



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

LOCALIZAÇÃO DE DUTOS
ENTERRADOS COM GPR
EMPREGANDO AFASTAMENTOS
FONTE-RECEPTOR CONSTANTE

RONALD RAMOS ALVES

SALVADOR – BAHIA
DEZEMBRO – 2014

**Localização de dutos enterrados com GPR empregando afastamentos
fonte-receptor constante**

por

RONALD RAMOS ALVES

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

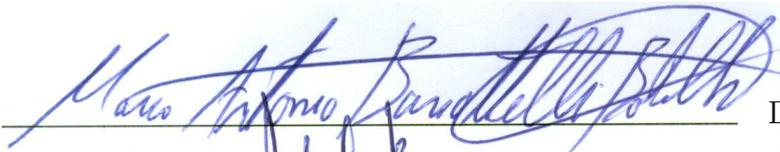
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

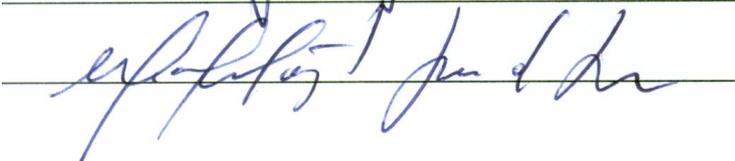
Comissão Examinadora



Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho



Dr. Michael Heimer



Me. Michelângelo Gomes da Silva

Data da aprovação: 22/12/2014

Dedico à minha mãe.

RESUMO

O Radar de Penetração no Solo (GPR) é uma técnica geofísica não invasiva que utiliza ondas eletromagnéticas para a investigação da subsuperfície. Nos últimos 15-20 anos, este campo cresceu rapidamente e verificou-se um grande progresso no desenvolvimento da teoria, técnica, tecnologia e abrangência das aplicações. Sendo assim, o GPR tornou-se um valioso método utilizado por cientistas, pesquisadores, engenheiros, consultores e estudantes universitários em muitas situações. Por exemplo, no campo da engenharia geotécnica, uma das aplicações é detectar e inferir a profundidade de dutos e tubulações enterradas.

Além disso, as aplicações do GPR incluem estudos de contaminação de água subterrânea, sedimentologia, glaciologia e arqueologia. Não obstante, o rápido desenvolvimento alcançado pelo método GPR tem inspirado novas áreas interdisciplinares de pesquisa tanto na academia quanto na indústria.

Este trabalho tem por objetivo principal determinar a presença e inferir a profundidade de tubos em subsuperfície a partir da interpretação de radargramas gerados com afastamento constante entre as antenas. Utilizando a técnica de ajuste hiperbólico das difrações gerou-se um campo de velocidade $V(x, t)$, o qual foi interpretado para migrar e ou converter em profundidade as seções de radar registradas em tempo, com a finalidade de definir a geometria da subsuperfície. Assim, a partir da utilização de diferentes arranjos de antenas, pôde-se investigar e analisar a qualidade das respostas (radargramas) em termos do número de dutos detectados. A interpretação da presença de tubos também foi realizada sobre seções de GPR migradas, nas quais o campo de velocidades aplicado na migração pôde ser testado pelo colapso das hipérbolas de difração. Um segundo objetivo desta pesquisa é comparar os resultados obtidos sobre a profundidade dos tubos com os diferentes equipamentos de GPR, com os resultados fornecidos pelo método PCM, muito utilizado na geotecnia, e ainda, comparar os resultados sobre a velocidade de propagação do pulso eletromagnético, usando o método de ajuste das hipérbolas e o da migração das hipérbolas para reduzi-las ao ponto de difração, ou seja, o próprio tubo.

Com a finalidade de alcançar tais objetivos, o capítulo 1 traz uma visão geral sobre o método GPR, faz uma breve contextualização histórica e cita alguns pontos sobre o desenvolvimento atual da técnica. Já no capítulo 2, aprofunda-se um pouco mais nos princípios físicos envolvidos, mostra-se o comportamento ondulatório dos campos eletromagnéticos, fala-se sobre a metodologia de levantamento e sobre as etapas básicas e avançadas do processamento de dados de GPR. Além disso, mostra-se os principais conceitos sobre o método

PCM. Finalmente, o capítulo 3 descreve a execução das atividades, a aquisição dos dados, o processamento, a análise e a interpretação dos dados obtidos às margens do Rio Quiricó.

ABSTRACT

The Ground Penetrating Radar (GPR) is a non-invasive geophysical technique that uses electromagnetic waves to investigate the subsurface. Over the past 15-20 years this field has grown rapidly and there has been great progress in the development of theory, technique, technology and range of applications. Thus, the GPR has become a valuable method used by scientists, researchers, engineers, consultants and college students in many situations. For example, in the field of geotechnical engineering a applications is to detect and infer the depth of buried pipelines.

Moreover, applications include studies of GPR groundwater contamination, sedimentology, glaciology and archeology. However, the rapid development reached by the GPR method has inspired new interdisciplinary areas of research both in academy and in industry.

This work has as main objective to determine the presence and infer the depth of pipes in the subsurface from the interpretation of radargrams generated with leave constant the distance between the antennas. Using the hyperbolic adjustment technique of diffraction was generated one velocity field $V(x, t)$ which has been interpreted to migrate and/or convert to depth radar sections recorded in time to define the geometry of the subsurface. Thus, from the use of different arrangements of antennas, we could investigate and analyze the quality of answers (radargrams) in terms of the number of detected pipes. The interpretation of the presence of tubes was also performed on GPR migrated sections, in which the velocity field applied to the migration can be tested by the collapse of the diffraction hyperbole. A second objective of this research is to compare the results obtained to the depth of the GPR tubes with different equipment, with the results provided by the PCM method, widely used in geotechnical, and also compare the results on the propagation velocity of the electromagnetic pulse, using the adjustment method of hyperbole and the migration of hyperbole to reduce them to diffraction spot, namely the tube itself.

In order to achieve these objectives, Chapter 1 provides an overview of the GPR method, makes a brief historical background and quotes some points on the development current art. Already chapter 2 delves a bit more on the principles physical involved, shows the wave behavior of electromagnetic fields, speaks on the survey methodology and on basic and advanced stages of processing GPR data. In addition, it shows the main concepts of the method of PCM. Finally, Chapter 3 describes the implementation of activities, data acquisition, processing, analysis and interpretation of data obtained on the Quirico River.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 O Radar de Penetração no Solo (GPR)	3
1.1 Visão Geral	3
1.2 Breve Histórico	5
1.3 Dias Atuais	11
CAPÍTULO 2 Fundamentação Teórica	12
2.1 Princípios Básicos	12
2.2 Natureza Ondulatória dos Campos Eletromagnéticos	14
2.3 Metodologia de Levantamento	17
2.3.1 Técnicas de aquisição de dados	17
2.3.2 Parâmetros de aquisição de dados	20
2.4 Processamento dos Dados	22
2.4.1 Edição dos dados/traços	23
2.4.2 Filtro Dewow	23
2.4.3 Correção do tempo zero	23
2.4.4 Filtragem	24
2.4.5 Análise de velocidade e conversão da seção em profundidade	25
2.4.6 Ganhos	26
2.4.7 Migração	28
2.5 O Método PCM	29
2.5.1 Princípios	29
2.5.2 Modos de Aplicação	30
2.5.3 Equipamento PCM	32

CAPÍTULO 3	Resultados e Discussões	34
3.1	Execução das Atividades	34
3.2	Aquisição dos Dados	34
3.3	Processamento, Análise e Interpretação dos Dados	37
3.3.1	GPR Ramac I	37
3.3.2	GPR Easy Locator	62
3.3.3	Método PCM	68
3.3.4	Comparações entre os resultados	71
CAPÍTULO 4	Conclusões	78
Agradecimentos		80
Referências		81

ÍNDICE DE TABELAS

3.1	Tabela que mostra a localização dos dutos com a profundidade e a distância ao início do perfil.	47
3.2	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1a.	57
3.3	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2a.	57
3.4	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3a.	58
3.5	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4a.	58
3.6	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5a.	59
3.7	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1.	59
3.8	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2.	60
3.9	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3.	60
3.10	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4.	61
3.11	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5.	61
3.12	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1a.	62
3.13	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2a.	63
3.14	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3a.	63
3.15	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4a.	64
3.16	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5a.	64
3.17	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1.	65
3.18	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2.	65
3.19	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3.	66
3.20	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4.	66
3.21	Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5.	67
3.22	Profundidade dos dutos no lado do acesso, com o método PCM.	69
3.23	Profundidade dos dutos no lado oposto ao acesso, com o método PCM. . . .	70
3.24	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	71
3.25	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	71
3.26	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	71
3.27	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	72
3.28	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	72
3.29	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	72
3.30	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	72
3.31	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	73
3.32	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	73
3.33	Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos. .	73

