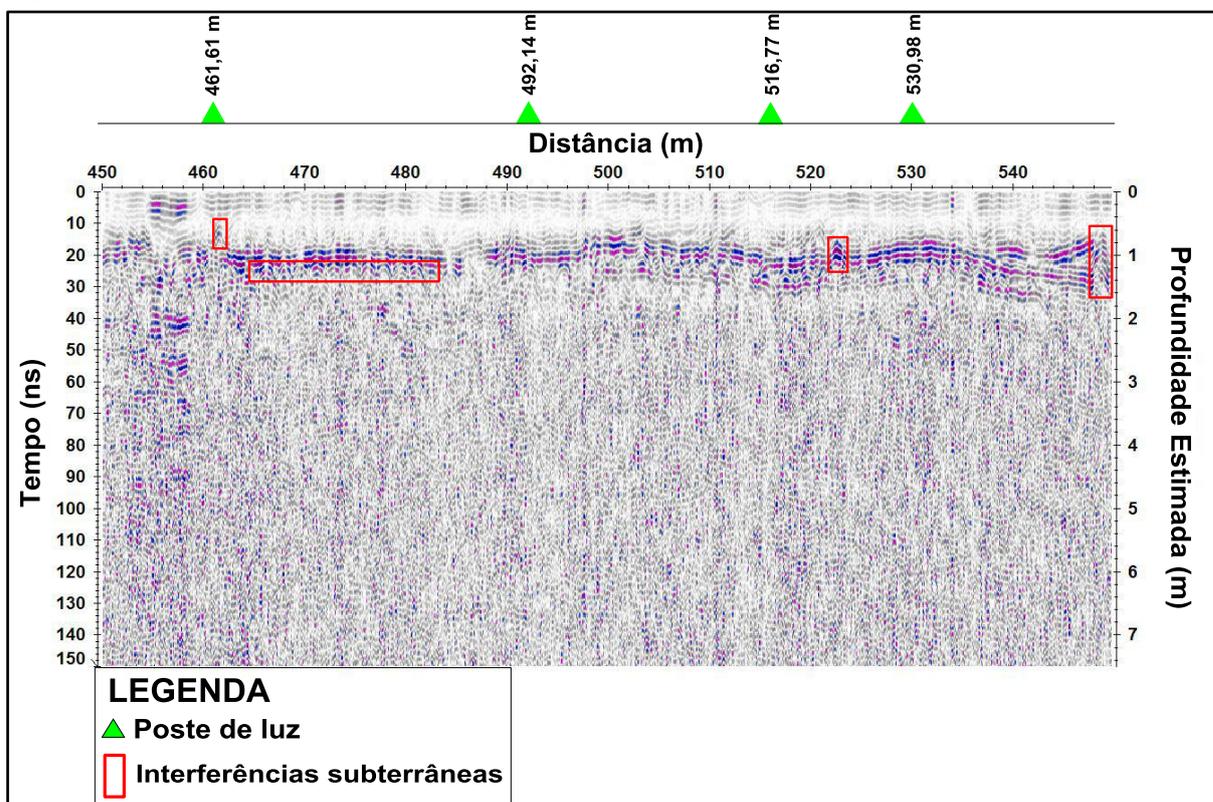
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 29 - Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 30 – Radargrama do perfil AA' com antena de 200 MHz (intervalo de 450 a 549 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

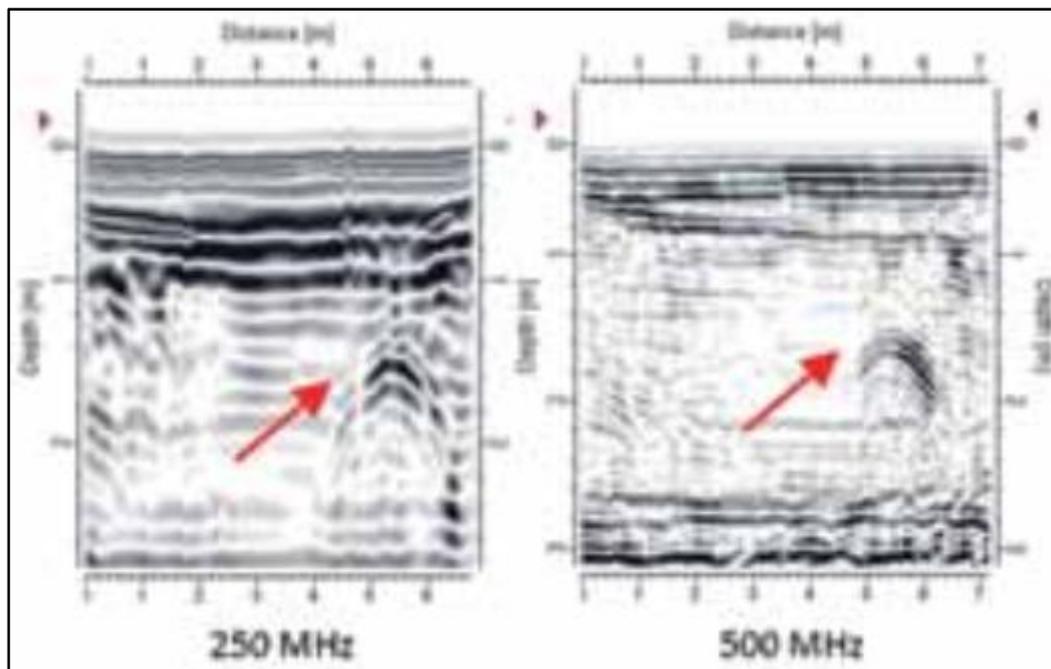
Os resultados do perfil AA' foram analisados e interpretados conjuntamente devido aos radargramas referentes às Figuras 25 até a Figura 30 pertencerem ao mesmo perfil AA' ao qual foi coletado com a antena de 200 MHz.

Nas Figuras de 25 até 30, pôde-se verificar 5 padrões de reflexão, aos quais são:

Padrões de reflexões hiperbólicos (PR1), delimitados por retângulos em vermelho nos radargramas, são relacionados com interferências subterrâneas em determinadas posições e com profundidades estimadas, também interpretados no trabalho de Lago e Borges (2021).

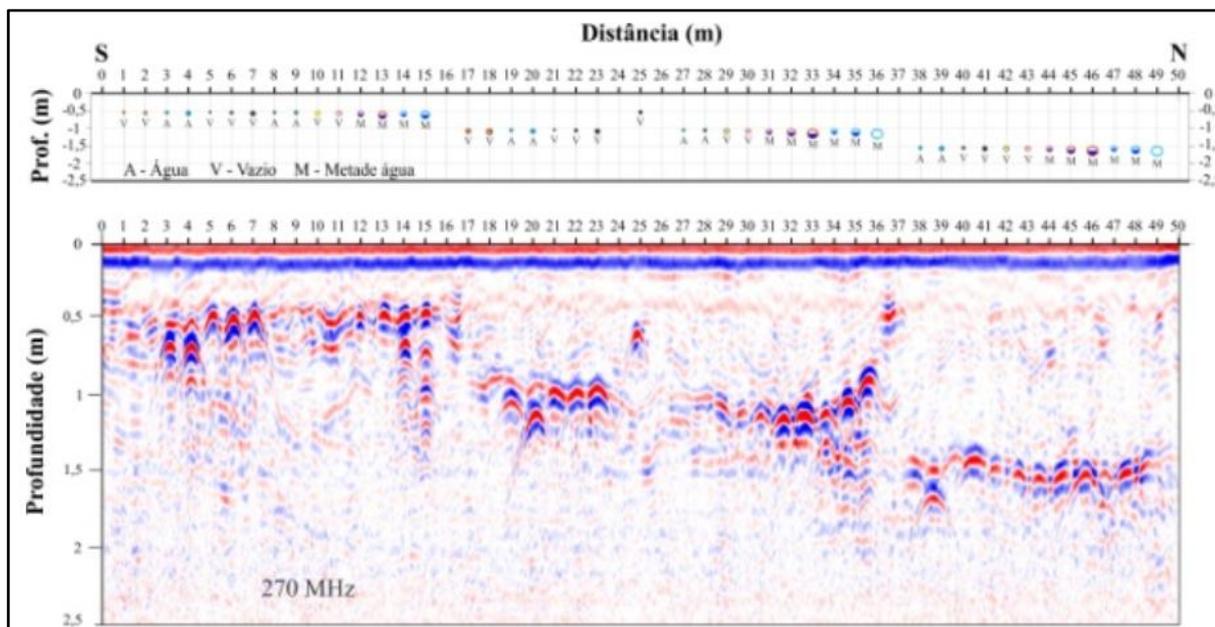
A seguir nas Figuras 31 e 32 pode-se observar resultados de outros estudos com o método *GPR* utilizando antenas de 250 MHz, 270 MHz e 500 MHz (frequências mais altas) para o mapeamento de tubulações vazias e preenchidas com água, verificando os padrões de reflexão hiperbólicos, aos quais servem de referencial para este trabalho.

Figura 31 - Apresentação de radargramas de GPR com antenas de 250 MHz (esquerda) e 500 MHz (direita) mostrando a presença de uma tubulação (padrão hiperbólico) em subsuperfície



Fonte: retirado de GANDOLFO (2012).

Figura 32 - Apresentação de um radargrama de GPR com antena de 270 MHz sobre diferentes tubulações (preenchidas com água e vazias) instaladas no SCGR-II.



Fonte: retirado de PORSANI (2014).

Padrões de reflexão contínuo horizontal (PR2) com um forte sinal da amplitude, apresentado ao decorrer dos radargramas, está relacionado com uma interface entre a camada de pavimento asfáltico/paralelepípedo e a camada de solo do aterro compactado, também interpretados em Lago e Borges (2021), Gandolfo (2012).

Pode-se verificar que esse padrão de refletor contínuo se apresenta entre profundidades estimadas que variam de 0,5 a 2 metros, devido a variação morfológica/topográfica da superfície do terreno.

O padrão de reflexão hiperbólico (PR1) reverberando continuamente abaixo do PR2 possivelmente sejam devido às tubulações preenchidas com água na mesma direção do perfil de aquisição, observado no radargrama da Figura 25.

Padrões de reflexão com atenuação do sinal (PR3) apresentando sinais de baixa amplitude em algumas partes dos radargramas possivelmente estão correlacionados com presença de um solo mais argiloso e/ou presença de umidade em subsuperfície.

Padrão de refletores de difração (PR4) com um sinal de alta amplitude juntamente com parte de baixa amplitude que aparecem em algumas partes nos radargramas bem próximas das tampas de bueiros e das bocas de lobo que podem ser descontinuidades em subsuperfícies possivelmente relacionadas com galerias/bueiros contendo águas pluviais apresentadas nas Figuras 27 e 28, como interpretado no trabalho de Taniyama (2019).

Outro padrão de reflexão que pode ser observado nos radargramas é o de reverberação do sinal eletromagnético (PR5), chamado de “*ringing*”, em subsuperfície ao qual foi ocasionado devido ao passar com o equipamento *GPR* por cima e próximas de tampas de bueiros compostas de ferro.

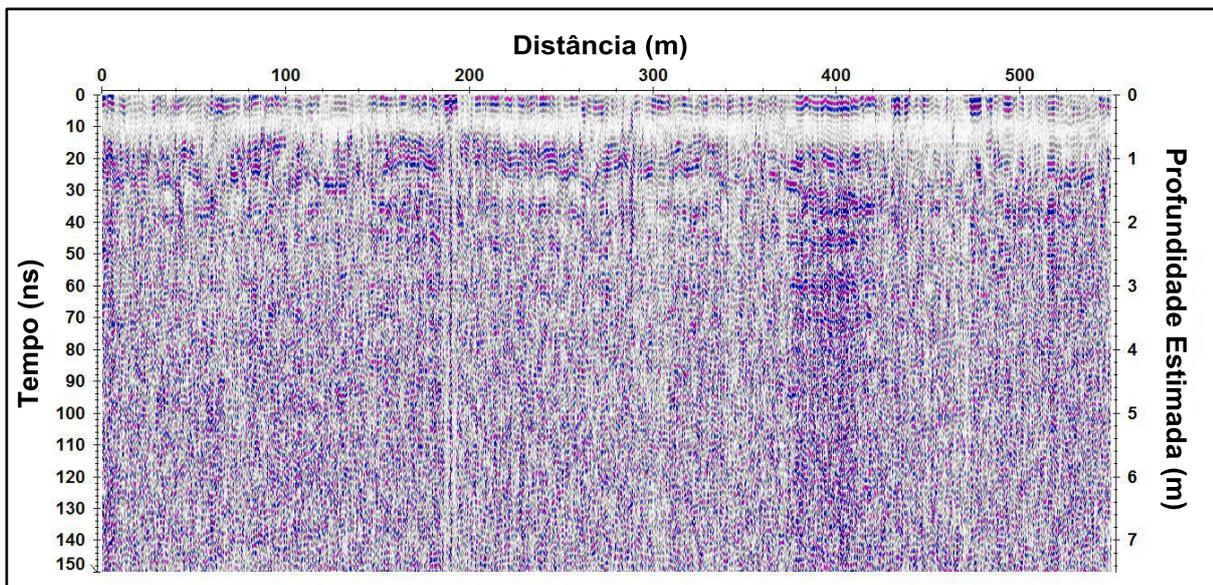
Na Figura 29 pode-se observar que abaixo do poste de luz tem uma interferência subterrânea que possivelmente está relacionada com algum cabo elétrico, ou algo metálico mais superficial.

7.2 Radargramas do Perfil BB'

Na Figura 33 apresenta-se o radargrama referente ao perfil BB' em que são dados coletados com antena de 200 MHz e com aproximadamente 549 metros de distância.

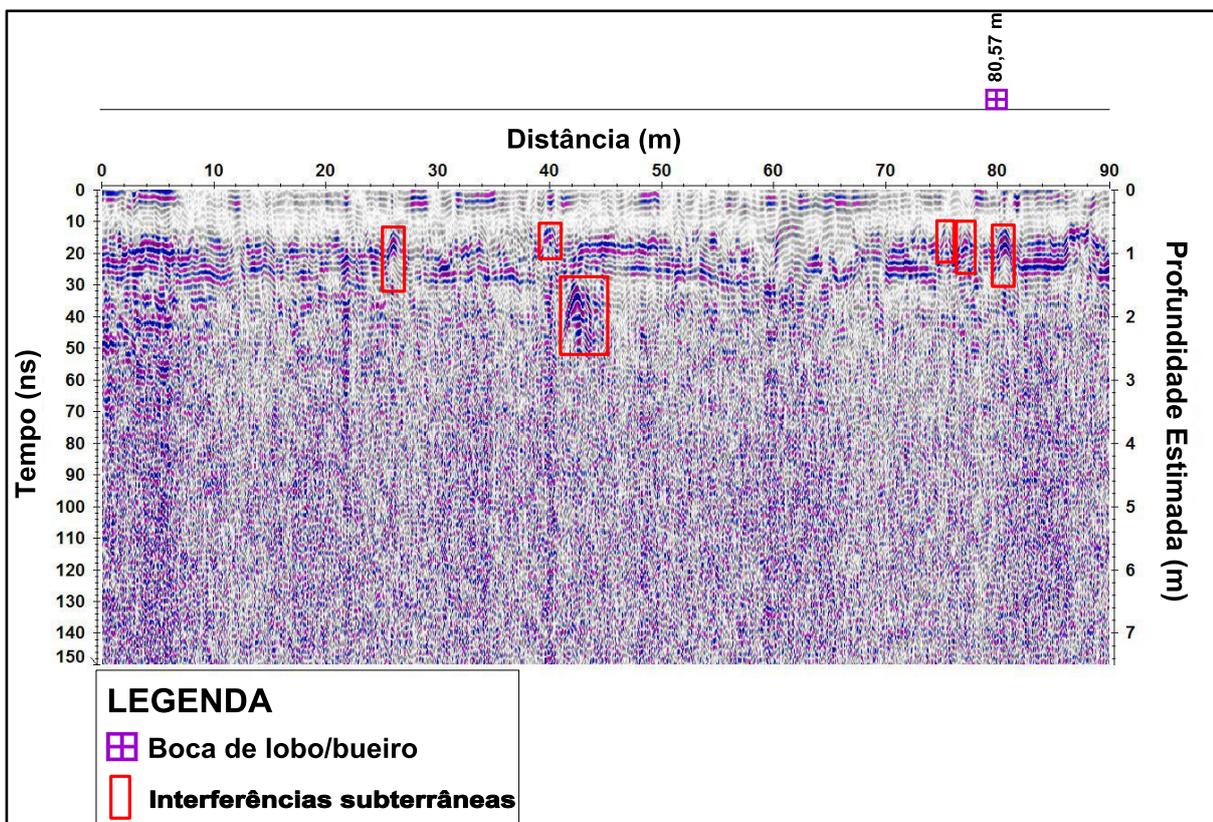
Devido ao perfil BB' ser de grande extensão (549 metros), então para melhor processar, visualizar e analisar/interpretar os dados, foram realizados cortes em intervalos de 90 em 90 metros de distância, que serão apresentados da Figura 34 até a Figura 39.