3.34	Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo colapso das hipérboles de difração com a migração.	74
3.35	Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo colapso das hipérboles de difração com a migração.	75
3.36	Velocidade média em cada perfil.	75
3.37	Velocidade média em cada perfil.	75
3.38	Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo ajuste das hipérboles de difração.	76
3.39	Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo ajuste das hipérboles de difração.	76
3.40	Velocidade média em cada perfil.	76
3.41	Velocidade média em cada perfil.	77

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Constituintes básicos de um sistema de GPR (Reynolds, 1997).	4
1.2	Experimento realizado durante a missão Apollo 17 sobre propriedades elétricas da subsuperfície lunar. Utilizou-se um receptor com 3 componentes vetoriais e uma antena dipolar multi-frequência com dois eixos (Annan, 2003).	7
1.3	Sistema de GPR sendo utilizado para sondar potenciais rotas de tubulações no Ártico canadense (Annan, 2003).	8
1.4	Carrinho de GPR desenvolvido por Noggin da Sensors & Software Inc. (Annan, 2003).	10
2.1	Relação entre os vetores ortogonais \bar{E} , \bar{B} e \bar{k} . Note ainda que os vetores \hat{u} , \hat{v} e \hat{k} são ortogonais e unitários (isto é, ortonormais).	15
2.2	Em ambientes com baixas perdas, os campos EMs se propagam com uma velocidade finita e com decaimento de amplitude com mínima alteração na forma do pulso (Annan, 2009).	16
2.3	Principais técnicas de aquisição de dados de GPR.	17
2.4	Exemplo de uma família CMP.	19
2.5	Modos de orientação das antenas de radar (Annan e Cosway, 1992).	21
2.6	Fluxograma útil na fase de avaliação das etapas necessárias do processamento dos dados.	22
2.7	Exemplo de variações no tempo zero em uma seção obtida com uma antena de 450 MHz (Jol, 2009).	24
2.8	Um exemplo de adaptação de hipérboles de difração para análise de velocidade. Dados de GPR usando uma antena de 200 MHz.	25
2.9	Radargrama referente à seção mostrada na Figura 2.8 convertida em profundidade.	26
2.10	Radargrama referente a uma seção de GPR sem aplicação de ganho.	26
2.11	Radargrama referente a uma seção de GPR com aplicação de ganho exponencial de 2 db/m.	27
2.12	Radargrama referente a uma seção de GPR com aplicação de ganho exponencial de 3 db/m.	27
2.13	Radargrama referente a uma seção de GPR não migrada.	28
2.14	Radargrama referente à seção da Figura 2.13 migrada.	28
2.15	Campo magnético (B) produzido em torno do corpo condutor.	30
2.16	Modos de aplicação do método PCM.	31

2.17	Esquema gráfico de detecção de dutos (modo de localização).	31
2.18	Esquema gráfico de identificação de falhas em dutos (modo A-Frame).	32
2.19	Módulo Transmissor do PCM.	32
2.20	Módulo Receptor do PCM (Pipe Locator).	33
3.1	Foto do Rio Quiricó.	35
3.2	Croqui da área estudada.	35
3.3	Foto do sistema Ramac sendo puxado sobre o terreno usando uma separação de 60 cm entre as antenas de 200 MHz.	36
3.4	Foto do novo sistema Easy Locator HDR (High Dynamic Range) da Mala Geoscience.	36
3.5	Equipamento PCM, modelo RD 8.000 (Radiodetection).	36
3.6	Radargrama correspondente ao perfil 1 no qual é possível a identificação de 2 dutos (50% de acerto).	38
3.7	Radargrama correspondente ao perfil 3a no qual é possível a identificação de 4 dutos (100% de acerto).	39
3.8	Radargrama correspondente ao perfil 4a sem a aplicação de nenhuma etapa de processamento aos dados.	40
3.9	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição dos dados.	40
3.10	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição dos dados e filtro Dewow.	41
3.11	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow e correção do tempo zero.	41
3.12	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz) e filtro de remoção de background.	42
3.13	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-100 MHz) e filtro de remoção de background.	42
3.14	Ajuste de curvas hiperbólicas sobre eventos de difração para análise de velocidade.	43
3.15	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background e conversão em profundidade.	43
3.16	Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background e conversão em profundidade.	44

3.17 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background e conversão em profundidade (sem ganho).	45
3.18 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho exponencial de 2 db/m.	45
3.19 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho exponencial de 3 db/m.	46
3.20 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho linear.	46
3.21 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho linear.	47
3.22 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho exponencial de 2 db/m.	48
3.23 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,09675 m/ns.	49
3.24 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,09675 m/ns.	50
3.25 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,113 m/ns.	51

3.26 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,113 m/ns.	51
3.27 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,12 m/ns.	52
3.28 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,073 m/ns.	53
3.29 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,11 m/ns.	54
3.30 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,087 m/ns.	54
3.31 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de todas as etapas anteriores e migração com velocidade constante de 0,1 m/ns.	55
3.32 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de todas as etapas anteriores e migração com velocidade constante de 0,092 m/ns.	55
3.33 Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de todas as etapas anteriores e migração com velocidade constante de 0,09675 m/ns.	55
3.34 Fluxograma utilizado no processamento dos dados.	56
3.35 Perfil 1a processado (v=0,085 m/ns).	57
3.36 Perfil 2a processado (v=0,083 m/ns).	57
3.37 Perfil 3a processado (v=0,093 m/ns).	58
3.38 Perfil 4a processado (v=0,093 m/ns).	58
3.39 Perfil 5a processado (v=0,105 m/ns).	59
3.40 Perfil 1 processado (v=0,075 m/ns).	59
3.41 Perfil 2 processado (v=0,078 m/ns).	60

3.42	Perfil 3 processado ($v=0,074$ m/ns).	60
3.43	Perfil 4 processado ($v=0,091$ m/ns).	61
3.44	Perfil 5 processado ($v=0,084$ m/ns).	61
3.45	Perfil 1a processado pelo Easy Locator.	62
3.46	Perfil 2a processado pelo Easy Locator.	63
3.47	Perfil 3a processado pelo Easy Locator.	63
3.48	Perfil 4a processado pelo Easy Locator.	64
3.49	Perfil 5a processado pelo Easy Locator.	64
3.50	Perfil 1 processado pelo Easy Locator.	65
3.51	Perfil 2 processado pelo Easy Locator.	65
3.52	Perfil 3 processado pelo Easy Locator.	66
3.53	Perfil 4 processado pelo Easy Locator.	66
3.54	Perfil 5 processado pelo Easy Locator.	67
3.55	Exemplo ilustrativo do modo de localização com PCM (pipe locator).	68
3.56	Exemplo de indicação de localização e profundidade no visor do PCM.	69

INTRODUÇÃO

O tópico GPR passou de não muito mencionado nos textos em geofísica há pouco mais de uma década para se tornar o foco de centenas de artigos de pesquisas e assunto especial em jornais dedicados ao assunto. A explosão de literatura dedicada à teoria, tecnologia e aplicações do GPR nos proporciona uma ampla possibilidade de revisar e sintetizar os conteúdos de uma área específica deste tema tão envolvente. Por exemplo, o GPR pode ser utilizado em aplicações ambientais que incluem tópicos relacionados com solos, turfa e biomonitoramento (Doolittle and Butnor, 2009), fontes de água (Slater and Comas, 2009), e mapeamento de contaminantes (Redman, 2009).

Podemos pensar nas aplicações relevantes ao campo das Ciências da Terra que incluem tópicos como dunas de areia em ambiente eólico (Bristow, 2009), ambientes costeiros (Buynevich et al., 2009), sedimentologia fluvial (Bridge, 2009), e geleiras e placas de gelo (Arcone, 2009). O GPR também pode ser usado em aplicações na engenharia e em interesses da sociedade em geral, tais como transportes (Saarenketo, 2009), detecção de minas (Yarovoy, 2009) e arqueologia (Goodman et al., 2009). Sendo assim, para se alcançar um conhecimento satisfatório, é necessário iniciar os estudos focalizando nos aspectos fundamentais do GPR, incluindo os princípios eletromagnéticos do GPR (Annan, 2009), propriedades elétricas e magnéticas de rochas, solos e fluidos (Cassidy, 2009), sistemas e designer (Koppenjan, 2009), antenas (Daniels, 2009), e processamento, modelagem e análise de dados (Cassidy, 2009).

As aplicações do GPR podem ser agrupadas em duas linhas de pesquisa, as quais se diferenciam com base nas frequências principais das antenas empregadas. A primeira linha de pesquisa é constituída pelas aplicações geológicas, através das quais são usadas antenas com frequências menores ou iguais a 500 MHz. Nestes casos, a profundidade de penetração tende a ser mais importante que a resolução. A segunda linha refere-se às aplicações de engenharia, nas quais são usadas antenas com frequências a partir de 500 MHz, tipicamente 900 MHz ou 1 GHz.

Atualmente, o Radar de Penetração no Solo é uma técnica geofísica bem aceita e desenvolvida. Em suas concepções iniciais, o GPR foi aplicado em materiais geológicos, mas hoje em dia é bem aplicado numa grande diversidade de materiais tais como madeira, concreto e asfalto. Entre as diversas vantagens desta técnica podemos citar o seu custo relativamente baixo, a sua alta precisão, rapidez, produção de perfis com comprimentos variando desde centímetros a quilômetros e por tratar-se de um método não destrutivo.

O primeiro uso dos sinais eletromagnéticos (EMs) para localizar objetos enterrados é

atribuído a Hulsmeyer em uma patente alemã de 1904, mas a primeira descrição publicada de tais investigações é dada por Leimbach and Lowy (1910), também em patentes alemãs. Os sistemas usados nestas investigações empregaram transmissão de ondas contínuas. Hulsenbeck (1926), desenvolveu o primeiro uso do radar com pulsos para investigar a natureza de feições em subsuperfície.

Esta ideia de se utilizar ondas de rádio para investigar a subsuperfície foi contemplada por décadas anteriores aos resultados obtidos durante os anos 1950 (El Said, 1956), (Waite and Schmidt, 1961). A demonstração de Waite and Schmidt (1961) em sondagens aéreas de placas de gelo possibilitou a utilização dessas ondas em muitos locais em torno do mundo. A partir deste ponto, aconteceu uma transição gradual dos conceitos para sondagens em solos e rochas, que iniciou na década de 1960 e continua desde então.

Existe uma diversidade muito grande de aplicações de GPR, entre as quais ainda podemos citar a determinação da densidade do Permafrost (Annan and Davis, 1976); a descoberta de fraturas em rochas de sal (Theirbach, 1974); investigação de estratigrafia (Bristow and Jol, 2003); hidrogeologia (Rubin and Hubbard, 2005); investigações arqueológicas (Bevan and Kenyon, 1975). Exemplos na engenharia civil e de outras aplicações geológicas também foram descritos (Darracott and Lake, 1981), (Leggo and Leech, 1983), (Ulriksen, 1982), (Davis and Annan, 1989), (Doolittle, 1987).

A história sobre o desenvolvimento do GPR é rica em contribuições, podendo citar até o aperfeiçoamento do método pelo Exército dos Estados Unidos da América (USA) durante a guerra do Vietnã, cujo principal foco de aplicação foi a localização dos labirintos de túneis construídos no subsolo, que eram utilizados pelos soldados vietnamitas. Após a guerra do Vietnã, em 1972, a empresa americana Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) começou a vender os primeiros sistemas comerciais de GPR. Atualmente outras empresas fabricam e comercializam sistemas de GPR. Entre as mais consagradas estão a sueca Mala Geoscience, a canadense PulseEKKO (Sensors & Software Inc.) e a italiana IDS (Ingegneria dei Sistemi).

CAPÍTULO 1

O Radar de Penetração no Solo (GPR)

1.1 Visão Geral

A palavra radar é um acrônimo para “**R**adio **D**etection and **R**anging”. O Radar de Penetração no Solo (**G**round **P**enetrating **R**adar - GPR) é uma técnica geofísica relativamente nova. Na última década, os avanços na tecnologia dos equipamentos proporcionaram uma grande maturação deste método, que já se encontra com o status de técnica geofísica com a maior quantidade de aplicações nas diversas áreas. Em suas concepções iniciais, o GPR foi aplicado a materiais geológicos naturais, como por exemplo, o gelo, sendo atualmente aplicado em outros meios tais como madeira, concreto e asfalto.

O GPR usa ondas eletromagnéticas para sondar materiais com baixas perdas dielétricas e, com isso, detectar estruturas e variações nas propriedades dos materiais (Davis and Annan, 1989). Mais comumente, as medidas com o GPR são obtidas dispondo-se as antenas transmissora e receptora em uma geometria fixa, que então são movidas sobre a superfície do terreno para detectar reflexões oriundas da subsuperfície. Em algumas aplicações, a transiluminação do volume sob investigação é mais usual.

A técnica do radar penetrante no solo (GPR) é similar ao princípio da reflexão sísmica e à técnica do sonar. O radar produz pequenos pulsos de energia eletromagnética de alta frequência (10-1000 MHz), a qual é transmitida ao solo. A propagação do sinal de GPR depende das propriedades elétricas do solo sob altas frequências, principalmente da condutividade elétrica e da permissividade dielétrica.

Um sistema de GPR inclui um gerador de sinal e antenas receptora e transmissora, assim como um receptor que pode ou não ter disco rígido ou saída gráfica. Alguns sistemas avançados têm um computador conectado, o qual facilita o processamento dos dados enquanto se está adquirindo os dados no campo, e após o seu registro.

Os constituintes básicos de um sistema de GPR são mostrados na Figura 1.1. No sistema de radar, a antena transmissora (Tx) gera um trem de onda, o qual se propaga afastando-se num feixe cônico. Estas ondas viajam com uma velocidade muito alta (300.000 km/s ou 0,3 m/ns no ar - velocidade da luz). O tempo de viagem destas ondas desde o momento de sua

transmissão até o seu subsequente retorno à antena receptora (Rx) é da ordem de algumas dezenas a milhares de nanossegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ segundos). Isto exige uma instrumentação muito boa para medir o instante da transmissão com bastante precisão, necessário para que no final, o tempo de viagem das ondas seja medido com uma boa acurácia.

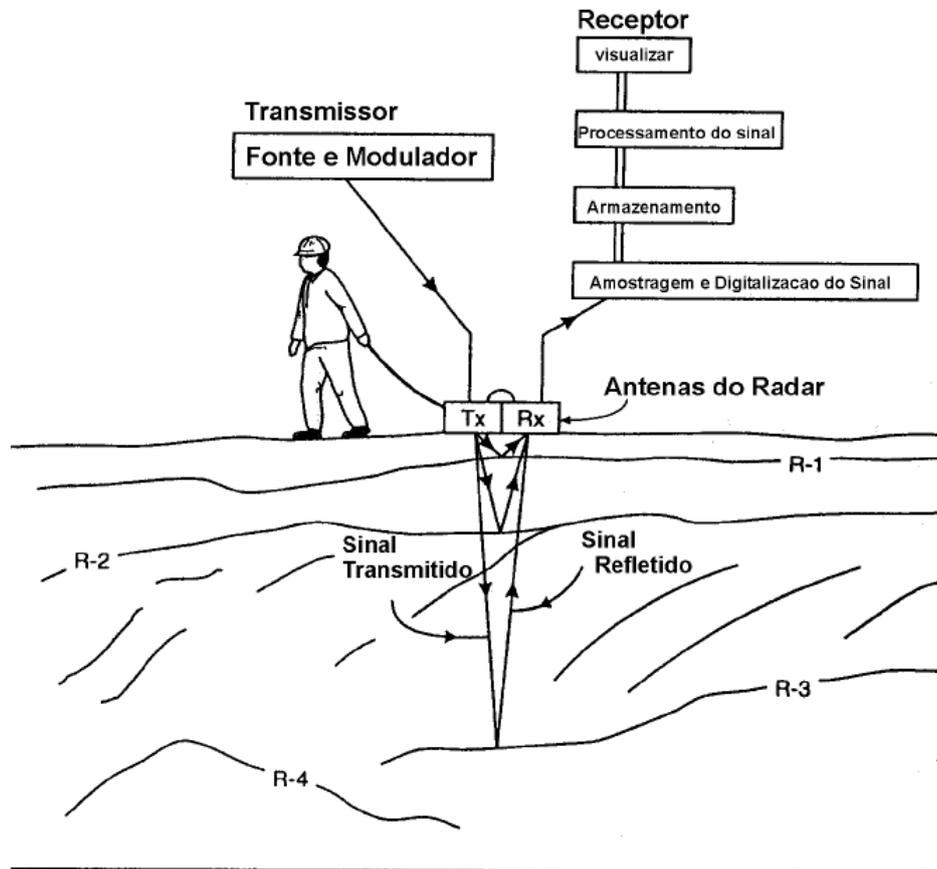


Figura 1.1: Constituintes básicos de um sistema de GPR (Reynolds, 1997).

As antenas podem ser usadas nos modos monoestático ou biestático. O modo monoestático usa a antena como transmissor e receptor, já o modo biestático usa duas antenas separadas, uma servindo como transmissor e a outra como receptor. Há casos específicos (como em medidas de reflexão e refração de grande abertura angular - WARR) em que o modo biestático é vantajoso em relação ao modo monoestático.

A antena é movida sobre o solo e os sinais recebidos são exibidos como uma função do tempo duplo de viagem da onda, isto é, o tempo levado do momento da transmissão ao momento da detecção no receptor. Estes sinais são apresentados na forma de um radargrama, que é uma exibição análoga a uma seção sísmica (sismograma).

A duração do pulso transmitido deve ser pequena o bastante (tipicamente 20 ns, dependendo da frequência e do tipo da antena) para prover uma maior resolução das reflexões.