Figura 33 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 549 metros)



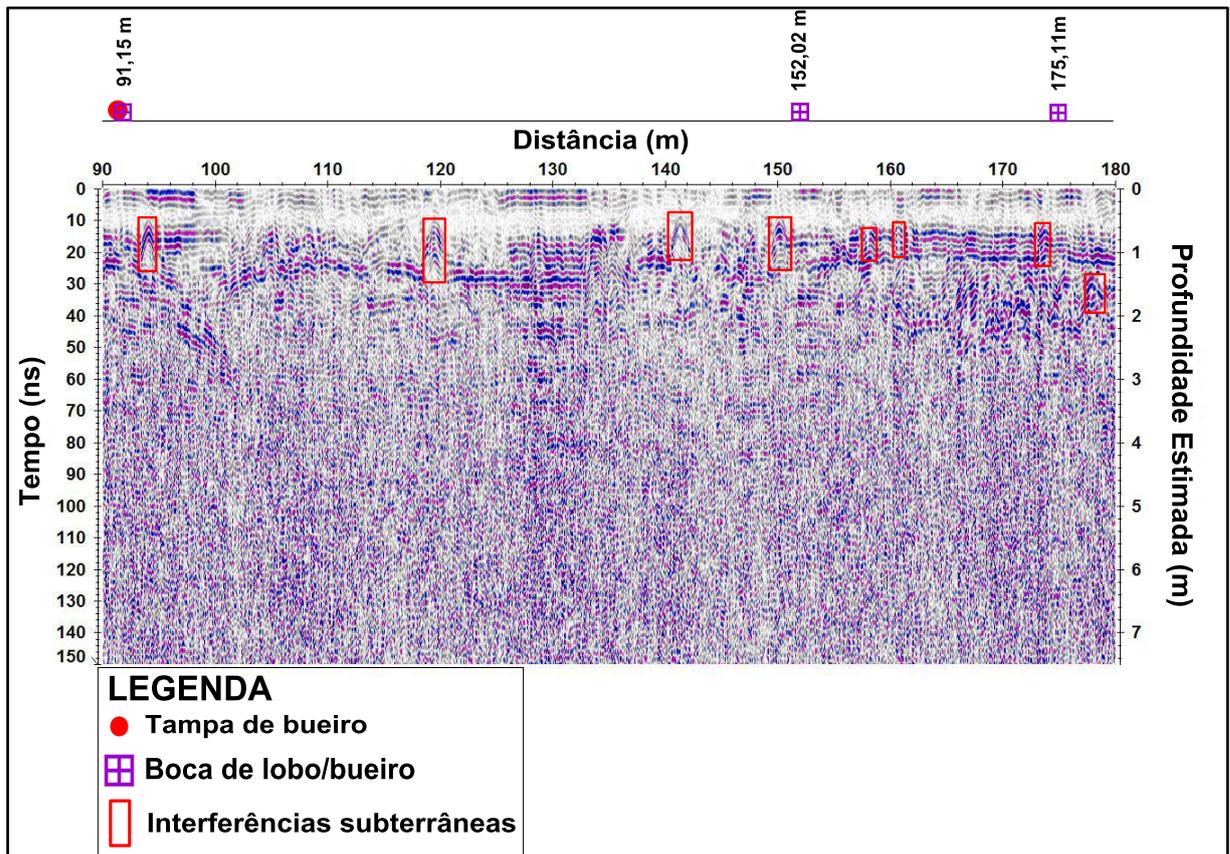
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 34 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)



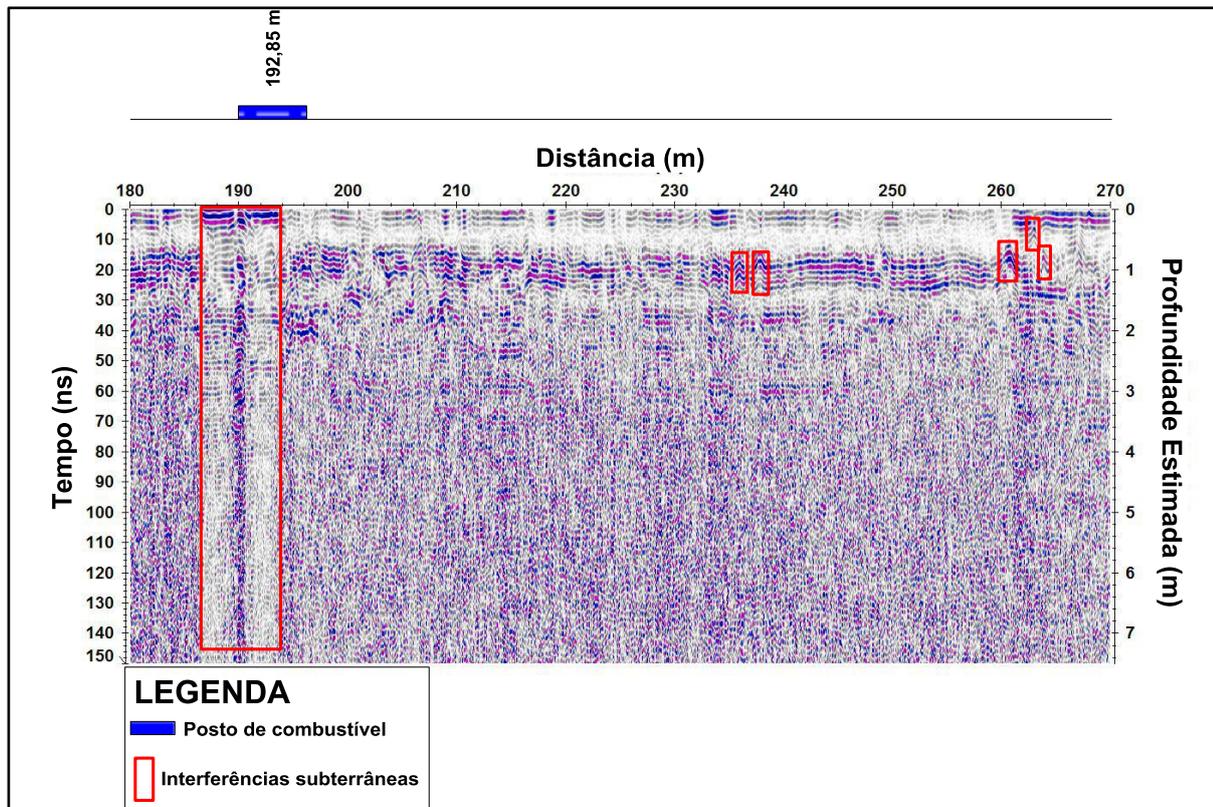
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 35 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)



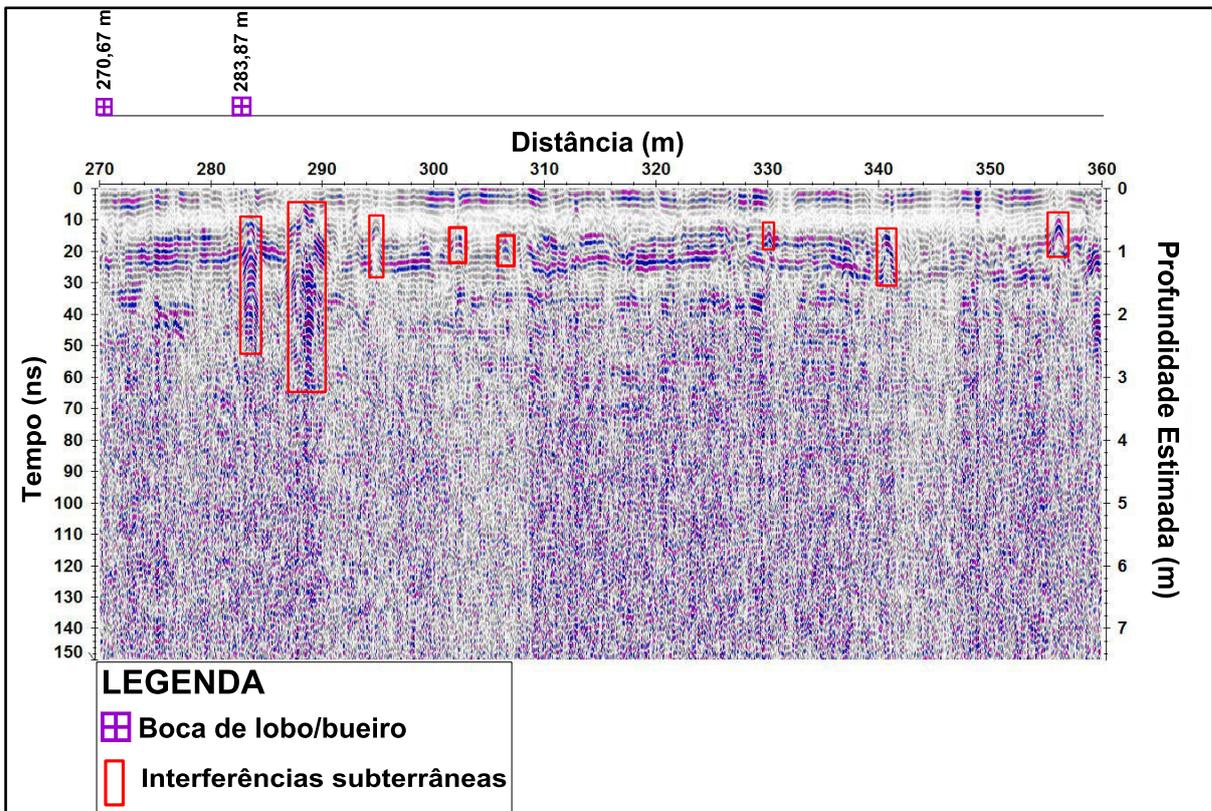
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 36 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)



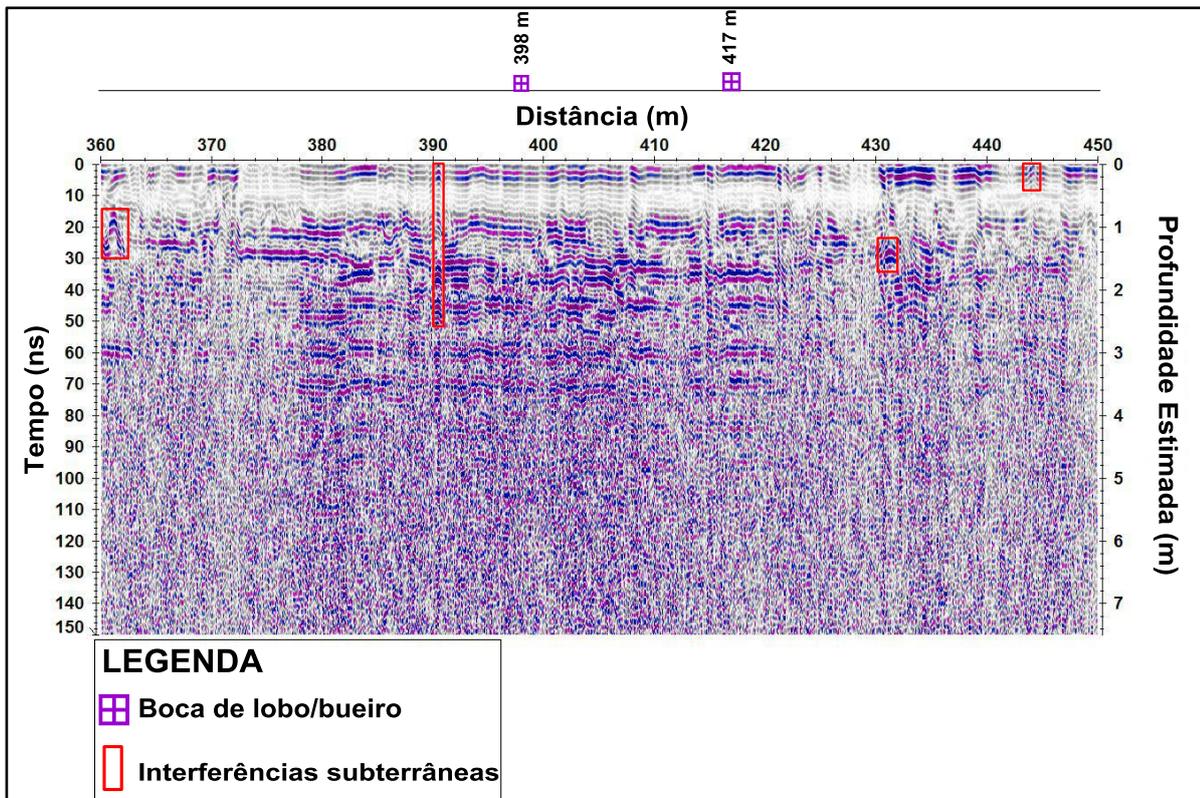
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 37 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)



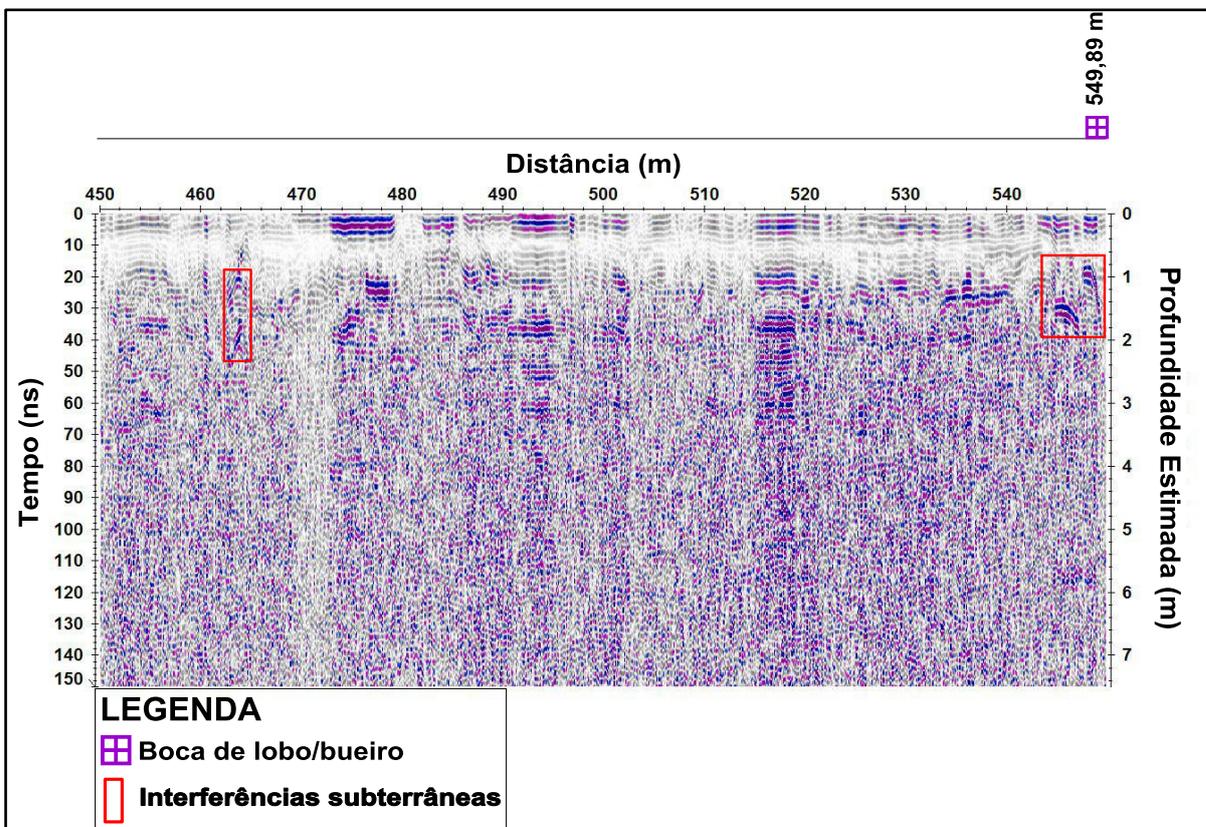
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 38 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 39 – Radargrama do perfil BB' com antena de 200 MHz (intervalo de 450 a 549 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Todos os radargramas referentes ao perfil BB' foram analisados e interpretados com os mesmos padrões de reflexão apresentados no perfil AA' devido a ser o mesmo contexto de estudo (mesma rua).

Os resultados do perfil BB' foram analisados e interpretados conjuntamente devido aos radargramas referentes às Figuras 34 até a Figura 39 pertencerem ao mesmo perfil BB' ao qual também foi coletado com a antena de 200 MHz.

Nas Figuras de 34 até 39, pôde-se também verificar 5 padrões de reflexão, aos quais são:

Padrões de reflexões hiperbólicos (PR1), delimitados por retângulos em vermelho nos radargramas, são relacionados com interferências subterrâneas em determinadas posições e com profundidades estimadas, também interpretados em Lago e Borges (2021); Gandolfo (2012); Porsani (2014).

Padrões de reflexão contínuo horizontal (PR2) com um forte sinal da amplitude, apresentando ao decorrer dos radargramas relacionado com uma interface entre a camada de pavimento asfáltico/paralelepípedo e a camada de solo de aterro com compactação, também interpretados em Lago e Borges (2021) e Gandolfo (2012).

Pode-se verificar que esse padrão de refletor contínuo se apresenta entre profundidades estimadas que variam de 0,5 a 2 metros, devido a variação morfológica/topográfica da superfície do terreno.

Padrões de reflexão com atenuação do sinal (PR3) apresentando sinais de baixa amplitude em algumas partes dos radargramas possivelmente estão correlacionados com presença de um solo mais argiloso e/ou presença de umidade em subsuperfície.

Pode-se observar que na Figura 36 está sendo apresentado o radargrama do intervalo entre 180 e 270 metros, no qual pode-se observar o posto de combustível. Na posição de 190 metros, em subsuperfície, é possível observar que o sinal da onda eletromagnética atenuou (baixa amplitude), isso pode ser indicador de vazamentos (ou de água ou de combustível), devendo-se estudar com mais detalhe essa área.

Padrão de refletores de difração (PR4) com um sinal de alta amplitude juntamente com parte de baixa amplitude que aparecem em algumas partes nos radargramas bem próximas das tampas de bueiros e das bocas de lobo, podem ser descontinuidades em subsuperfícies com presença de materiais mais condutivos (umidade e/ou solo argiloso) em profundidade, como também apresentado em Taniyama (2019).

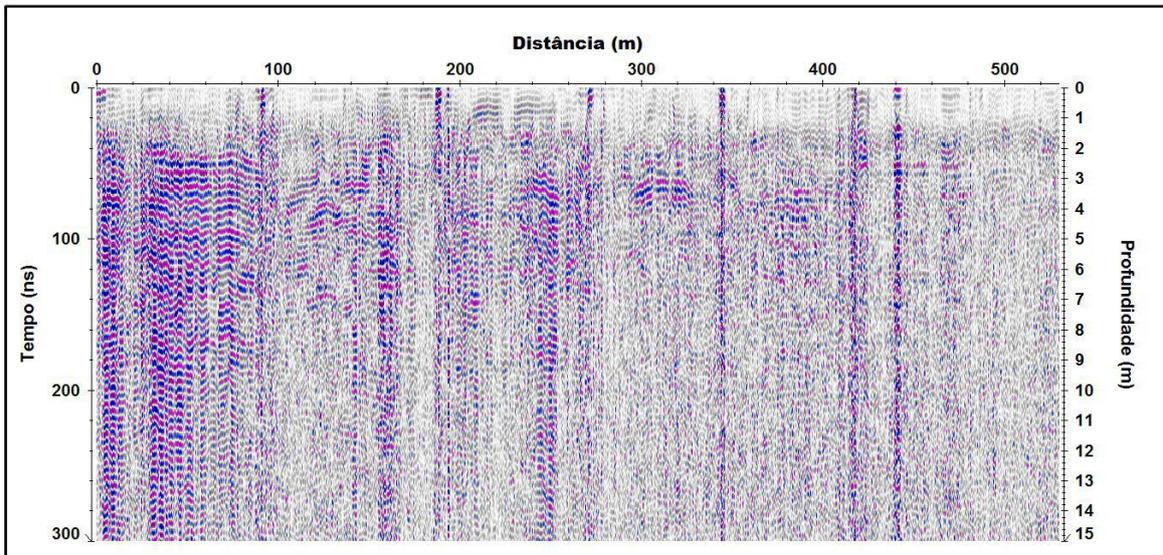
Outro padrão de reflexão que pode ser observado nos radargamas é o de reverberação do sinal eletromagnético (PR5), chamado de “*ringing*” em subsuperfície ao qual foi ocasionado devido ao passar com o equipamento *GPR* por cima e próximo das tampas de bueiros compostas de ferro.

7.3 Radargramas do Perfil CC'

Na Figura 40 apresenta-se o radargrama referente ao perfil CC' com dados coletados com antena de 80 MHz e com aproximadamente 530 metros de distância.

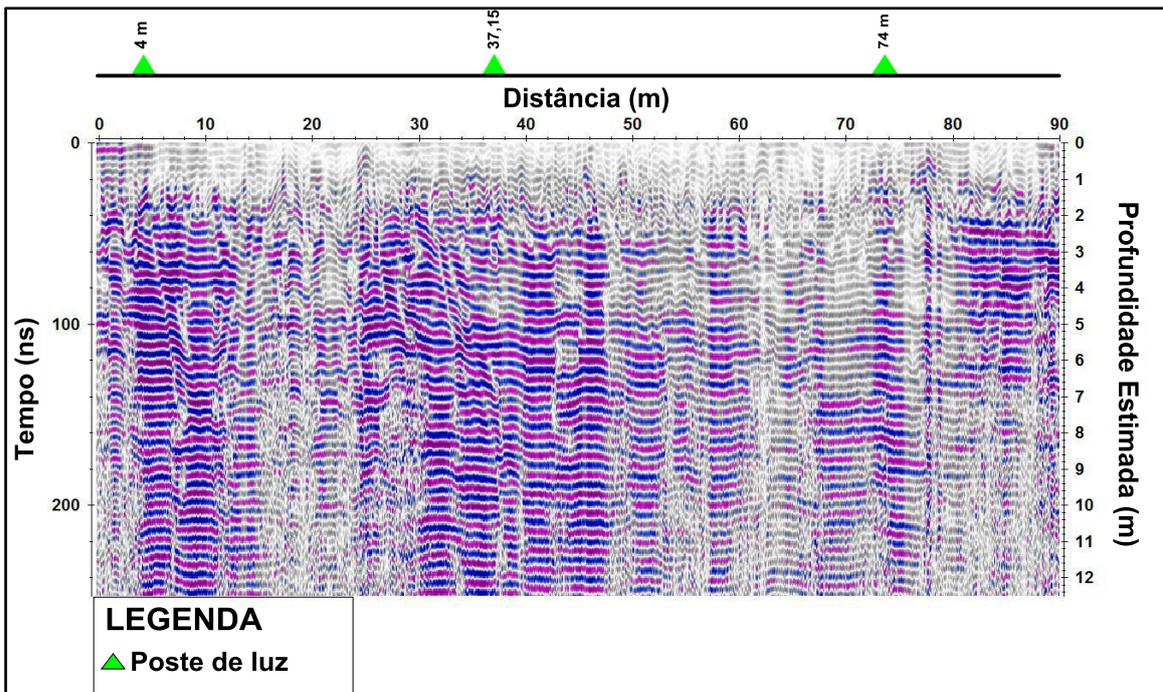
Devido ao perfil CC' ser de grande extensão (530 metros), então para melhor processar, visualizar e analisar/interpretar os radargramas, foram realizados cortes em intervalos de 90 em 90 metros de distância, que serão apresentados da Figura 41 até a Figura 46.

Figura 40 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 530 metros)



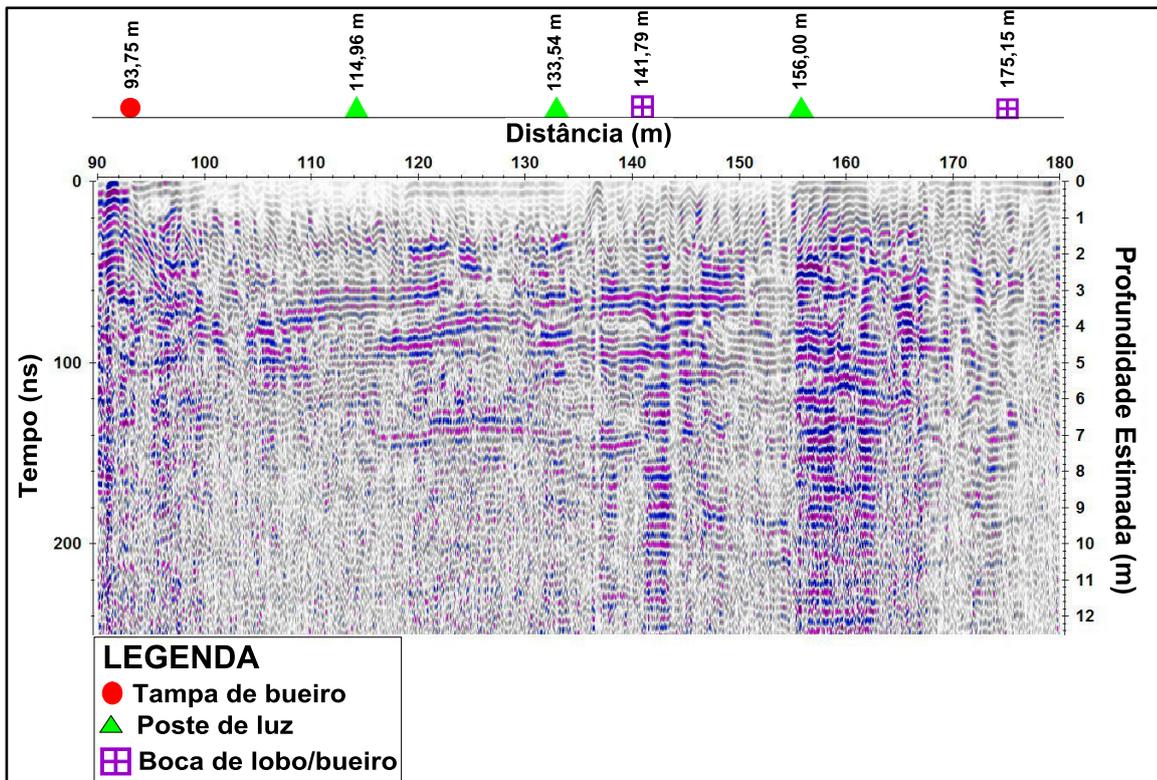
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 41 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)



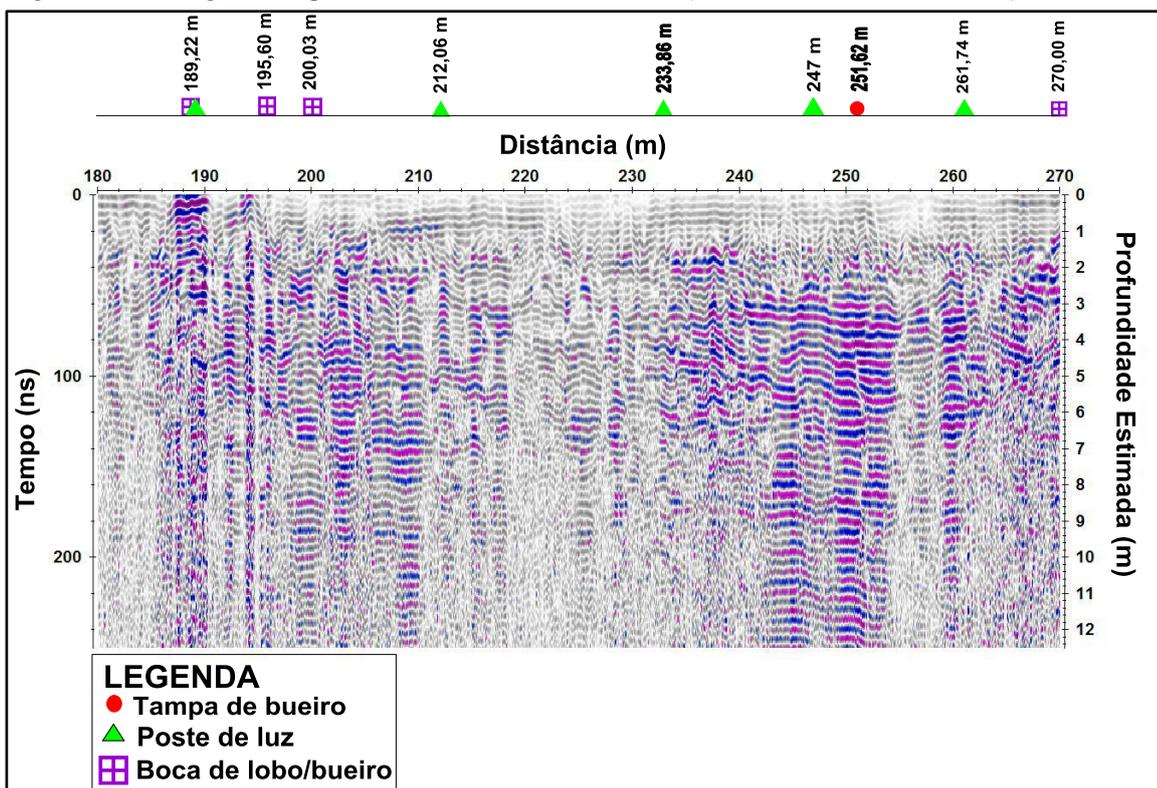
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 42 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)



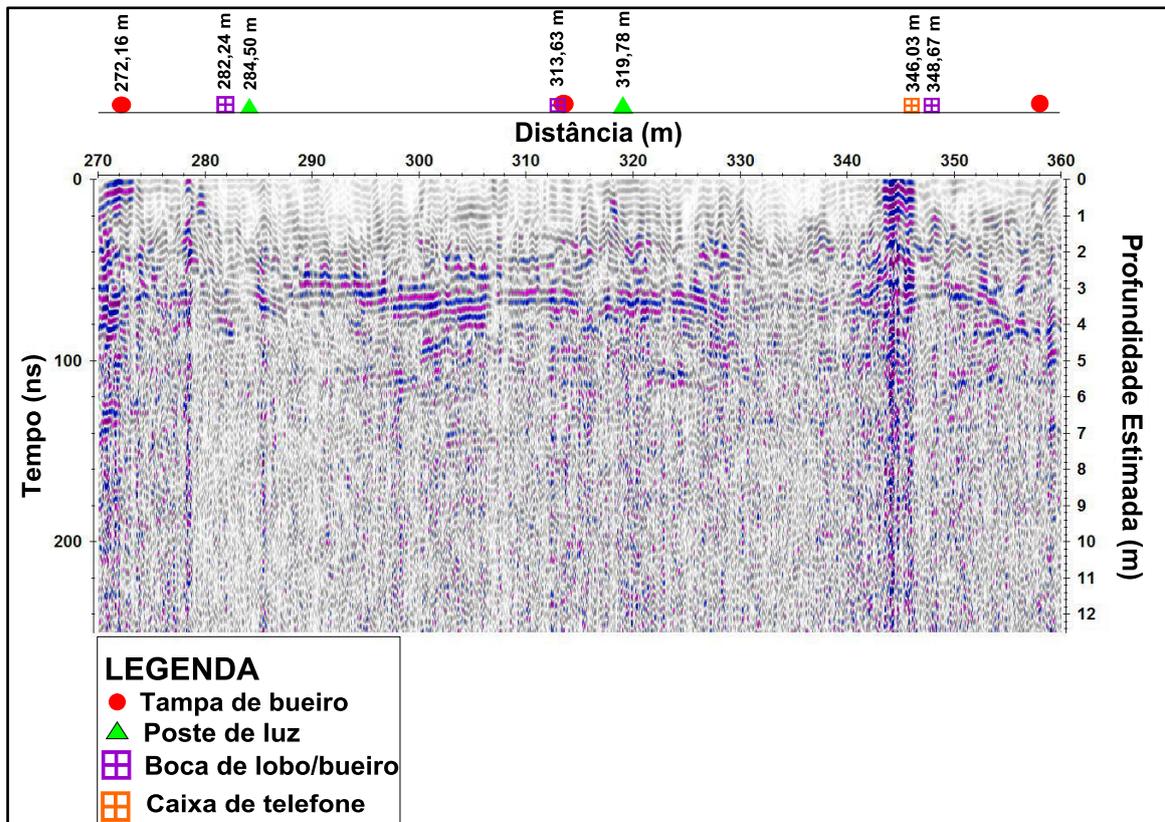
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 43 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)



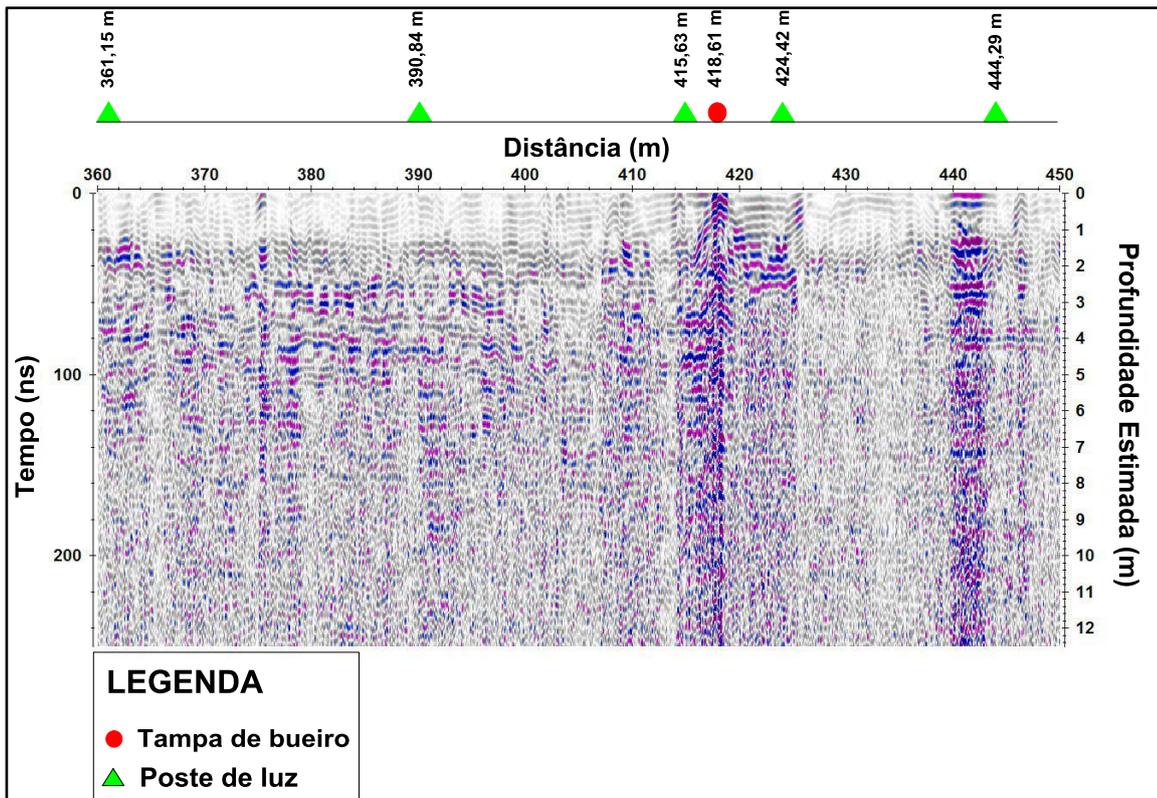
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 44 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)



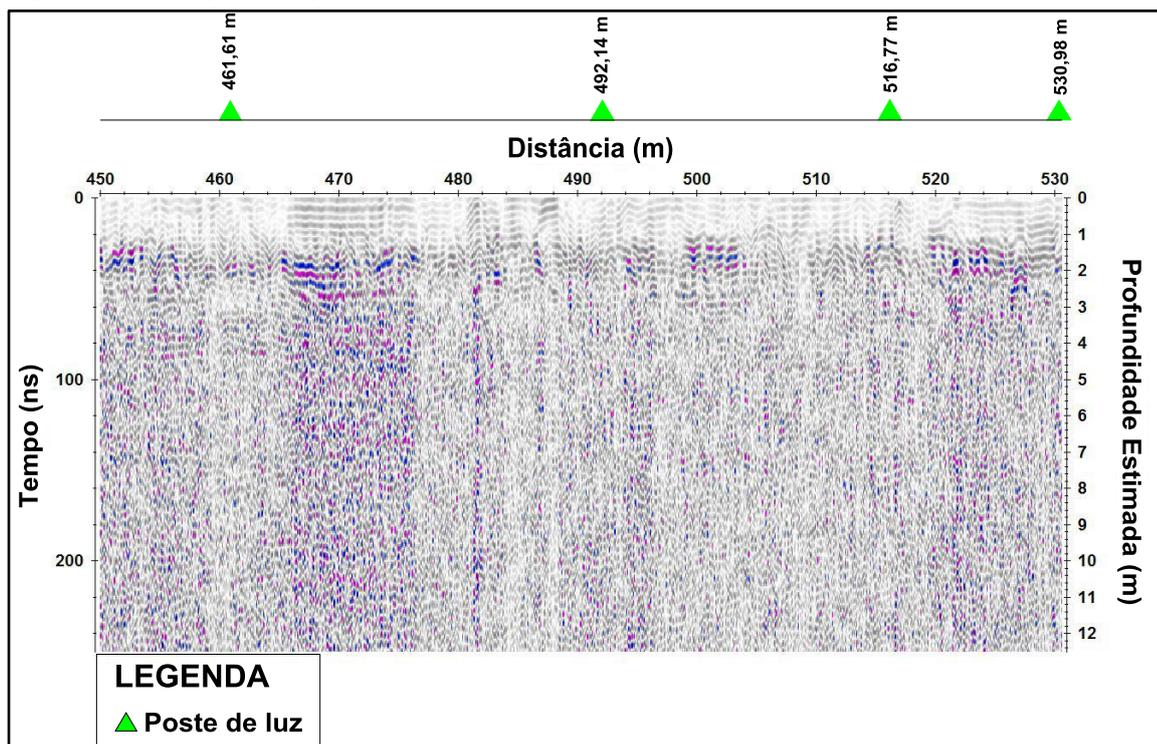
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 45 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 46 – Radargrama do perfil CC' com antena de 80 MHz (intervalo de 450 a 530 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para analisar/interpretar os dados de *GPR* coletados com antena de frequência de 80 MHz deve-se estar ciente de que são dados que se apresentam com baixa resolução nos radargramas, não podendo verificar a presença de interferências subterrâneas mais rasas e nem estimar as interfaces entre os estratos pedológicos.