Então, é importante que a forma e as características da onda transmitida sejam determináveis e altamente repetitivas. A maneira com que os sinais registrados são exibidos em um registrador gráfico, por exemplo, é determinada pelo operador. Sinais com amplitude maior do que o ponto fixo inicial são impressos de preto na seção de radar. Em alguns casos, pode ser muito interessante imprimir as amplitudes positivas e negativas, enquanto em outros, apenas as amplitudes positivas ou as negativas. Exibições também podem ser em termos de área variável ou traço simples (da mesma maneira que na exibição de dados sísmicos). Comumente, a gravação digital em sistemas mais sofisticados exibem as amplitudes dos sinais de acordo com uma escala cinzenta ou em uma palheta de cores; por exemplo, no caso da escala cinzenta, as reflexões mais fortes podem ser impressas pelas cores mais escuras.

Vale salientar que a assinatura da fonte consiste em mais de um comprimento de onda e pode ter uma forma complexa (parte real e imaginária). O solo também afeta a forma e a duração do pulso emitido e assim a forma da onda de qualquer reflexão é igualmente complexa, pois se tem um pulso de larga duração, devido a atenuação dos componentes de alta frequência do sinal. O evento de reflexão consiste em vários impulsos, não somente um, e é imperativo que se tenha isto em mente durante a interpretação dos dados de GPR.

O sistema de medida deve ter uma escala dinâmica e sensibilidade suficiente para ser capaz de detectar as baixas energias associadas com os sinais de retorno, assim como deve produzir sinais claros adequados para a interpretação.

Enquanto as especificações do fabricante podem indicar a precisão das medidas do instrumento (por exemplo, ± 1 ns), isto não deve ser interpretado como sendo equivalente à capacidade de resolução do método.

1.2 Breve Histórico

Annan (2003) faz um bom sumário histórico sobre o GPR e, em Annan (2002), para os interessados numa compreensão mais aprofundada sobre o tema, pode-se encontrar uma revisão histórica mais detalhada. Além disso, outras referências importantes são citadas.

1900-1950

Durante este tempo, houve um grande esforço em pesquisas sobre propagação de ondas de rádio acima e ao longo da superfície da terra. Embora várias sugestões acerca da possibilidade da utilização de ondas de rádio para sondar a subsuperfície sejam mencionadas, não há relatórios que indicam sucesso neste tipo de medição. Muitos trabalhos foram publicados sobre o tema das comunicações e sobre o radar.

1950-1960

Neste período de tempo, tem-se o primeiro relato sobre a tentativa de medir as características da subsuperfície a partir de sinais de ondas de rádio. El Said (1956) tentou utilizar a interferência entre os sinais transmitidos diretamente pelo ar e os sinais refletidos a partir do nível freático para imagear a profundidade de um lençol freático.

A próxima observação relatada sobre a sondagem de materiais geológicos a partir de ondas de rádio surgiu quando a USAF relatou erros de altímetros que eram utilizados para auxiliar no pouso de aeronaves sobre gelo na Groenlândia (Waite and Schmidt, 1961). Esta foi a primeira vez que indicações repetidas de penetração das ondas de rádio através de materiais de ocorrência natural foi registrada. Isso gerou uma era de pesquisas focadas no desenvolvimento da ecossondagem no gelo.

1960-1970

A maioria da atividade durante este intervalo envolveu a ecossondagem no gelo. Grupos, como o Scott Polar Research Institute em Cambridge e Geophysical and Polar Research Center na Universidade de Wisconsin, foram ativos nas regiões polares e também em geleiras.

Além disso, aplicações em outros materiais geológicos favoráveis começaram a ser exploradas. Cook (1973) explorou o uso em minas de carvão, pois o carvão pode ser um material com baixas perdas dielétricas em alguns casos. Por razões semelhantes, Holser et al. (1972), Theirbach (1974) e Unterberger (1978) iniciaram avaliações em depósitos subterrâneos de sal. Este período também foi o início do planejamento da missão científica lunar para o programa Apollo. Vários experimentos foram concebidos para examinar a subsuperfície lunar, que se acreditava ter caráter elétrico semelhante ao do gelo. O trabalho de Annan (1973) relata sobre alguns destes desenvolvimentos.

1970-1975

Este período viu inúmeros avanços. O programa de exploração lunar Apollo 17 envolveu as propriedades elétricas da subsuperfície conforme o experimento da Figura 1.2, que usou conceitos de interferometria semelhantes ao trabalho realizado por El Said (1956), enquanto os trabalhos realizados a partir da órbita lunar utilizavam um radar de pulso semelhante às sondagens de gelo (Ward et al., 1972), (Simmons et al., 1973).

Durante o mesmo período, Morey e outros formaram a Geophysical Survey Systems Inc., que passou a fabricar e vender radares de penetração no solo (Morey, 1974).

Além disso, uma melhor compreensão das propriedades elétricas de materiais geológicos



Figura 1.2: Experimento realizado durante a missão Apollo 17 sobre propriedades elétricas da subsuperfície lunar. Utilizou-se um receptor com 3 componentes vetoriais e uma antena dipolar multi-frequência com dois eixos (Annan, 2003).

submetidos às ondas de rádio começou a tornar-se disponível. Trabalhos como o apresentado por Olhoeft (1975) levaram a uma melhor compreensão do caráter elétrico de materiais geológicos de ocorrência natural e da relação entre a condutividade elétrica e a polarização dielétrica destes materiais.

1975-1980

Durante este período, as aplicações começaram a crescer por causa da disponibilidade de tecnologia e uma melhor compreensão da geologia envolvida. O Serviço Geológico do Canadá explorou uma série de aplicações, sendo que a principal delas forneceu uma melhor compreensão do terreno Permafrost no Ártico canadense. Um sistema de GPR em funcionamento é mostrado na Figura 1.3. Propostas para implantação de tubulações para transportar petróleo e gás para os mercados do Sul eram um grande desafio de engenharia em ambientes e solos congelados. O GPR era uma ferramenta que oferecia grandes promessas e alguns dos resultados iniciais foram relatados por Annan and Davis (1976).

Neste período, o efeito da dispersão das ondas de rádio nos glaciais temperados ficou melhor compreendida. O impacto do espalhamento da energia e a necessidade de radares com frequência mais baixa foi relatado por Watts and England (1976). Experimentos com GPR foram notificados pelo Instituto de Pesquisa de Stanford, onde as medições foram feitas por Dolphin et al. (1978) para aplicações arqueológicas.

Extenso trabalho foi realizado em minas de potássio no oeste do Canadá. Estes resultados foram relatados por Annan et al. (1988). Outros desenvolvimentos em mina de carvão foram relatados por Coon et al. (1981).



Figura 1.3: Sistema de GPR sendo utilizado para sondar potenciais rotas de tubulações no Ártico canadense (Annan, 2003).

Além disso, o potencial para o uso do radar em poços para a investigação da qualidade de rochas cristalinas como reservatório de resíduos nucleares tornou-se um tema de interesse. O Serviço Geológico do Canadá e de Energia Atômica do Canadá apoiou este trabalho (Davis and Annan, 1986).

Instrumentos comerciais foram usados para a maior parte destes trabalhos e o número cada vez maior de atividades gerou um novo interesse comercial. Geophysical Survey Systems Inc. permaneceu como o único fornecedor neste momento, mas Ensco/Xadar indicou a possibilidade de criar um produto comercial alternativo. Um grande problema observado pelo Serviço Geológico do Canadá foi a dificuldade em utilizar os equipamentos existentes em áreas remotas. O equipamento era pesado, volumoso e consumia muita energia. Adicionalmente, surgiu a necessidade da digitalização dos dados para que fosse possível explorar o processamento sísmico digital que avançava rapidamente no campo da sísmica de petróleo.

1980-1985

O otimismo inicial devido ao avanço tecnológico deu lugar à realidade de que em muitos ambientes a aplicação do GPR não era favorável. Houve certa confusão neste período, como por exemplo, falhas causadas pelo clima ou por respostas naturais dos ambientes foram associadas à falhas nos equipamentos. Adicionalmente, poucos recursos foram direcionados ao desenvolvimento da tecnologia.

A corporação OYO, do Japão, desenvolveu um radar chamado de Georadar em associação com a Xadar. Este instrumento obteve algum sucesso comercial na Europa. A-Cubed Inc. foi fundada em 1981 no Canadá e iniciou o desenvolvimento de radares de penetração no solo. O desenvolvimento de radares digitais operando a baixas frequências foi relatado por Davis et al. (1985). Este desenvolvimento da tecnologia levou à série pulseEKKO de radares.

Outras aplicações para GPR, tais como investigações em rodovias tiveram certo sucesso. Em geral, a tecnologia era muito nova e não otimizada para essas aplicações. Um trabalho apresentado por Ulriksen (1982) forneceu uma boa base para algumas destas aplicações. Muitos desenvolvimentos não comerciais ocorreram com protótipos que conduziam ideias como a portabilidade, a gravação digital e a utilização de cabos de fibra ótica.