Os dados de *GPR* foram analisados e interpretados conjuntamente devido aos radargramas referentes à Figura 41 até a Figura 46 pertencerem ao mesmo perfil CC'.

Da Figura 41 até a Figura 46 foram apresentados os radargramas com antena de 80 MHz, apresentando dados até 12 metros de profundidade estimada, onde pode-se observar 3 padrões de reflexão, aos quais são:

Padrões de reflexão contínuo (PR6) com um forte sinal da amplitude, apresentado ao decorrer dos radargramas em profundidade estando relacionado com solo compactado em subsuperfície Lago e Borges (2021) e Gandolfo (2012).

Devido a antena de 80 MHz não apresentar boa resolução, não se pode observar a interface entre os estratos pedológicos e sim o pacote completo com mesmas propriedades físicas eletromagnéticas/elétricas em profundidade, como melhor apresentado no radargrama da Figura 41.

Padrões de reflexão com atenuação do sinal (PR3) apresentando sinais de baixa amplitude em algumas partes dos radargramas possivelmente estão correlacionados com presença de material mais condutivo em profundidade podendo estar relacionado com solo mais argiloso e/ou presença de umidade nos estratos pedológicos/geológicos em profundidade.

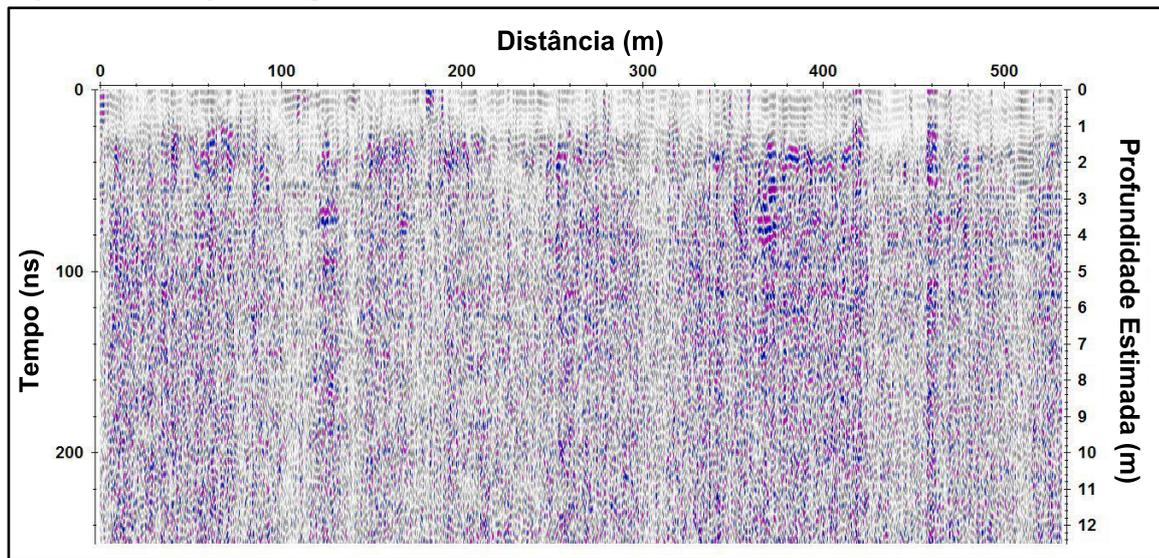
Padrão de refletores de difração (PR4) com um sinal de alta amplitude juntamente com parte de baixa amplitude que aparecem em algumas partes nos radargramas bem próximas das tampas de bueiros e das bocas de lobo que podem ser descontinuidades em subsuperfícies com presença de materiais mais condutivos (umidade e/ou solo argiloso) em profundidade.

7.4 Radargramas do Perfil DD'

Na Figura 47 apresenta-se o radargrama referente ao perfil DD' ao qual os dados foram coletados com antena de 80 MHz e com aproximadamente 533 metros de distância.

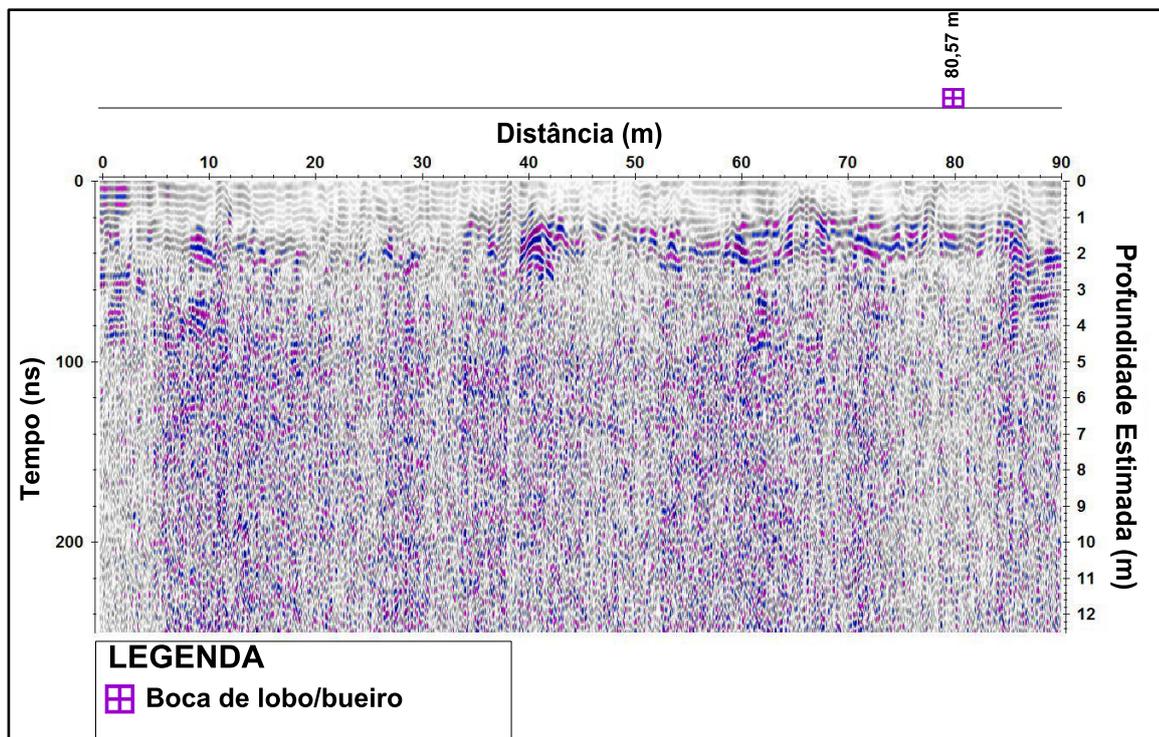
Devido ao perfil DD' ser de grande extensão (533 metros), então para melhor processar, visualizar e analisar/interpretar os dados foram realizados cortes em intervalos de 90 em 90 metros de distância, que serão apresentados da Figura 48 até a Figura 53.

Figura 47 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 533 metros)



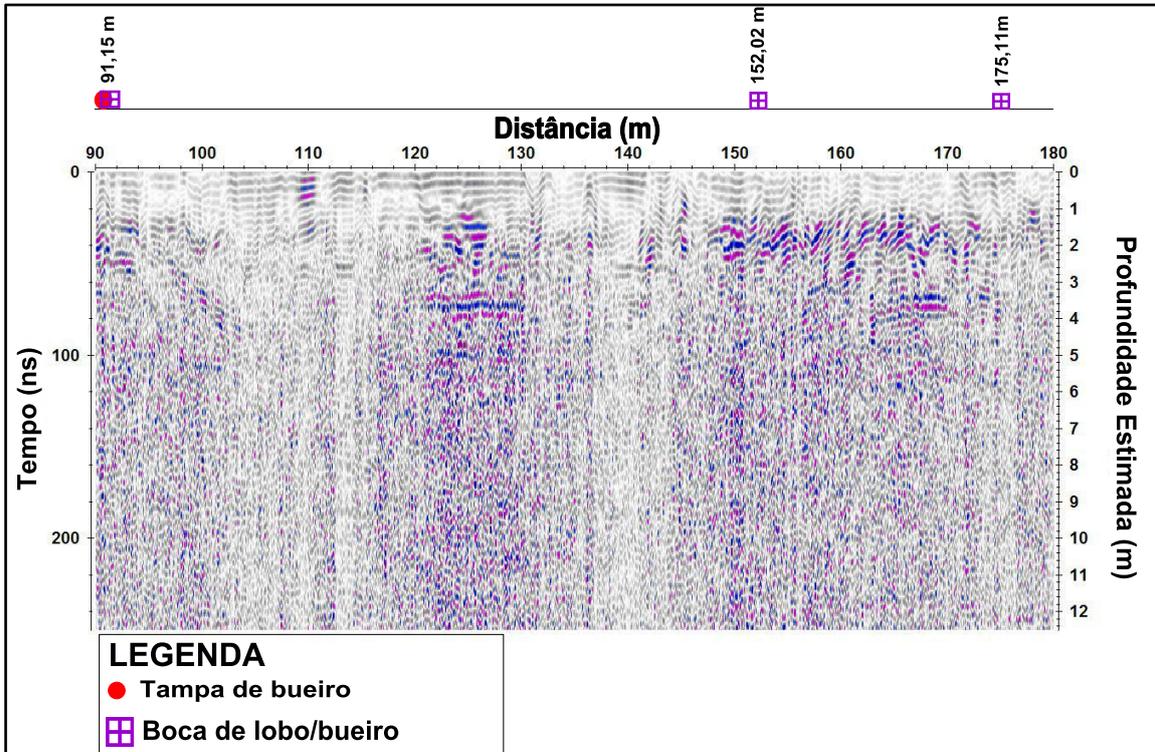
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 48 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)



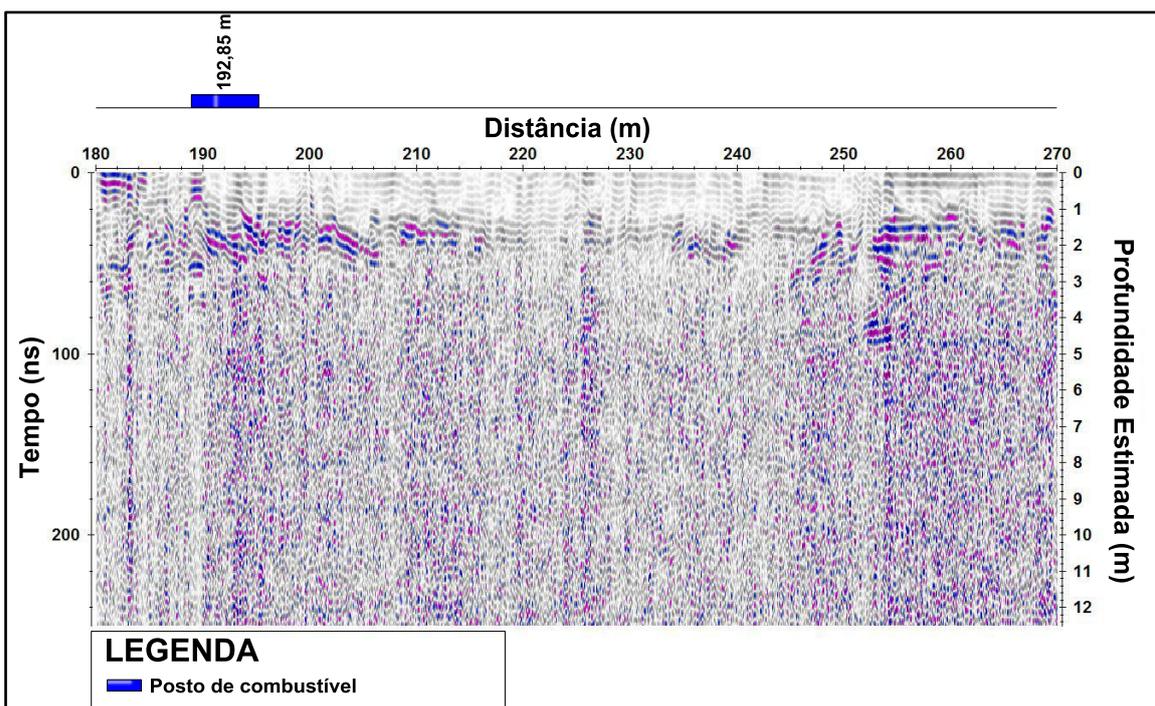
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 49 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)



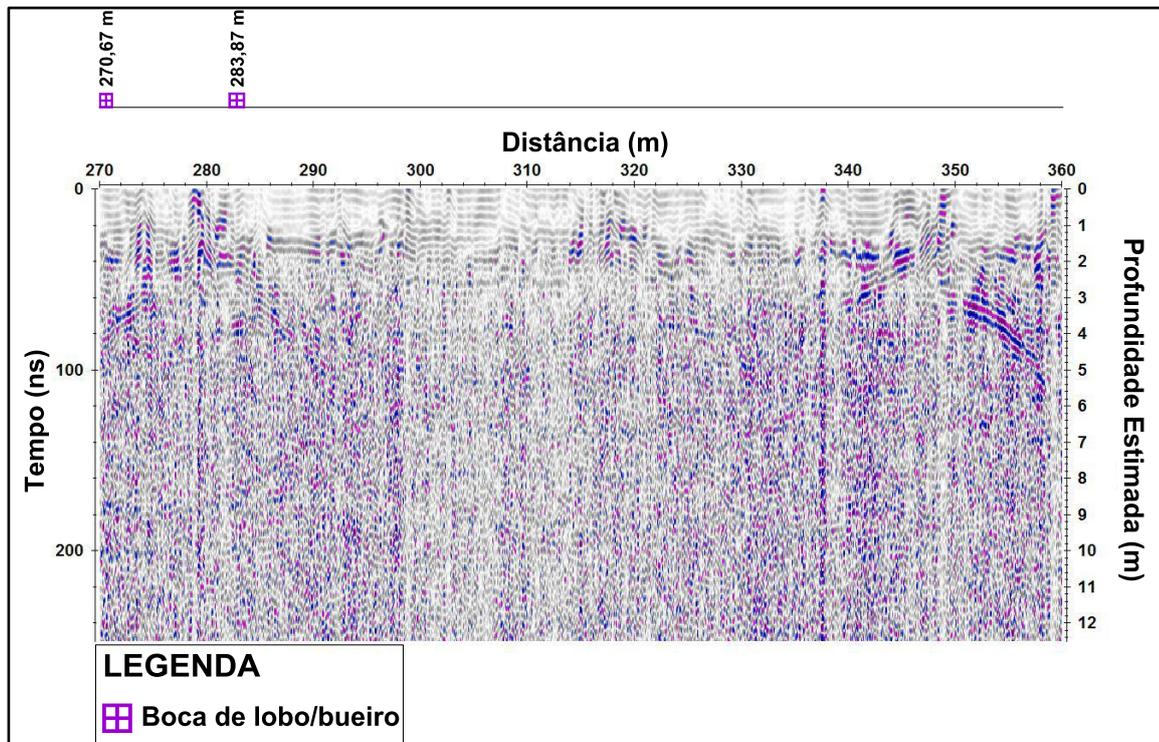
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 50 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)



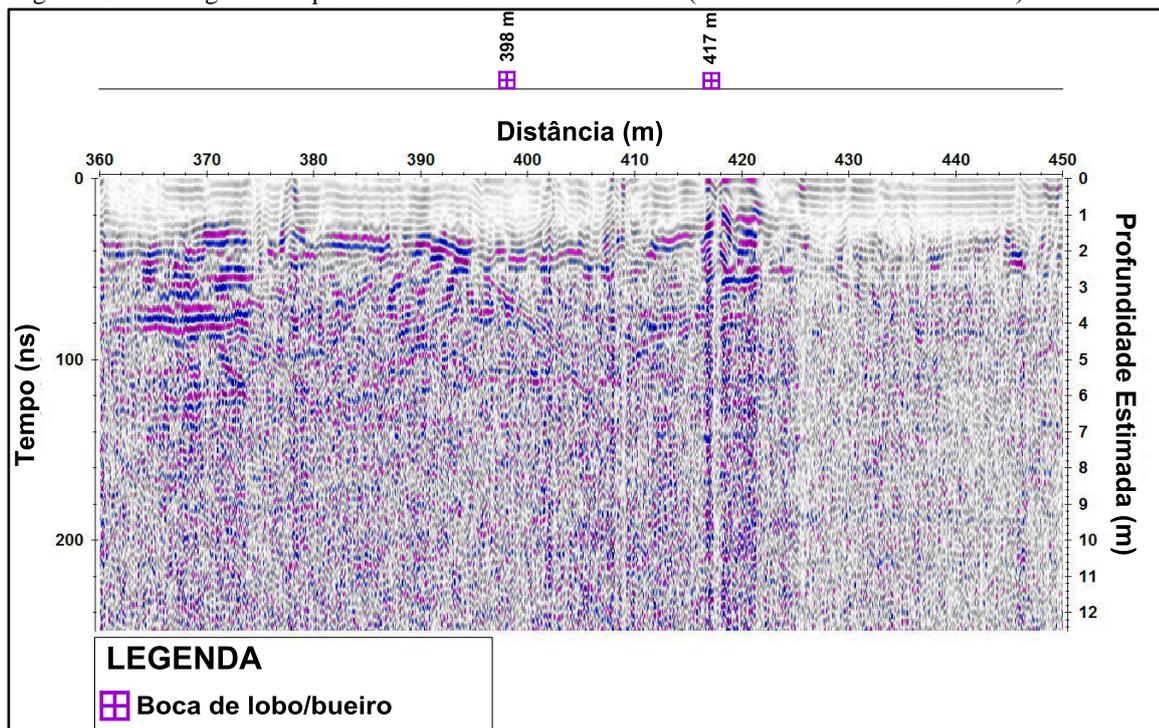
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 51 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)



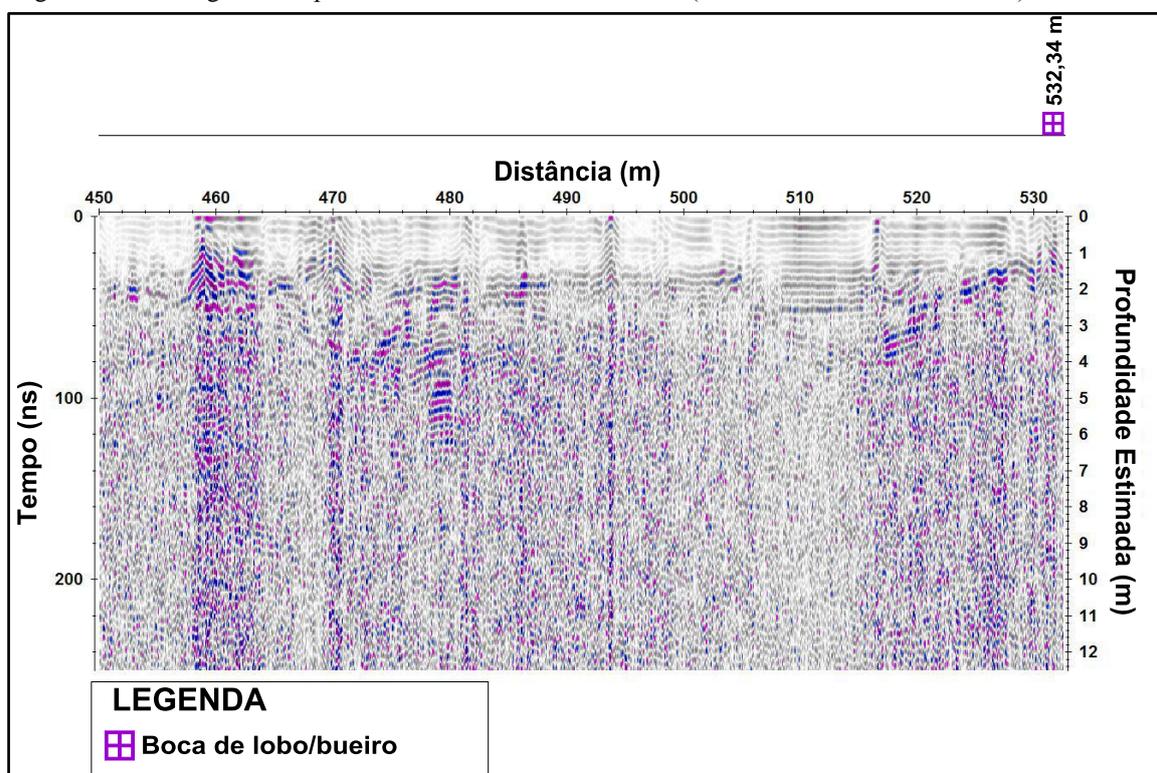
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 52 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 53 – Radargrama do perfil DD' com antena de 80 MHz (intervalo de 450 a 533 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Os dados de *GPR* foram analisados e interpretados conjuntamente devido os radargramas referentes às Figuras 48 até a Figura 53 pertencerem ao mesmo perfil DD' ao qual foi coletado com a antena de 80 MHz.

Para analisar/interpretar os dados de *GPR* coletados com antena de frequência de 80 MHz deve-se estar ciente de que são dados que se apresentam com baixa resolução nos radargramas, não podendo verificar a presença de interferências subterrâneas mais rasas e nem estimar as interfaces entre os estratos pedológicos.

Da Figura 48 até a Figura 53 foram apresentados os radargramas com antena de 80 MHz, apresentando dados até 12 metros de profundidade estimada, onde pode-se observar 3 padrões de reflexão, aos quais são:

Padrões de reflexão contínuo (PR6) com um forte sinal da amplitude, apresentado ao decorrer dos radargramas em profundidade estando relacionado com solo compactado em subsuperfície Lago e Borges (2021). Devido a antena de 80 MHz não apresentar boa resolução, não se pôde observar interfaces entre os estratos pedológicos, somente o pacote completo com mesmas propriedades eletromagnéticas/elétricas em profundidade.

Padrões de reflexão com atenuação do sinal (PR3) apresentando sinais de baixa amplitude em algumas partes dos radargramas possivelmente estão correlacionados com presença de material mais condutivo em profundidade podendo estar relacionado com solo mais argiloso e/ou presença de umidade nos estratos pedológicos em profundidade.

Padrão de refletores de difração (PR4) com um sinal de alta amplitude juntamente com parte de baixa amplitude que aparecem em algumas partes nos radargramas bem próximas das tampas de bueiros e das bocas de lobo que podem ser descontinuidades em profundidades com presença de materiais mais condutivos (umidade e/ou solo argiloso).

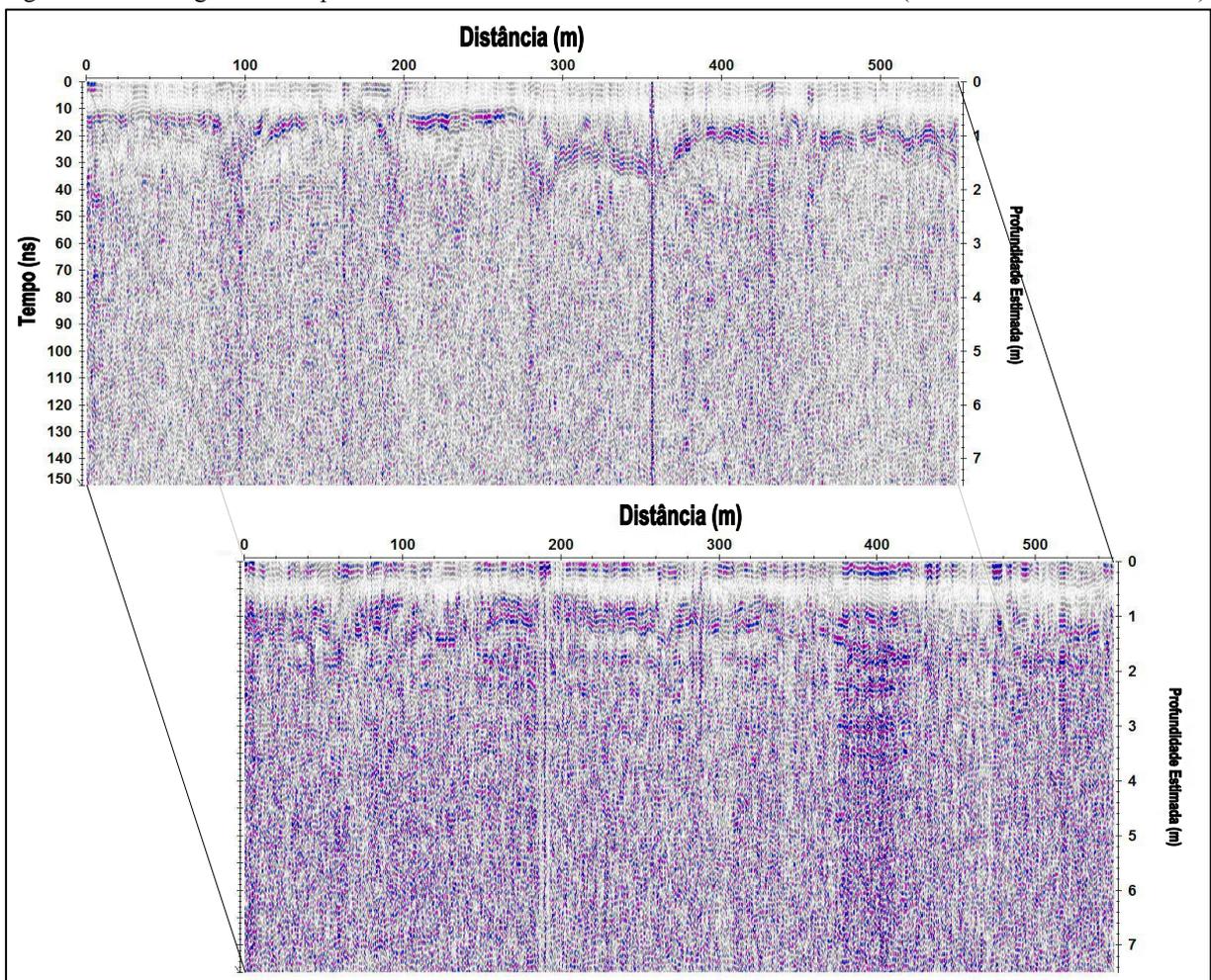
8 VISUALIZAÇÃO DOS RADARGRAMAS EM PERSPECTIVA 3D

Com a visualização dos perfis de mesmas frequências, AA' - BB' e CC' - DD', aos quais foram coletados em lados opostos da rua Benjamin Constant pode-se verificar se existe alguma continuidade das interferências subterrâneas delimitadas entre os perfis AA' - BB' e entre os perfis CC' - DD', podendo assim delimitar a continuidade de tubulações, ou outros materiais em subsuperfície que estejam atravessando a rua.

8.1 Visualização dos Perfis AA' e BB' lado a lado

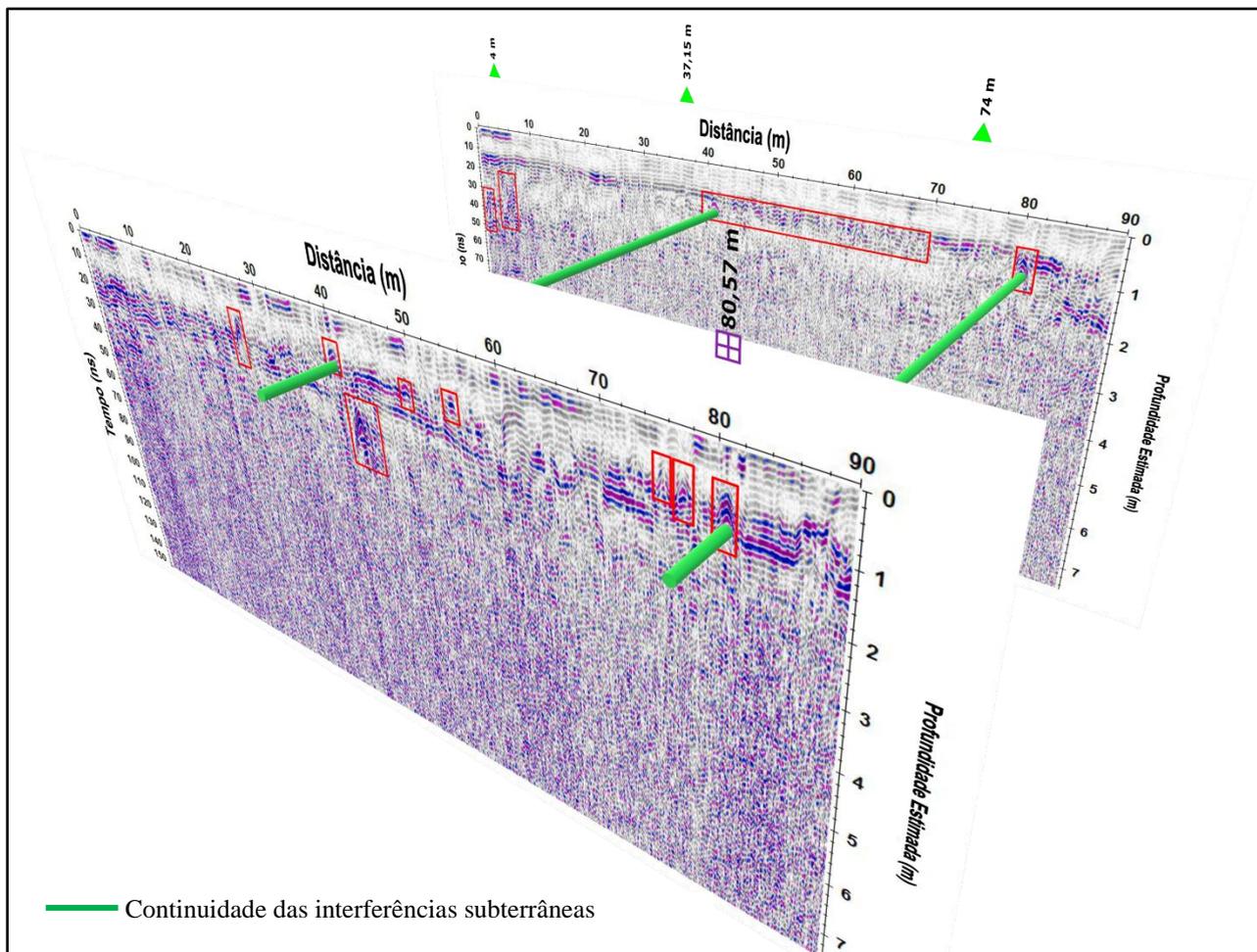
A seguir serão apresentadas as figuras referentes aos radargramas do perfil AA' e perfil BB' lado a lado em perspectiva 3D, podendo assim verificar se há alguma continuidade das interferências subterrâneas entre os perfis.

Figura 54 – Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 549 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 55 - Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)



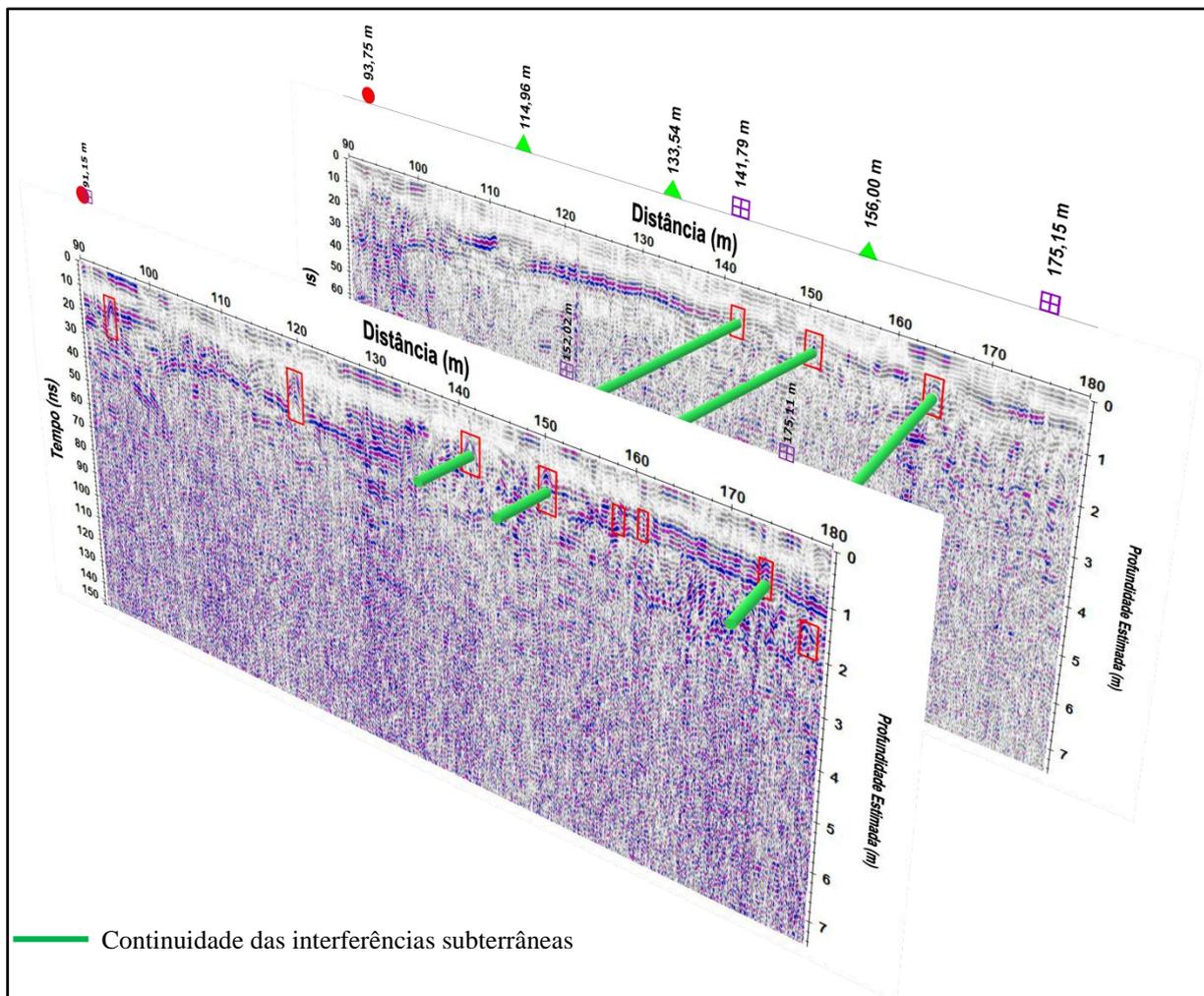
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Ao analisar a visualização lado a lado dos perfis AA' e BB' no intervalo de 0 a 90 metros apresentada na Figura 55, pode-se verificar 2 interferências subterrâneas que podem estar atravessando a rua Benjamin Constant do lado direito para o lado esquerdo.