Outros trabalhos menores foram conduzidos pelo Southwest Research e pelo Exército dos EUA em poços para detectar áreas com túneis em regiões militarizadas (Owen, 1981).

1985-1990

Os pontos fortes e fracos do GPR foram se tornando mais compreendidos e problemas reais criaram uma demanda para o mapeamento em alta resolução (Geofísica Rasa). A Agência de Proteção Ambiental dos EUA instituiu várias iniciativas para investigar e limpar terrenos contaminados (Benson et al., 1984). O GPR se mostrou como uma ferramenta natural no mapeamento de alta resolução do subsolo e como resultado uma forte tendência comercial começou a aparecer.

Além disso, muitas das aplicações anteriores eram continuamente exploradas e apareceram produtos comerciais com frequências mais baixas e com gravação digital completa. Surgiram outras aplicações, tais como a classificação de solos para fins agrícolas (Doolittle and Asmussen, 1992). Uma adaptação de uma modelagem sísmica 1-dimensional ocorreu neste período (Annan and Chua, 1992).

Em 1988, Sensors & Software Inc. foi gerada a partir de A-Cubed Inc. e começou a comercialização da tecnologia pulseEKKO.

1990-1995

A verdadeira explosão no avanço do GPR ocorreu durante este período. Muitos grupos em todo o mundo tornaram-se interessados nesta tecnologia.

No lado comercial, Geophysical Survey Systems Inc. alcançou um forte sucesso e foi comprada por OYO Corporation. Durante este período, Mala Geoscience foi gerada a partir das raízes da Swedish Geological Survey. ERA, no Reino Unido, também se tornou mais ativa usando suas pesquisas sobre explosivos não detonados e detecção de minas terrestres para criar produtos comerciais. Sensors & Software Inc. cresceu rapidamente ampliando sua linha de produtos pulseEKKO.

No lado das pesquisas, muita atenção começou a ser dedicada nas comunidades de geofísica e engenharia elétrica. Ocorreram desenvolvimentos nas áreas de aquisição de dados multi-cobertura (Fisher et al., 1992a), de processamento de dados digitais (Maijala, 1992),

(Gerlitz et al., 1993), e simulação numérica 2D (Zeng et al., 1995). Início de simulação numérica 3-dimensional foi relatado por Roberts and Daniels (1996). Avanços nas aplicações arqueológicas (Goodman, 1994), ambientais (Brewster and Annan, 1994), estratigráficas (Jol, 1996) e em muitas outras áreas.

Encontros dos usuários de GPR tornaram-se mais formalizados e ocorreram a cada dois anos em vários locais em todo o mundo. Estes encontros proporcionaram um ambiente para que os pesquisadores pudessem apresentar resultados e discutir problemas.

1995-2000

Neste período, a evolução dos computadores impulsionou todos os avanços do GPR. Modelagem numérica de problemas completos em 3D tornou-se mais robusta embora ainda com grandes computadores (Holliger and Bergmann, 2000), (Lampe and Holliger, 2000). A capacidade de gerenciar os grandes volumes de informação em formato digital e manipulá-los rapidamente se tornou rotina. Como resultado, a aquisição de dados em grades para fazer mapas e gerar visualizações em 3D tornou-se prática (Grasmueck, 1996), (Annan et al., 1997). O mercado comercial e a procura resultou em uma variedade de sistemas diferentes e mais simples, por exemplo, o carrinho desenvolvido por Noggin da Sensors & Software Inc. (Figura 1.4).



Figura 1.4: Carrinho de GPR desenvolvido por Noggin da Sensors & Software Inc. (Annan, 2003).

1.3 Dias Atuais

Atualmente, o GPR é um método bem estabelecido. Grupos de pesquisa com boa compreensão sobre a física básica estão desenvolvendo ferramentas de modelagem e aumentando a capacidade de análise dos dados. Muitos trabalhos ainda são necessários na medição das propriedades elétricas dos materiais. Propriedades elétricas de misturas, em geral, são bem entendidos, mas as complexidades e interações em casos específicos ainda são temas de pesquisa. O poder de processamento digital já ultrapassa a capacidade atual para fazer uso dele. Como resultado, o desenvolvimento de softwares e algoritmos de processamento para explorar a capacidade disponível dos computadores causará um avanço rápido na manipulação dos dados para atender às necessidades das diversas aplicações.

A instrumentação agora é estável e confiável. Entretanto, projetar antenas com uma grande largura de banda e eletrônicos para trabalharem em estreita proximidade com um meio dielétrico com perdas variáveis não é um exercício trivial de engenharia e só agora os produtos estão se tornando estáveis, confiáveis e reproduzíveis. Mesmo agora, a amplitude dos dados de GPR não está muito bem controlada, mas com a evolução dos instrumentos este tipo de informação está se tornando mais confiável. Contudo, historicamente, o tempo de viagem foi a parte mais utilizada do registro dos sinais de GPR.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Princípios Básicos

Os fundamentos do GPR estão assentados sobre a teoria eletromagnética (EM), sendo assim, entender estes conceitos é de grande importância para se trabalhar quantitativamente com a técnica. As **equações de Maxwell** descrevem matematicamente a física dos campos EMs, ao passo que as **relações constitutivas** quantificam as propriedades dos materiais. E a combinação delas fornece as bases para se trabalhar quantitativamente com os sinais de GPR.

Em termos matemáticos, os campos EM relacionam-se através das equações de Maxwell:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.4)$$

em que \bar{E} é o vetor intensidade do campo elétrico (V/m), q é a densidade de carga elétrica (C/m^3), \bar{B} é o vetor densidade de fluxo magnético (T), \bar{J} é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m^2), \bar{D} é vetor de deslocamento elétrico (C/m^2), t é o tempo (s), e \bar{H} é a intensidade do campo magnético (A/m).

Maxwell resumiu o trabalho de inúmeros pesquisadores nesta forma compacta. A partir dessas relações, todos os conceitos eletromagnéticos clássicos (indução, ondas de rádio, resistividade, teoria de circuitos, etc.) podem ser demonstrados, quando combinados com o formalismo apropriado e, com isso, é possível caracterizar as propriedades elétricas dos materiais.

As relações constitutivas são os meios de descrever as respostas dos materiais aos campos eletromagnéticos. No caso do GPR, as propriedades elétricas e magnéticas têm muita importância. As **equações constitutivas** são:

$$\bar{J} = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad (2.5)$$

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon} \bar{E} \quad (2.6)$$

$$\bar{B} = \tilde{\mu} \bar{H} \quad (2.7)$$

Estas equações fornecem uma descrição macroscópica (ou comportamento médio) de como os elétrons, átomos e moléculas respondem *en masse* à aplicação dos campos eletromagnéticos. A condutividade elétrica $\tilde{\sigma}$ caracteriza o movimento de cargas livres (criando corrente elétrica) quando um campo elétrico está presente. A resistência ao fluxo de cargas leva à dissipação de energia. Por sua vez, a permissividade dielétrica $\tilde{\epsilon}$ caracteriza o deslocamento de cargas ligadas na estrutura do material sobre a presença de um campo elétrico. E o deslocamento dessas cargas resulta em armazenamento de energia no material. Finalmente, a permeabilidade magnética $\tilde{\mu}$ descreve quão intrínseca é a resposta dos momentos magnéticos atômicos e moleculares à atuação de um campo magnético. Normalmente, a distorção dos momentos magnéticos intrínsecos causa armazenamento de energia nos materiais.

$\tilde{\sigma}$, $\tilde{\epsilon}$ e $\tilde{\mu}$ são quantidades tensoriais e também podem não ter um comportamento linear (isto é, $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(E)$). Entretanto, na maioria das aplicações práticas de GPR, a resposta é considerada como sendo na mesma direção que o campo atuante e é independente da intensidade do campo (embora estas suposições raramente sejam totalmente satisfeitas). Além disso, também é assumido que as grandezas $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\epsilon}$ e $\tilde{\mu}$ são constantes escalares (reescrevendo σ , ϵ e μ) e isto implica que σ e ϵ são as mais importantes.

A permissividade dielétrica é uma grandeza importante para o GPR e muitas vezes define-se o termo permissividade relativa ou *constante dielétrica*:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

em que $\epsilon_0 = 8,89 \times 10^{-12} F/m$ é a permissividade do vácuo.

O radar de penetração no solo é mais útil em materiais com baixas perdas elétricas. Sendo assim, supondo $\sigma = 0$, o GPR teria eficiência máxima, uma vez que os sinais penetrariam em profundidades maiores. Entretanto, na prática, as condições de baixas perdas elétricas não são predominantes. Ambientes ricos em argila ou áreas de água subterrânea salina podem criar condições onde a penetração do sinal de GPR é muito limitada.

Deve-se considerar também que os materiais da Terra são, invariavelmente, compostos de muitos outros materiais ou componentes. A água e o gelo representam os poucos casos em que um único componente está presente. Só para se ter uma ideia, a areia da praia é uma mistura de grãos de solo (tipicamente 60-80% do volume), ar, água e íons dissolvidos em água. Assim, a compreensão das propriedades físicas das misturas é um fator essencial para a interpretação de uma resposta do GPR.