1ª - Interferências subterrâneas estão entre as posições 40 e 42 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto no perfil AA' e BB'.

2ª - Interferências subterrâneas estão na posição de 80 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto também no perfil AA' e BB'.

Figura 56 – Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

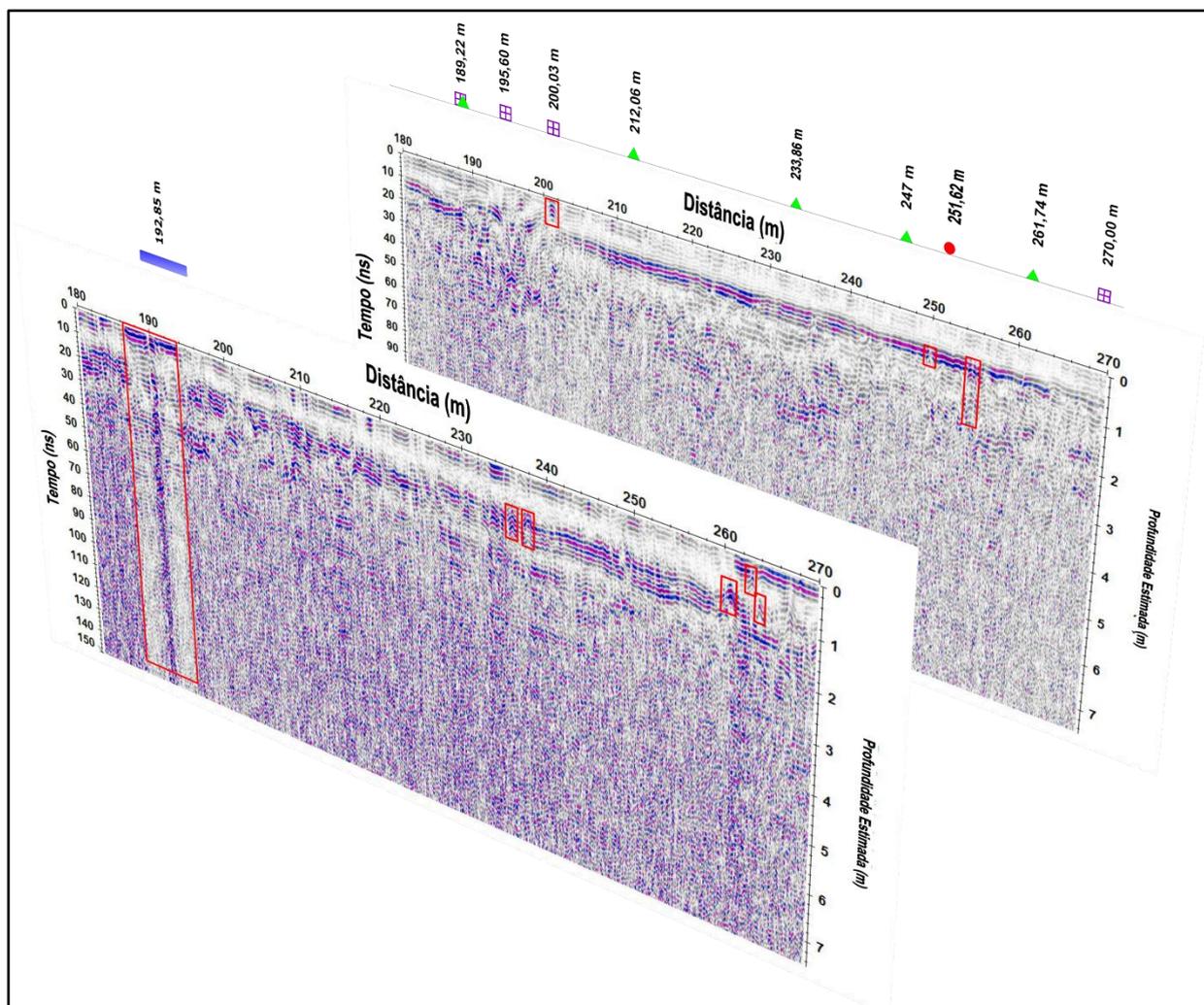
Ao analisar a visualização lado a lado dos perfis AA' e BB' no intervalo de 90 a 180 metros apresentada na Figura 56, pode-se verificar 3 interferências subterrâneas que podem estar atravessando a rua Benjamin Constant do lado direito para o lado esquerdo.

1^a - Interferências subterrâneas estão na posição de 142 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto no perfil AA' e BB'.

2^a - Interferências subterrâneas estão na posição de 151 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto também no perfil AA' e BB'.

3^a - Interferências subterrâneas estão na posição de 165 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto no perfil AA' e na posição 174 metros visto no perfil BB'.

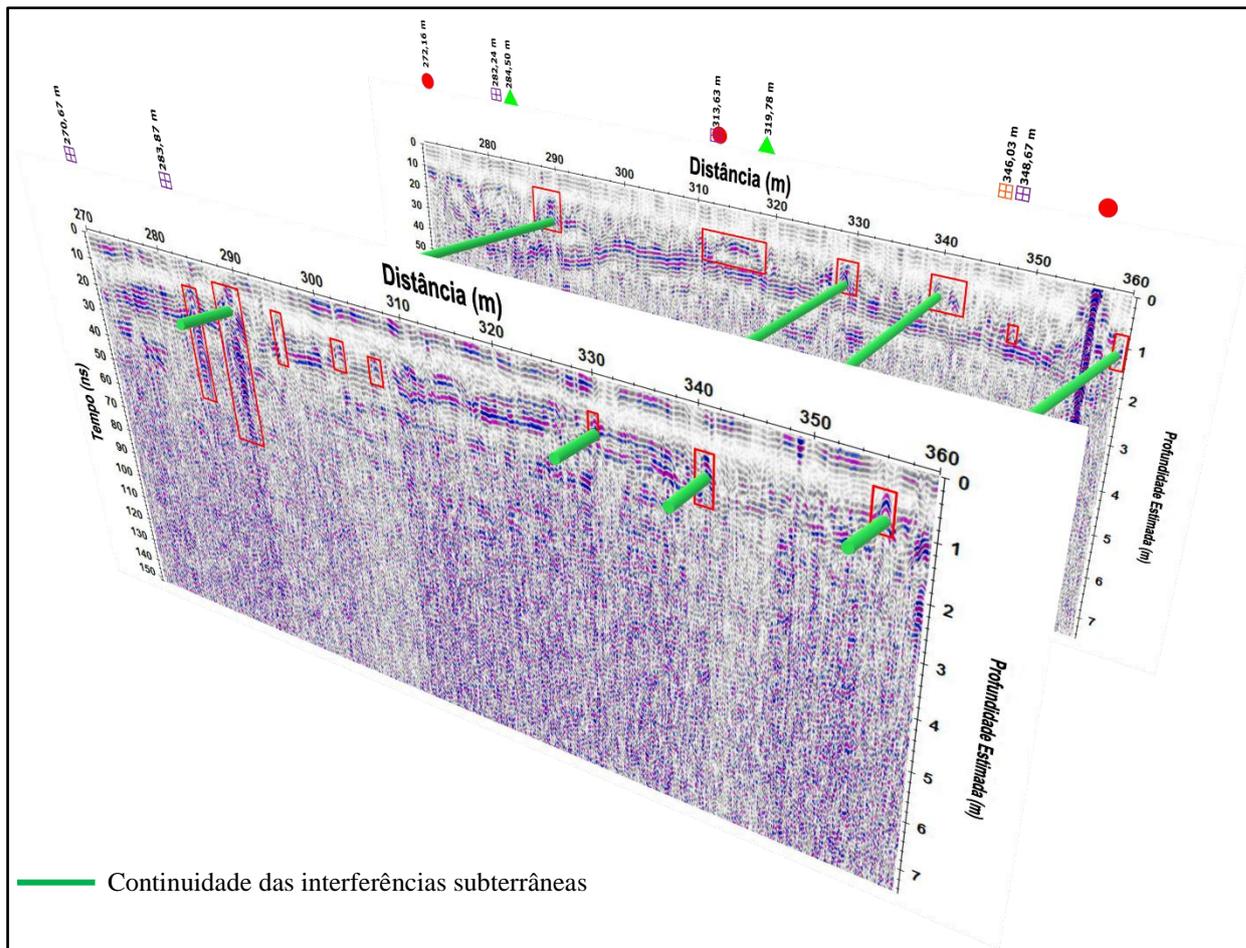
Figura 57 – Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Ao analisar a visualização lado a lado dos perfis AA' e BB' no intervalo de 180 a 270 metros apresentada na Figura 57, não foi possível verificar a continuidade de interferências subterrâneas atravessando a rua Benjamin Constant do lado direito para o lado esquerdo.

Figura 58 – Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Ao analisar a visualização lado a lado dos perfis AA' e BB' no intervalo de 270 a 360 metros apresentada na Figura 58, pode-se verificar 4 interferências subterrâneas que podem estar atravessando a rua Benjamin Constant do lado direito para o lado esquerdo.

1^a - Interferências subterrâneas estão na posição de 289 metros, representadas por (PR1) e (PR4) visto no perfil AA' e perfil BB'.

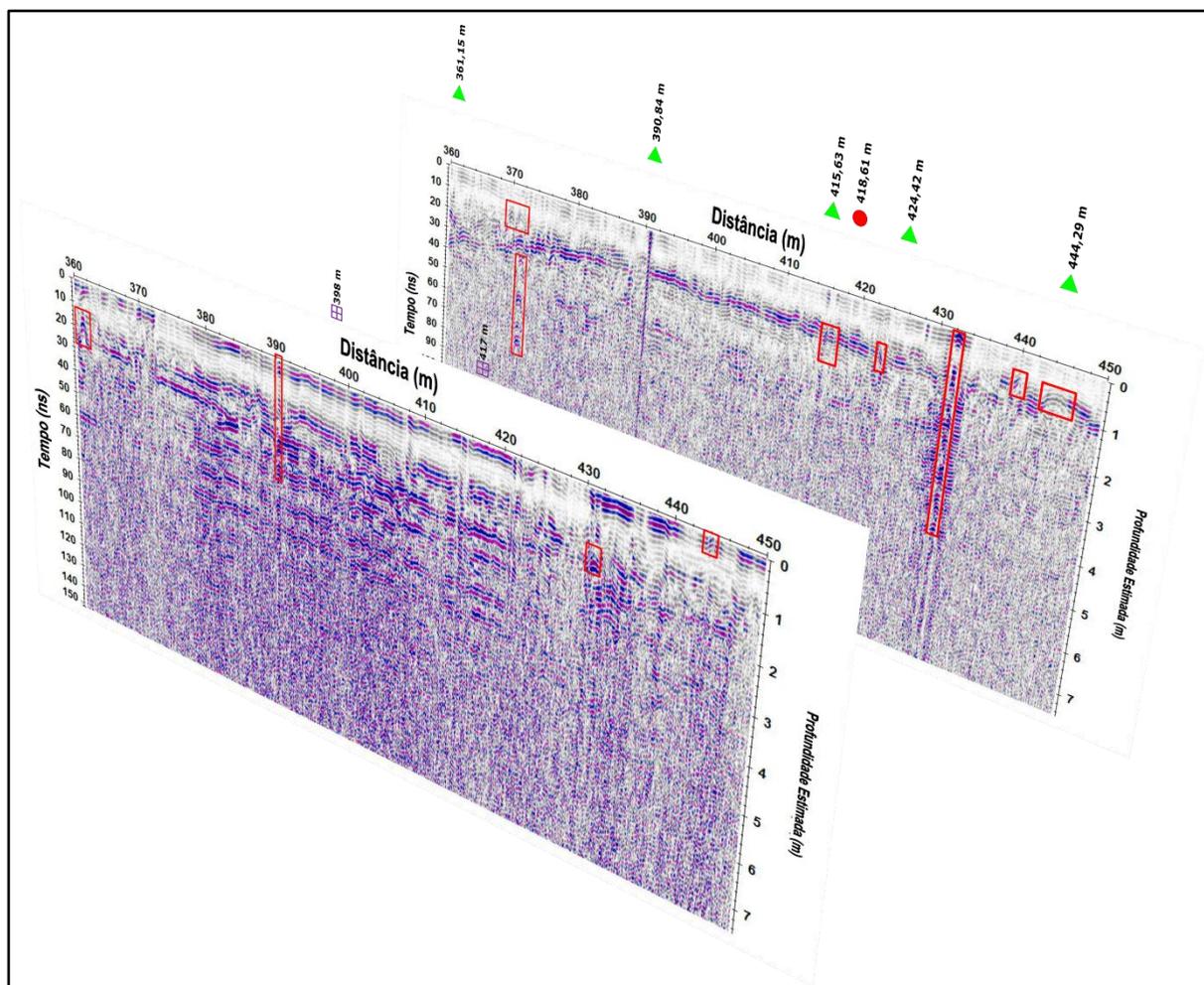
2^a - Interferências subterrâneas estão na posição de 330 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto também no perfil AA' e perfil BB'.

3^a - Interferências subterrâneas estão na posição de 340 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto também no perfil AA' e perfil BB'.

4^a - Interferências subterrâneas estão entre as posições de 360 metros e 357 metros, representadas por (PR1) e (PR4) visto também no perfil AA' e perfil BB'. A continuidade das

interferências subterrâneas pode estar com um cruzando em ângulo entre os lados direito e esquerdo da rua Benjamin Constant.

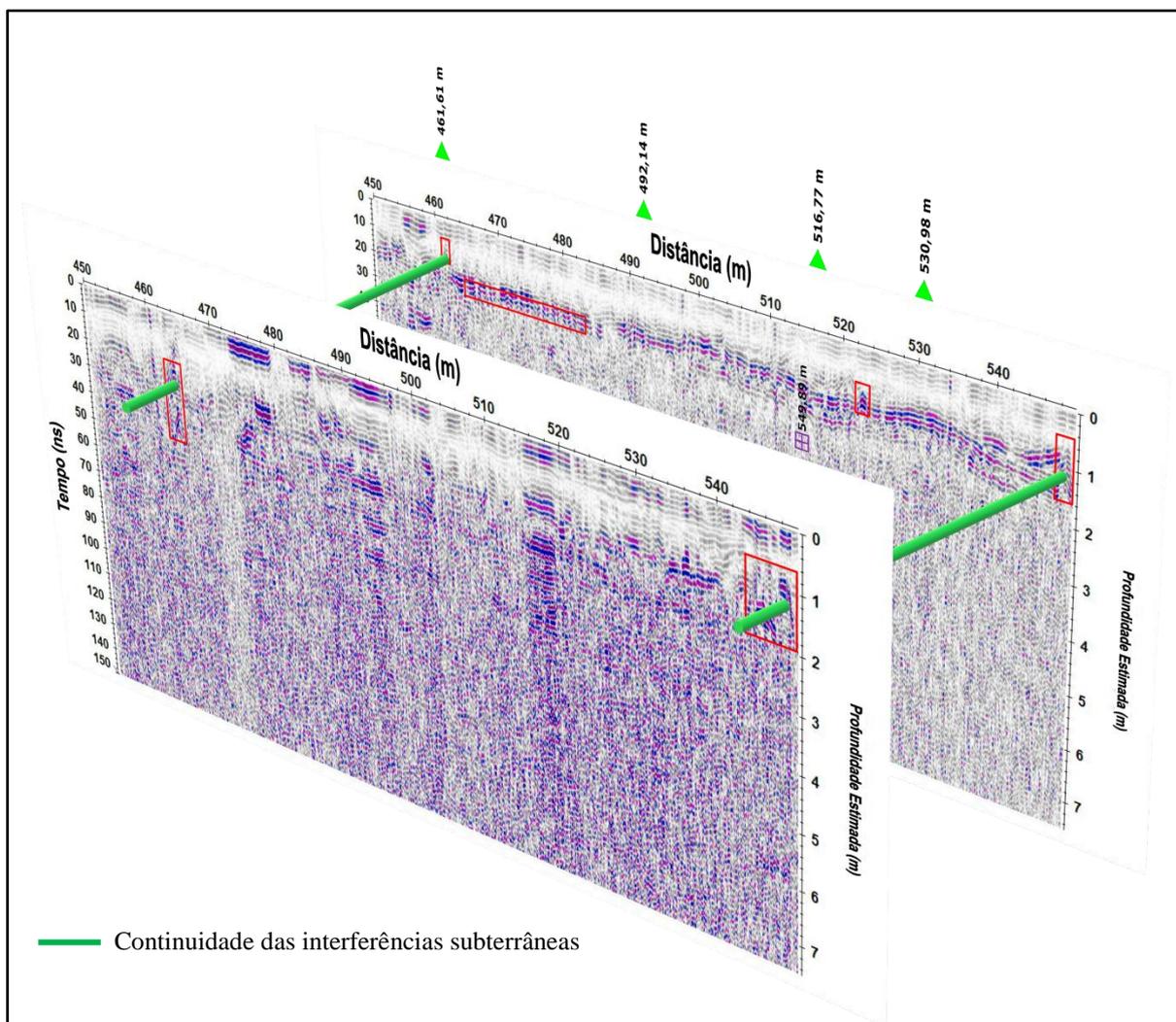
Figura 59 – Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Ao analisar a visualização lado a lado dos perfis AA' e BB' no intervalo de 360 a 450 metros apresentada na Figura 59, também não foi possível verificar a continuidade de interferências subterrâneas atravessando a rua Benjamin Constant do lado direito para o lado esquerdo.

Figura 60 – Radargramas dos perfis AA' e BB' lado a lado com antena de 200 MHz (intervalo de 450 a 549 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Ao analisar a visualização lado a lado dos perfis AA' e BB' no intervalo de 450 a 549 metros apresentada na Figura 58, pode-se verificar 2 interferências subterrâneas que podem estar atravessando a rua Benjamin Constant do lado direito para o lado esquerdo.