Embora o assunto das misturas seja complexo, na faixa de frequência mais utilizada pelo GPR (10-1000 MHz), a presença ou a ausência de água é que vai ditar o comportamento geral das respostas. Com isso, seguem algumas considerações importantes:

- Minerais soltos e agregados em misturas geralmente são bons dielétricos. Eles têm tipicamente uma permissividade na faixa de 3-8 (dependendo da mineralogia e compactação) e são normalmente isolantes com condutividade virtualmente igual a zero.
- Solos, rochas e materiais de construção têm espaço vazio entre os grãos (poros) disponíveis para serem preenchidos com ar, água ou outro material.
- A água é o material de ocorrência natural mais polarizável, isto é, possui alta permissividade $k \approx 80$.
- A água nos espaços porosos normalmente contém íons, e a condutividade elétrica associada à mobilidade desses íons é muitas vezes o fator dominante na determinação da condutividade elétrica dos materiais. Como resultado, solos e rochas apresentam condutividades tipicamente na faixa de 1-1000 mS/m .
- Como a água é invariavelmente presente nos poros dos materiais de ocorrência natural, exceto em situações únicas onde algum mecanismo assegura a total ausência de água, ela tem um efeito dominante sobre as propriedades elétricas.

Equações desenvolvidas empiricamente tais como as relações de Topp (Topp et al., 1980) e variações da Lei de Archie (Archie, 1942) têm demonstrado há muito tempo a relação entre permissividade, condutividade elétrica e teor volumétrico de água para solos.

2.2 Natureza Ondulatória dos Campos Eletromagnéticos

O radar de penetração no solo explora o caráter ondulatório dos campos eletromagnéticos. As equações de Maxwell (Equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4) descrevem um conjunto acoplado formado pelos campos elétrico e magnético quando estes campos variam com o tempo. Dependendo da magnitude relativa entre a quantidade de energia perdida (associada à condutividade) com a quantidade armazenada (associada à permissividade e à permeabilidade), os campos

podem espalhar-se ou propagar-se como ondas. A utilização do GPR é viável quando as condições são tais que é possível uma propagação ondulatória dos campos EMs. Para tornar o caráter ondulatório mais evidente, basta reescrever as equações de Maxwell para eliminar ou o campo elétrico ou o campo magnético. Usando o campo elétrico \bar{E} , obtém-se a equação vetorial transversa da onda:

$$\bar{\nabla} \times \bar{\nabla} \times \bar{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.9)$$

Como já mencionado, o radar de penetração no solo é mais eficiente em materiais com baixas perdas elétricas nos quais a quantidade de energia dissipada (termo $\mu\sigma$) é menor quando comparada com a quantidade de energia armazenada (termo $\mu\epsilon$).

As soluções da equação transversa da onda são chamadas de *soluções de ondas planas* das equações de Maxwell. Tais soluções assumem a forma:

$$\bar{E} = f(\bar{r} \cdot \bar{k}, t) \hat{u} \quad (2.10)$$

em que \bar{r} é um vetor que descreve a posição espacial e $f(\bar{r} \cdot \bar{k}, t)$ satisfaz a *equação escalar da onda*

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (2.11)$$

em que $\beta = \bar{r} \cdot \bar{k}$ é a distância na direção de propagação e a relação entre os vetores \bar{E} (campo elétrico), \bar{B} (campo magnético) e \bar{k} (direção de propagação do campo eletromagnético) é mostrada na Figura 2.1.

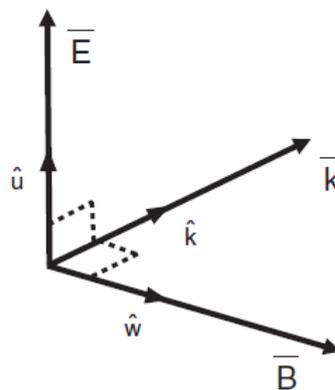


Figura 2.1: Relação entre os vetores ortogonais \bar{E} , \bar{B} e \bar{k} . Note ainda que os vetores \hat{u}, \hat{w} e \hat{k} são ortogonais e unitários (isto é, ortonormais).

Ignorando as perdas, isto é, fazendo $\sigma = 0$, a equação 2.11 se reduz a

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (2.12)$$

a qual tem solução na forma

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) \quad (2.13)$$

em que

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2.14)$$

é a velocidade da onda.

Por outro lado, supondo condições com baixas perdas, as soluções da equação 2.11 assumem a forma

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt) e^{\pm \alpha \beta} \quad (2.15)$$

em que

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.16)$$

são a velocidade e a atenuação, respectivamente. Pode-se pensar nesta solução como uma aproximação obtida através da perturbação da solução da onda quando $\sigma = 0$. A natureza ondulatória é indicada pelo fato de que a distribuição espacial dos campos é transladada na direção β entre os tempos de observação, conforme ilustrado na Figura 2.2.

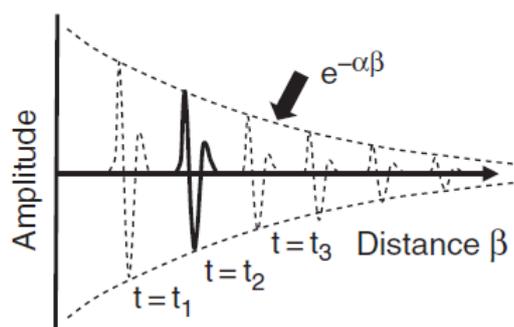


Figura 2.2: Em ambientes com baixas perdas, os campos EMs se propagam com uma velocidade finita e com decaimento de amplitude com mínima alteração na forma do pulso (Annan, 2009).

2.3 Metodologia de Levantamento

Antes de realizar a aquisição de dados de GPR deve ser feito um planejamento, onde observa-se a profundidade do alvo, geologia local, contraste das propriedades elétricas dos materiais, atenuação do sinal, topografia, logística e fontes de ruídos.

2.3.1 Técnicas de aquisição de dados

A aquisição dos dados de GPR pode ser feita a partir de quatro modos, exibidos na Figura 2.3: perfil de reflexão com afastamento constante, reflexão e refração de grande abertura angular ou *wide angle reflection and refraction* (WARR), ponto médio comum ou *common midpoint* (CMP) e transiluminação ou tomografia.

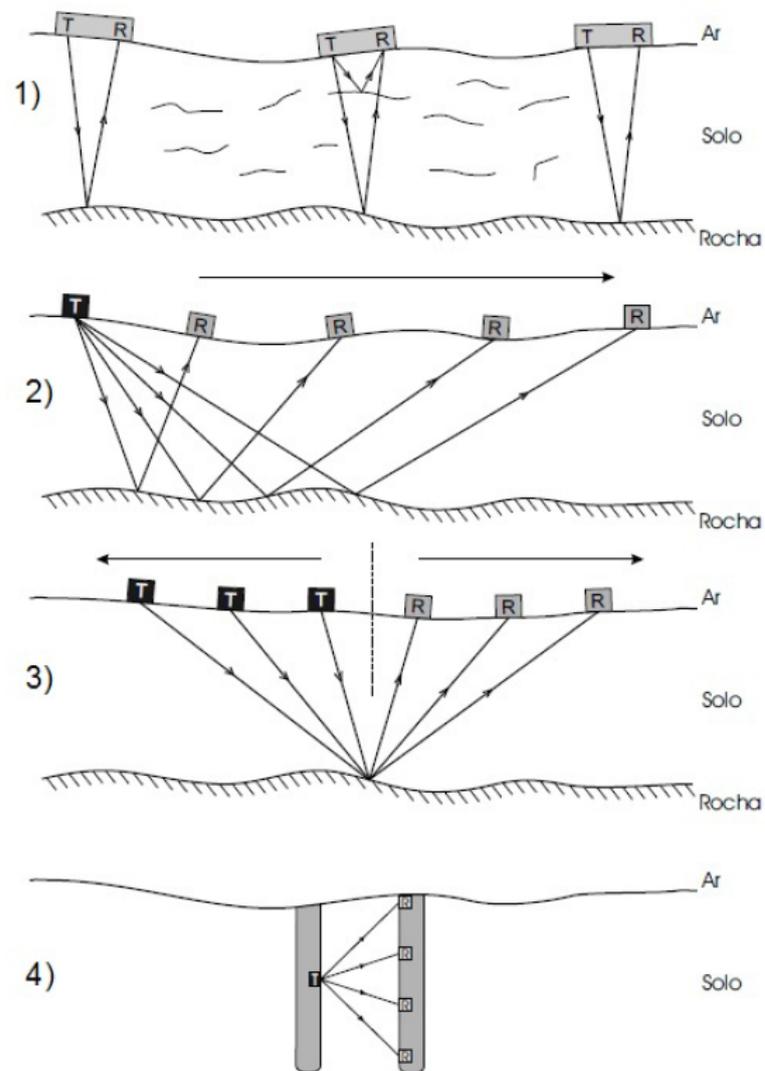


Figura 2.3: Principais técnicas de aquisição de dados de GPR.

1. Perfil de reflexão com afastamento constante

É o modo mais utilizado para realizar medidas com GPR. As antenas transmissora e receptora são mantidas a uma distância de separação fixa e são movidas na superfície. O resultado é um perfil de GPR onde no eixo vertical é mostrado o tempo duplo de viagem das ondas refletidas e no eixo horizontal são mostradas as posições das antenas no terreno. Como a separação entre as antenas é bastante pequena, normalmente as seções podem ser consideradas como zero-offset. As seções de radar que apresentem hipérbolos de difração permitem que se obtenha um modelo de velocidades baseado no número de hipérbolos, nos valores de velocidades oriundos do ajuste de tais hipérbolos e, finalmente, da interpolação destes valores.

2. Reflexão e refração de grande abertura angular (WARR)

Neste modo, uma das antenas permanece em uma localização fixa, enquanto a outra antena é afastada lateralmente. Para realizar este tipo de perfil devem existir refletores planos e horizontais ou com inclinação pequena. Este modo de aquisição é útil para estimar a variação da velocidade do sinal com a profundidade. Um conjunto de famílias WARR permite se obter famílias CMP e assim um campo de velocidades.

3. Perfil de ponto médio comum (CMP)

As antenas transmissora e receptora são afastadas simultaneamente em sentidos opostos na mesma direção do perfil, de forma que o ponto médio entre as antenas permaneça fixo. Este modo de aquisição é utilizado para estimar como a velocidade de propagação do sinal varia com a profundidade. A vantagem de realizar o CMP está em realizar uma análise de velocidade com maior precisão. Este procedimento requer a presença de refletores.

4. Transiluminação ou tomografia

Esta técnica é utilizada em poços, minas subterrâneas, cavernas, construção civil, inspeção de colunas de concreto e outras aplicações. As antenas transmissora e receptora são posicionadas em lados opostos do meio a ser investigado. Normalmente, uma antena é fixada em um lado de um pilar ou um poço, enquanto outra antena é movida no outro lado do pilar ou em outro poço. Com a transiluminação pode-se determinar a velocidade do sinal no meio e, se for possível medir a amplitude do sinal, é viável a determinação da atenuação da onda eletromagnética.

A informação de velocidade, ou melhor, do campo de velocidades, permite obter um modelo geométrico 2D da área estudada. A informação sobre a velocidade pode ser obtida pela técnica CMP. Vide Yilmaz (2001).

A Figura 2.4 mostra uma família CMP, na qual pode-se identificar os eventos: onda direta pelo ar ($v = 0,3 \text{ m/ns}$), a onda direta que corre pelo solo (ex.: $v_{solo} = 0,1-0,2 \text{ m/ns}$), e da onda refletida, a qual fornecerá a velocidade do pacote sedimentar sob análise.

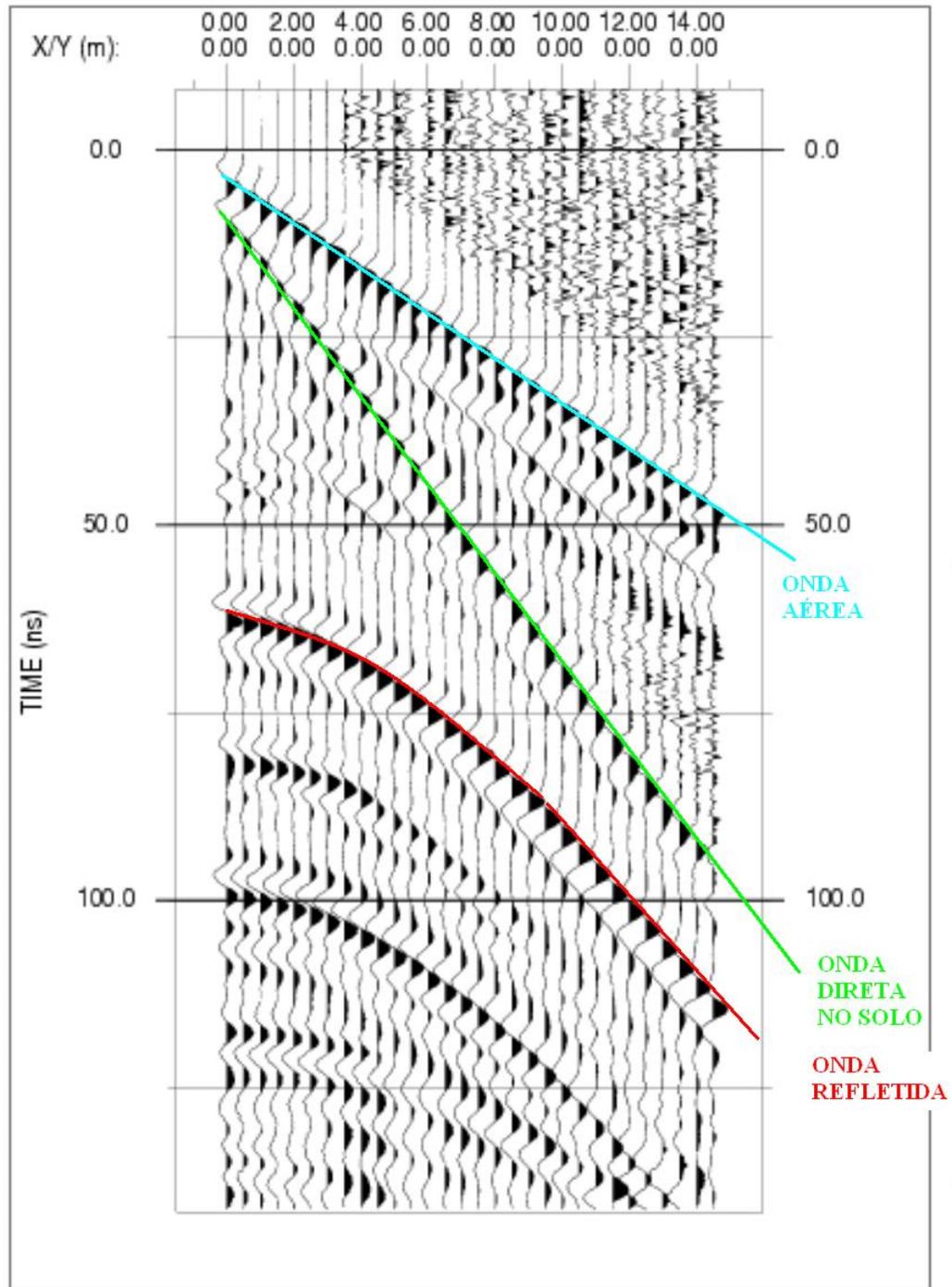


Figura 2.4: Exemplo de uma família CMP.

Outro procedimento é o estudo das curvaturas das hipérbolas presentes em uma seção de radar. Quanto mais hipérbolas presentes na seção, melhor a definição do campo de velocidades.

2.3.2 Parâmetros de aquisição de dados

Para a aquisição de dados, os parâmetros a seguir devem ser definidos:

1. Frequência da antena: é definido levando em consideração a profundidade de exploração e resolução requeridas. Quanto maior a frequência, menor é a profundidade de investigação e maior é a resolução.
2. Abertura da janela temporal (T_w): é o intervalo de tempo em que a janela de tempo deve ficar aberta para que o sinal seja transmitido, refletido e captado pela antena receptora. Para estimar a abertura da janela de tempo pode ser usada a expressão (Annan, 2001):

$$T_w = 1,3 \frac{2P_{max}}{V_{min}} \quad (2.17)$$

onde P_{max} é a profundidade máxima de investigação desejada e V_{min} é a velocidade mínima que pode ser encontrada na área do levantamento. A expressão acima aumenta o tempo estimado em 30% devido às incertezas da velocidade de propagação no meio e na profundidade de investigação.

3. Intervalo de amostragem temporal (Δt): é o intervalo entre pontos de amostragem do sinal gravado. Para não ocorrer uma falsa amostragem do sinal, deve ser obedecido o critério de amostragem de Nyquist, que é dado por:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_N} \quad (2.18)$$

onde Δt é o intervalo de amostragem e f_N é a frequência de Nyquist, que é a frequência mais alta que será gravada. Para o GPR, é mais apropriado utilizar o intervalo de amostragem sendo (Annan, 2001):

$$\Delta t = \frac{1}{6f_c} \quad (2.19)$$

onde f_c é a frequência central da antena.