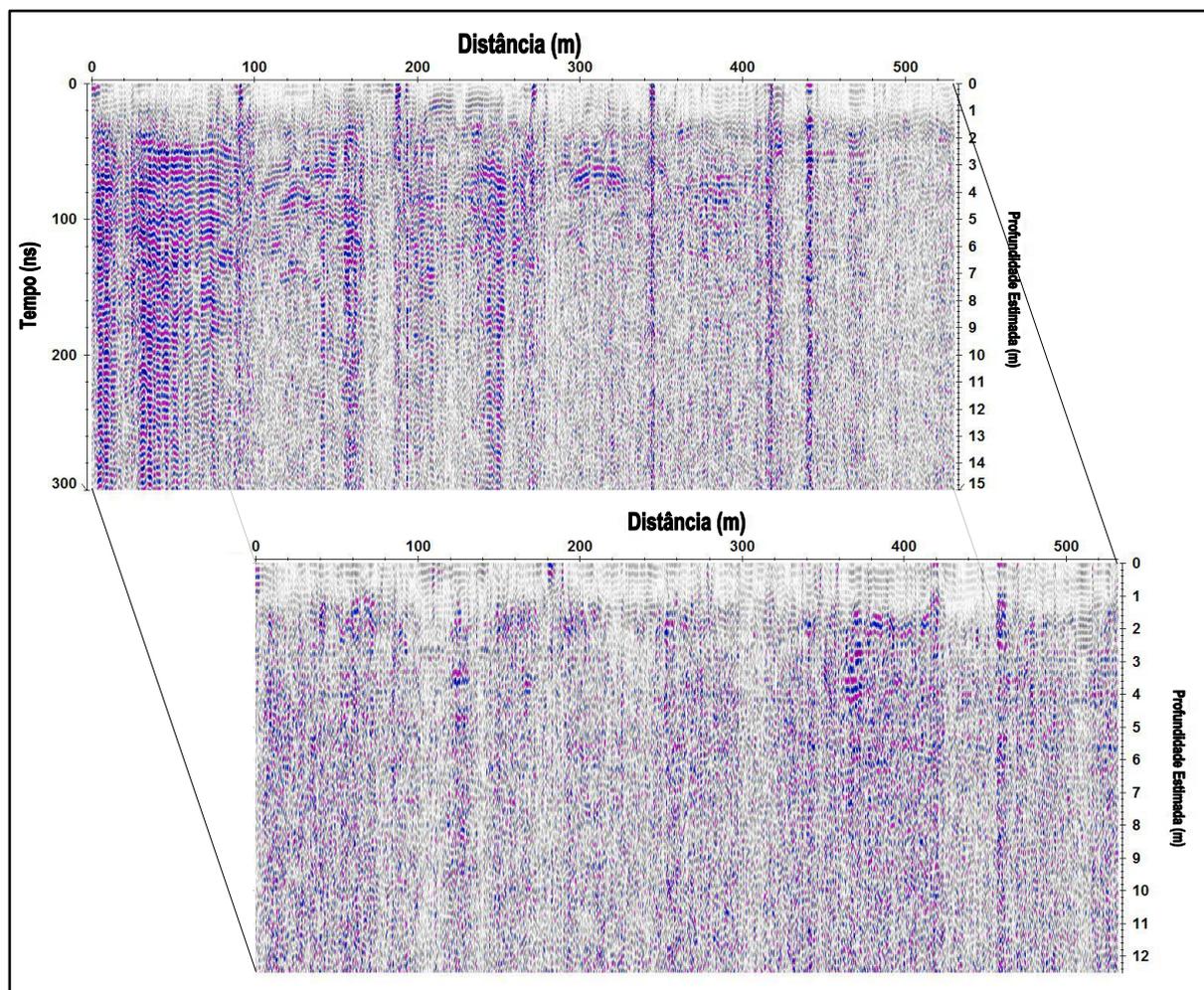
1ª - Interferências subterrâneas estão entre as posições de 461 metros e 463 metros, representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto no perfil AA' e perfil BB'.

2ª - Interferências subterrâneas estão entre as posições de 548 metros e 549 metros distância representadas por um padrão de reflexão hiperbólico (PR1) visto também no perfil AA' e perfil BB'.

8.2 Visualização dos Perfis CC' e DD' lado a lado

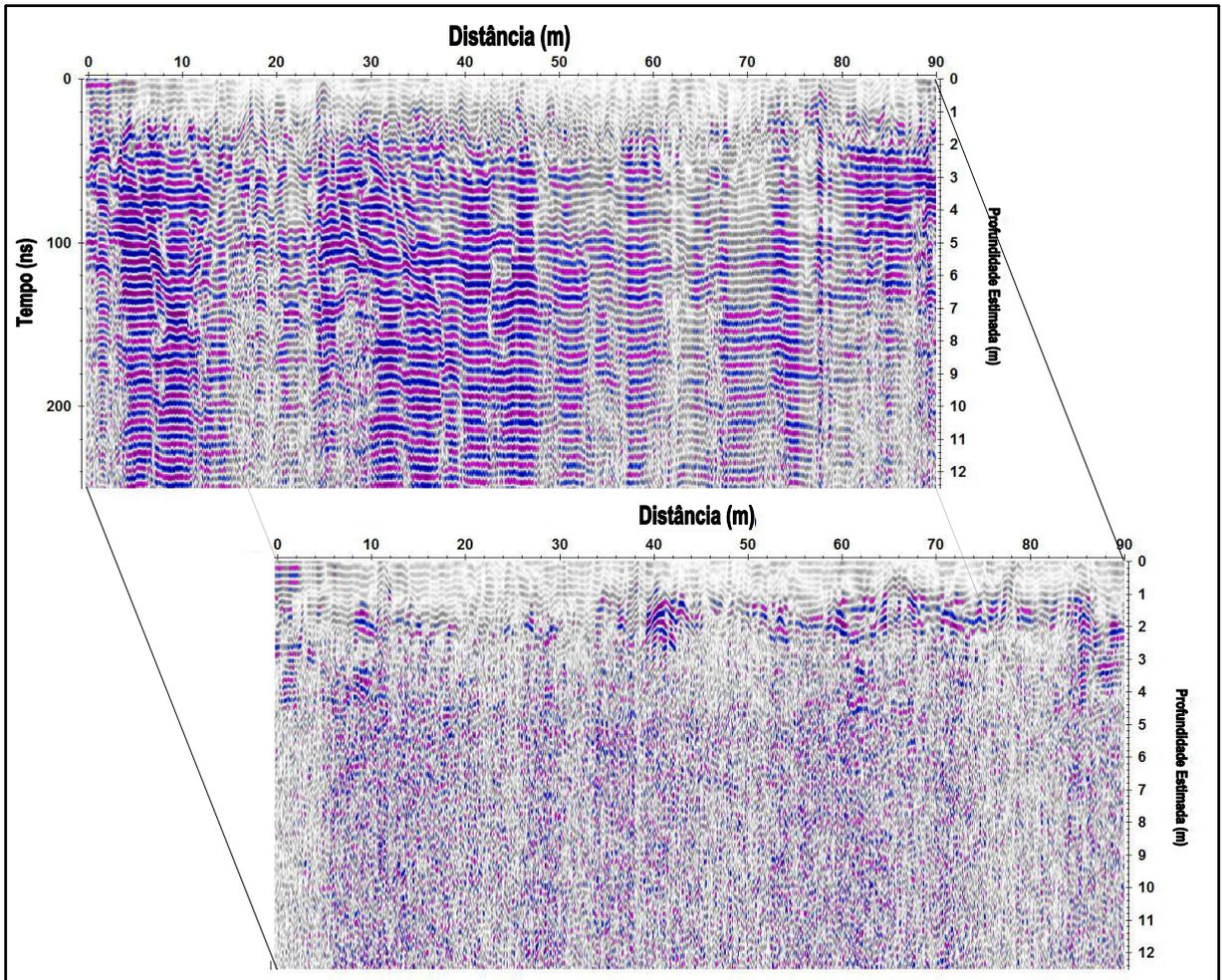
A seguir serão apresentadas as figuras referentes aos radargramas do perfil CC' e perfil DD' lado a lado em perspectiva 3D.

Figura 61 – Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 530 metros)



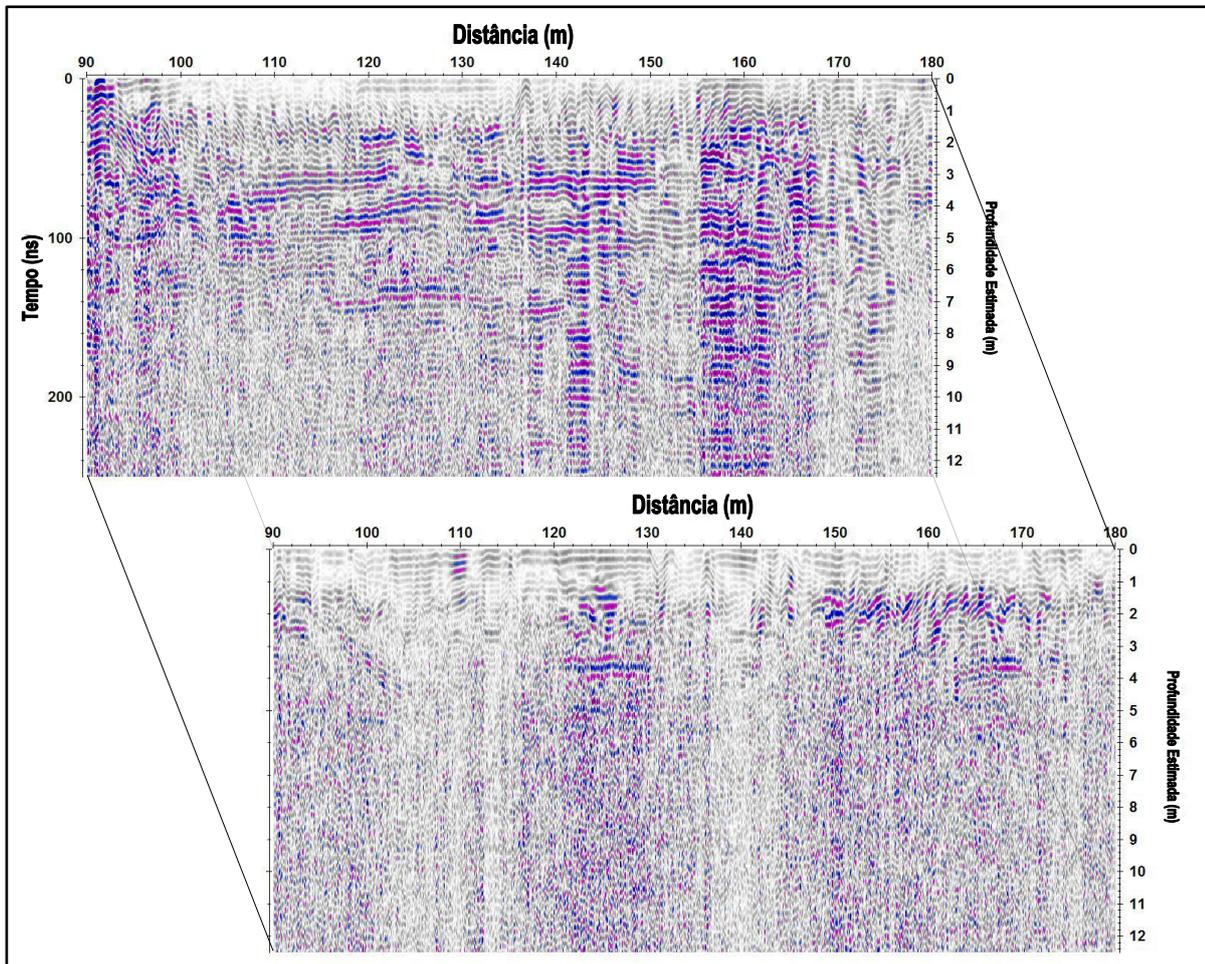
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 62 - Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 0 a 90 metros)



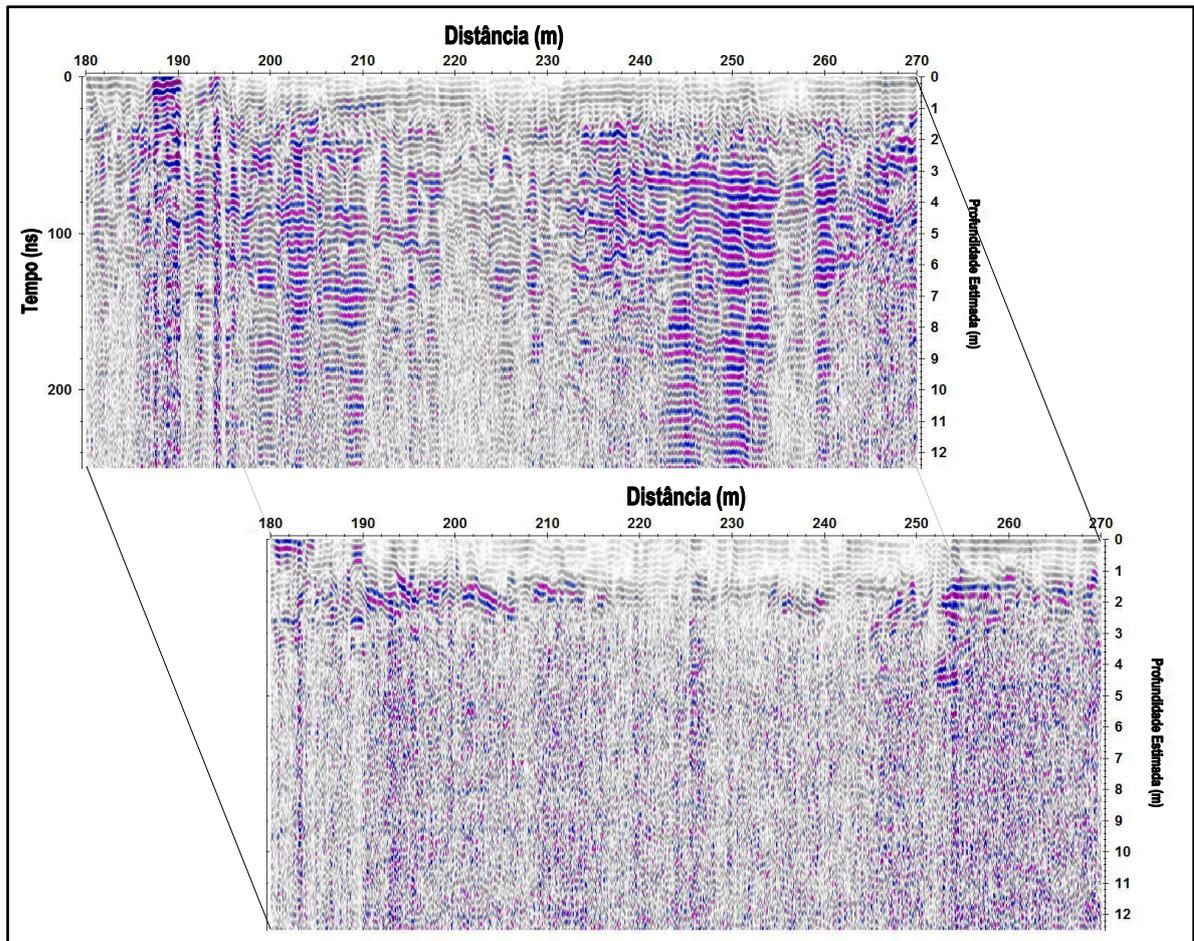
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 63 - Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 90 a 180 metros)



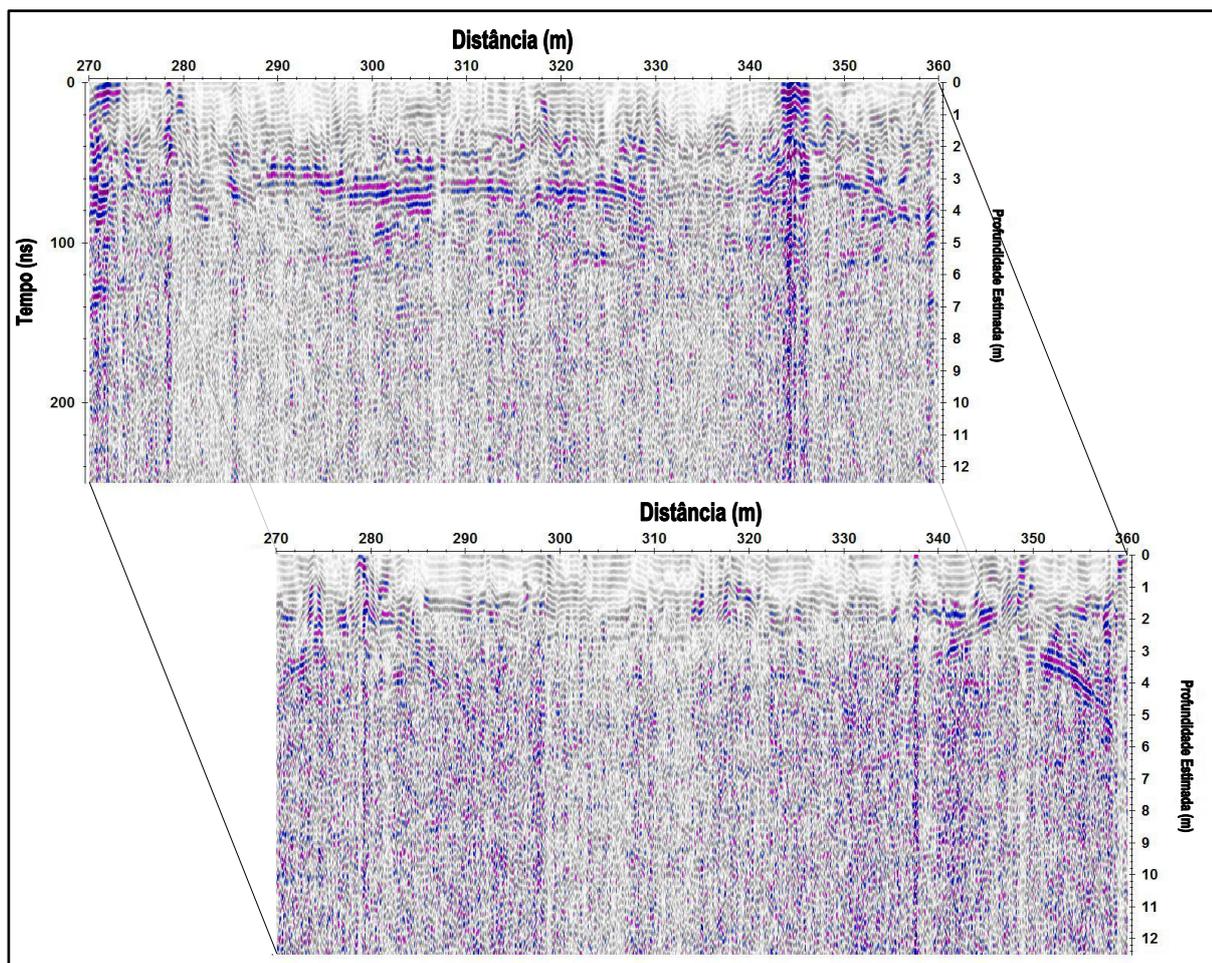
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 64 - Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 180 a 270 metros)



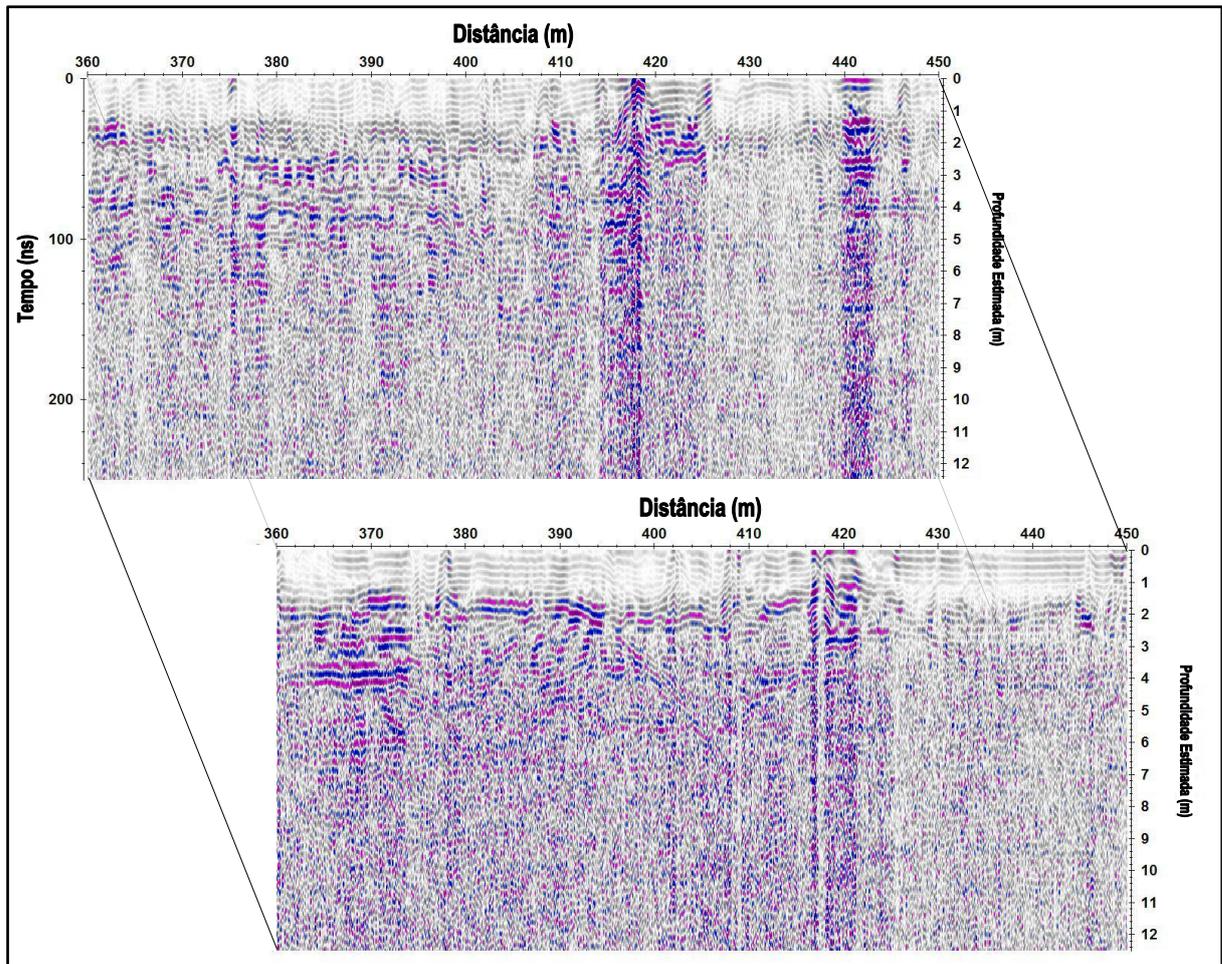
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 65 - Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 270 a 360 metros)



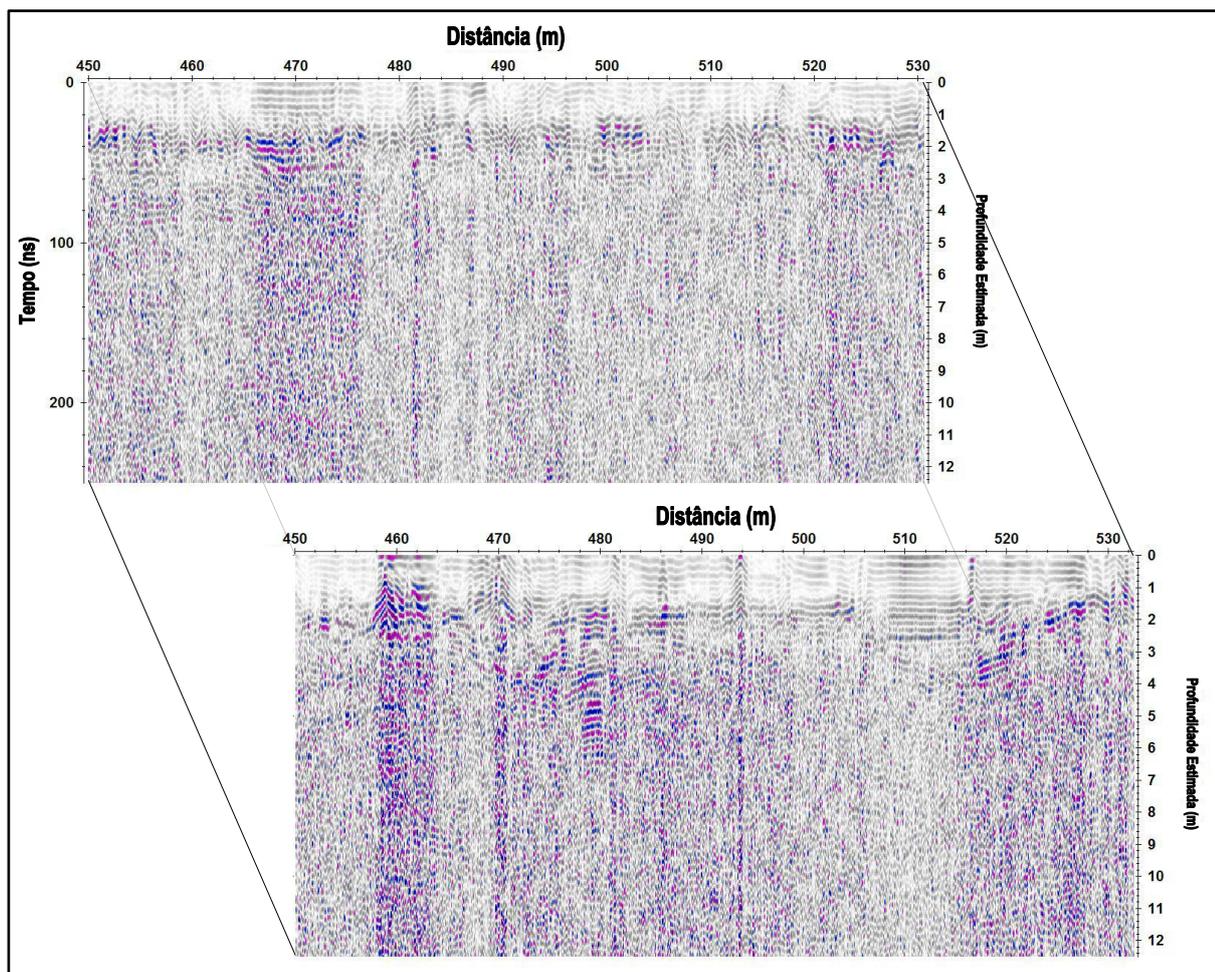
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 66 - Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 360 a 450 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 67- Radargramas dos perfis CC' e DD' lado a lado com antena de 80 MHz (intervalo de 450 a 530 metros)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Devido aos dados coletados com antena de 80 MHz, à qual tem uma baixa resolução vertical e horizontal, não se pôde verificar interferências subterrâneas e conseqüentemente não foi observada nenhuma continuidade entre os perfis CC' e DD'.

A visualização em perspectiva 3D dos radargramas, relacionados aos perfis com antena de 80 MHz, é importante para a verificação da continuidade lateral de solos com as mesmas propriedades eletromagnéticas/elétricas em subsuperfície.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a utilização do método geofísico Radar de Penetração no Solo (*GPR*), em ambiente urbano, pôde-se obter resultados satisfatórios na delimitação de padrões de reflexão hiperbólicos relacionados às interferências subterrâneas no centro urbano de Caçapava do Sul com a aquisição de dados de quatro perfis que foram realizados ao decorrer do lado direito e do lado esquerdo com sentido W-E da rua Benjamin Constant.

Em relação as frequências centrais das antenas utilizadas, às quais foram de 80 MHz e 200 MHz, verificou-se que os dados coletados com a antena de 200 MHz apresentaram radargramas com melhores resoluções em baixas profundidades, delimitando interferências subterrâneas próximos da superfície, enquanto os dados com a antena de 80 MHz tiveram baixa resolução para delimitar essas interferências, porém tiveram uma maior penetração do sinal verificando-se pacotes de solos com propriedades eletromagnéticas/elétricas diferentes em profundidade.

A rotina do processamento dos dados de *GPR* foi apresentada de forma detalhada para poder verificar uma melhora na qualidade dos radargramas, realçando refletores contínuos e pontuais, e para que possa ser utilizada como referência em trabalhos realizados em ambientes urbanos, com propósito de delimitar interferências subterrâneas.

Ao analisar os radargramas foi observado 6 padrões de reflexões, interpretados como: padrões de reflexão hiperbólicos (PR1) relacionados às interferências subterrâneas; padrões de reflexão contínuo/horizontal (PR2) atribuídos à interface entre as camadas de pavimento asfáltico/paralelepípedo granítico e o solo/aterro compactado; padrões de atenuação (PR3) relacionados à materiais mais condutivos (presença de água ou solo argiloso); padrões de refletores de difração (PR4) relacionados à descontinuidades em profundidade; e padrões de reverberações “ringing” (PR5) relacionados à materiais com alta refletância/condutividade presentes na superfície do terreno; padrão de reflexão contínuos (PR6) para dados coletados com a antena de 80 MHz.

Outro propósito deste trabalho era verificar se os padrões de reflexão observados, destacando os padrões de reflexão hiperbólicos, relacionados às interferências subterrâneas, tinham alguma continuidade entre os perfis. Pode-se então visualizar/analisar 10 continuidades possivelmente correlacionadas com tubulações atravessando a rua Benjamin Constant.

Com este trabalho pôde-se delimitar as possíveis interferências enterradas no subsolo urbano da rua Benjamin Constant possibilitando futuramente a criação de um documento técnico norteador, o qual permitirá aos gestores de infraestrutura do município de Caçapava do

Sul terem acesso às estruturas enterradas de forma ágil, reduzindo assim, os riscos de acidentes e o tempo de cada intervenção no solo.

10 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros pretende-se estudar com mais detalhes as interferências subterrâneas da rua Benjamin Constant, melhorando a precisão em relação à posição, profundidade e continuidade das mesmas, a partir de modelos geológicos-geofísicos e geotécnicos-geofísicos.

Para dar seguimento aos próximos trabalhos, deve-se realizar perfis de GPR em direções perpendiculares à rua Benjamin Constant, verificando a possibilidade de interferências subterrâneas, como tubulações, que estejam ao decorrer da rua estudada.

Para as etapas de processamento avançado, deve-se realizar levantamentos topográficos (correção topográfica), calibração da velocidade de propagação da onda eletromagnética para a área de estudo (conversão de tempo em profundidade).

Para gerar os modelos geológico-geofísicos e geotécnicos-geofísicos, deve-se realizar coleta de dados geológicos/pedológicos da área de estudo.

Ademais, cabe ressaltar que o estudo e aplicação das melhores práticas e ferramentas metodológicas para a solução de problemas de engenharia relacionadas a delimitação de interferências subterrâneas ocasionadas por alvos de infraestrutura urbana está em consonância com o Projeto de Implantação do Sítio de Investigação Geofísica, Geotecnia e Meio-Ambiente (SIGGMA). Portanto, torna-se imprescindível a instalação do Sítio Experimental no Campus Caçapava do Sul, visto que será possível simular problemas de natureza técnico-científica, sob condições controladas e em escala real, fomentando dessa forma o desenvolvimento de novos projetos e aplicações que poderão ser testadas, validadas e suas respostas calibradas.

REFERÊNCIAS

- ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar Workshop Notes**. Sensors; Software, Inc. Internal Report, Canadá, p.130, 2001.
- ARANHA, P. R. **Apostila de Georadar - v.8**. Departamento de Geologia, Instituto de Geociências. Belo Horizonte. 2011.
- BENEDETTO, A.; PAJEWSKI, L.** Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar. **Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, 2015**.
- BORGES, W.R.** Investigação Geofísica na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se *GPR* e eletroresistividade. **2002. 60 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002**.
- BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2007. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BORGES, W. R. Notas de aula. Arquivos PPT, Geofísica Aplicada, IG/UnB. 2013
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2021.
- DA SILVA NUNES, J. G., e UAGODA, R. (2020). Análise da eficiência dos métodos indiretos para o mapeamento de solos frente às técnicas diretas, e suas possíveis associações: Uma revisão metodológica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(02), 487-509.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting** 37, p. 531-555, 1989.
- DIAS, G. A. N.; FILHO, P. C. T. A Utilização do Método Radar de Penetração no Solo (*GPR*) para Localização de Tubulações. **Sociedade Brasileira de Geofísica**. p.4. 2012.
- GANDOLFO, O. C. B. Ensaio Geofísicos. Revista Notícias da Construção. 2012
- GOOGLE EARTH. *Software* disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2021.
- GOLDEN SOFTWARE. Surfer version 14: Surface Mapping System. Colorado, USA: Golden Software.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2021.
- JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2009.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de texto, 2009.

KELLER, G. V. **Rock and mineral properties, physical laws, electromagnetic induction and rock properties**. *Eletromag. Meth. Appl. Geophys. Theory* 1, p.13-48, 1987.

LAGO, A. L., BORGES, W. R., BARROS, J. S., e DE SOUSA AMARAL, E. (2022). *GPR application for the characterization of sinkholes in Teresina, Brazil*. ***Environmental Earth Sciences***, 81(4), 1-15.

LEITE, D. N.; PORSANI, J. L. Comparação entre Diferentes Arranjos de Antenas *GPR* para Mapear Manilhas de Concreto Instaladas no SCGR do IAG/USP. **Sociedade Brasileira de Geofísica**. Salvador, p. 6, 2009.

MATOS Jr, O. S. **Modelagem e Levantamento GPR em Estruturas de Concreto com Antena de 400 MHz**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

Modelo ALOS PALSAR. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2021.//

NARDI, L. V. S.; BITENCOURT, M. F. Geologia, Petrologia e Geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**. 1989. 153-169p.

OLHOEFT, G.R. Maximizing the information return from ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, Vol. 43, p.175-187. 2000

PIRES, P. J. M.; ARARUNA Jr, J. T. Identificação de interferências em grandes extensões por meio de *GPR* com georreferenciamento simultâneo do levantamento. **Sociedade Brasileira de Geofísica**. Salvador, p. 4, 2012.

POLUHA, B. **Mapeamento GPR 2D/3D de Interferências Enterradas no SCGR-II do IAG: Aplicações no Planejamento Urbano**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico-Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado – SP**. 1999. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro, São Paulo, 1999.

PORSANI, J. L., ELIS, V. R., FERREIRA, A. A., BARBOSA, M. T. V., e SAUTCHUK, C. A. Projeto-182. Avaliação de Métodos Geofísicos (*GPR* e ER) para Localização de Interferências no Subsolo Urbano. Ciclo: 2013/2014.

QGIS. *Free Software. Open Source Geospatial Foundation* versão 2.18.14.

REFLEXW, Software. Sandmeier Geophysical Research. 2014.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. 2. ed., John Wiley e Sons, 2011.

RUY, Y. B. *Uso do GPR para Mapear Interferências no Subsolo Urbano em Apoio à Construção do Túnel do Metrô de São Paulo: Estudo de Caso sob o Edifício Copan.* **Sociedade Brasileira de Geofísica.** Salvador, p. 5, 2012.

SANTOS, V. R. N. **Emprego dos Métodos Eletromagnéticos Indutivo e GPR no Mapeamento de Redes de Interferências Instaladas no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP.** 2009. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TANIYAMA, M. M. Y. **Desenvolvimento de Metodologia de Processamento de Dados GPR para Caracterização de Vazamento em Tubulação da Rede de Distribuição de Água em Via Urbana.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

TELFORD, W. M; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**, 2. ed. New Work: Cambridge University Press, 1990.

TONG, L. T. Application of Ground Penetrating Radar to Locate Underground Pipes. **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences.** v. 4, n. 2, p. 171-178, 1993.

UTSI, E. C. **Ground Penetrating Radar: Theory and Practice.** Elsevier Science, 2017.