4. Amostragem espacial (Δx): é o intervalo espacial entre as estações, ou seja, é o espaçamento entre os traços da seção de radar. Para evitar uma falsa amostragem, o intervalo

de amostragem espacial não deve exceder o intervalo de amostragem de Nyquist, que é um quarto do comprimento de onda no meio. Para o GPR, o intervalo de amostragem de Nyquist é dado por (Annan, 2001):

$$\Delta x = \frac{c}{4f_c\sqrt{K}} \quad (2.20)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, f_c é a frequência central da antena e K é a constante dielétrica do meio. Se o espaçamento entre as estações for maior do que o intervalo de amostragem de Nyquist, não será possível definir adequadamente refletores inclinados ou hipérbolos de difração.

5. Espaçamento entre as antenas: muitos sistemas utilizam antenas transmissora e receptora com separação fixa, dada pelo fabricante. Existem também sistemas de GPR que as antenas transmissora e receptora vêm separadas e pode ser mudado o espaçamento entre as antenas, permitindo assim realizar levantamentos CMP e WARR. Normalmente, em levantamentos de afastamento constante se utiliza o espaçamento igual ao comprimento da antena.
6. Orientação do perfil: geralmente os perfis são orientados perpendicularmente às estruturas em subsuperfície que se deseja imagear.
7. Orientação das antenas: na Figura 2.5 são mostradas várias formas de orientar as antenas de radar. Frequentemente é utilizada a configuração PR-BD, onde as antenas são orientadas perpendicularmente à direção do perfil. Se o objetivo do levantamento for a estratigrafia, a configuração ideal é a PR-BD, pois minimiza os efeitos de estruturas fora do plano do perfil. Para a detecção de objetos enterrados, a configuração PL-BD é a mais apropriada, pois apresenta maior área de recobrimento fora do plano do perfil, aumentando a probabilidade de atingir o alvo.

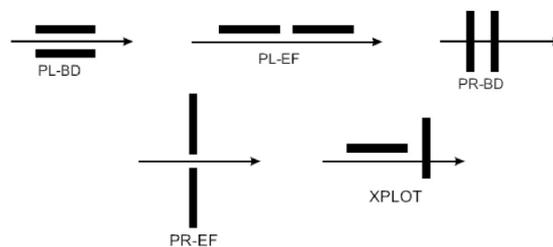


Figura 2.5: Modos de orientação das antenas de radar (Annan e Cosway, 1992).

2.4 Processamento dos Dados

Na fase de processamento dos dados, é importante que se fique atento às peculiaridades dos dados, a fim de se avaliar a necessidade ou não da aplicação de cada etapa de um fluxo básico/avançado de processamento. Assim, pelo menos, o processamento será consistente, eficiente e realista. Veja um fluxograma mostrado na Figura 2.6, que pode ser seguido durante a fase de avaliação das etapas necessárias do processamento dos dados.

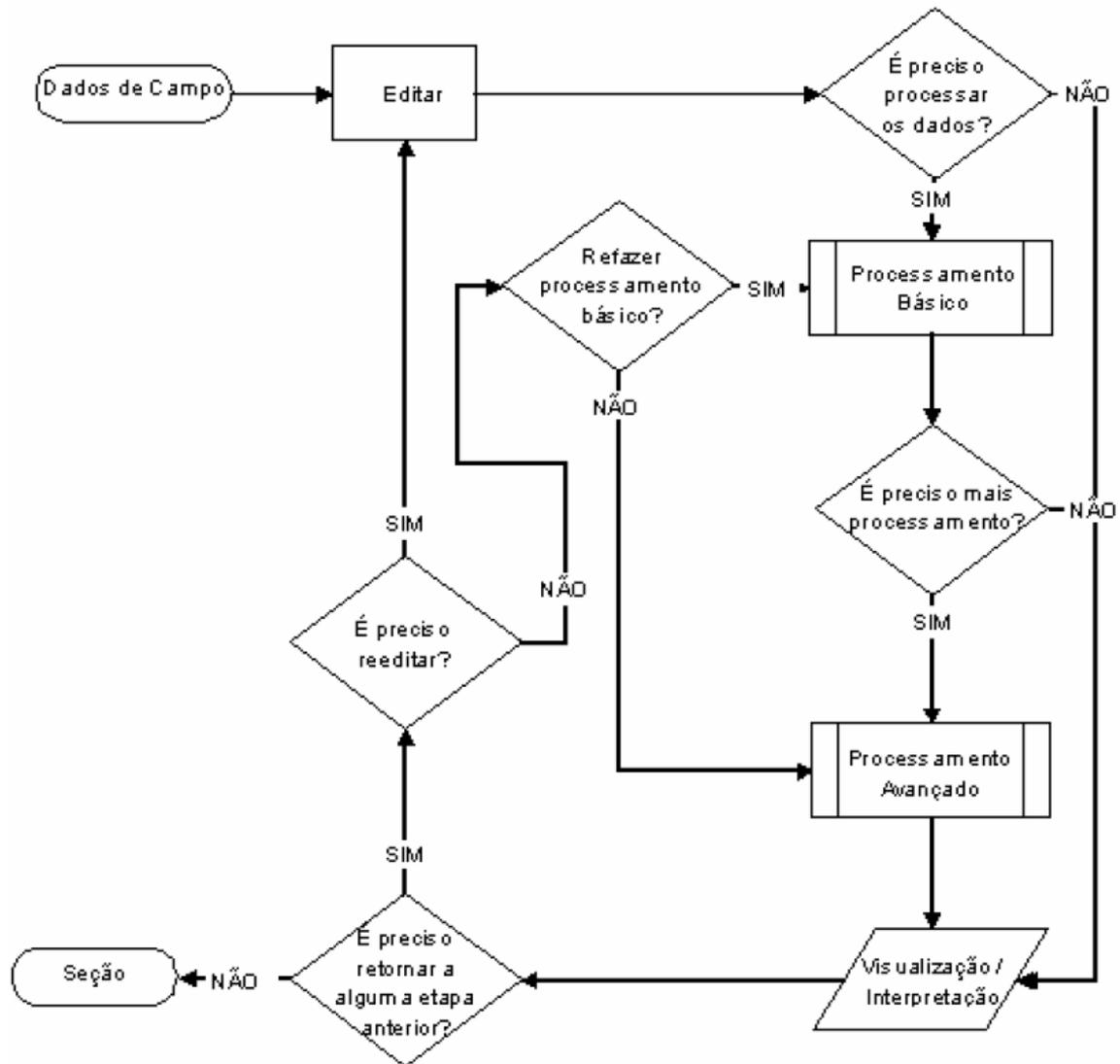


Figura 2.6: Fluxograma útil na fase de avaliação das etapas necessárias do processamento dos dados.

As etapas do processamento básico e avançado aplicadas aos dados são:

2.4.1 Edição dos dados/traços

A edição dos dados é a primeira e, muitas vezes, a mais demorada das tarefas em uma sequência de processamento, uma vez que os dados geralmente precisam de algum tipo de reorganização e, se estiver sendo processado um bloco 3D, de uma localização precisa. Esta etapa consiste na remoção e ou correção de dados incorretos/pobres na qualidade do sinal e triagem dos arquivos de dados. A manutenção eficaz dos dados desde o início é vital para uma interpretação de boa qualidade, especialmente com grandes volumes de dados. Os erros que inevitavelmente ocorrem em campo, podem significar que as seções precisam ser revertidas, combinadas, unidas ou sofrer outras manipulações. Um erro comum é a gravação incorreta dos parâmetros de levantamento (por exemplo, incremento espacial, intervalo entre as seções e posição de início). Isto pode resultar em erros nos cabeçalhos dos arquivos dos dados, que, por sua vez irão afetar a forma como os dados são importados para o programa de processamento.

2.4.2 Filtro Dewow

Esta é a remoção do componente DC do sinal inicial, ou polarização DC, e subsequente diminuição do evento “wow” (trem de onda com baixa frequência presente nos dados) (Dougherty et al., 1994). “Wow” é causado pela saturação do sinal gravado pelas chegadas dos eventos mais rápidos (ou seja, ondas que viajam pelo ar/terra) (Annan, 1993) e ou efeitos de acoplamento indutivo. Sendo assim, para uma efetiva correção, é necessário a aplicação de um filtro otimizado que elimine essa parcela de baixas frequências do sinal (Gerlitz et al., 1993). “Dewowing” é um passo vital já que reduz os dados a um nível de referência zero.

2.4.3 Correção do tempo zero

Deriva térmica, instabilidade eletrônica, diferenças nos comprimentos de cabos e variações do acoplamento entre as antenas e o solo podem causar “saltos” no tempo de chegada das primeiras ondas diretas pelo ar e pelo solo (geralmente definida como o ponto de tempo zero) (Olhoeft, 2000). Isto tem um efeito sobre a posição da interface ar/solo na seção, na sequência temporal dos eventos posteriores e no grau de paridade entre traços/seções adjacentes (Figura 2.7). Portanto, antes da aplicação de métodos de processamento mais avançados, exige-se um ajuste nos traços para que todos tenham a mesma posição de tempo zero.

Estas três etapas de processamento são o mínimo necessário para visualizar os dados de uma forma inteligível. Embora estas etapas do processamento tenham sido aplicadas, os dados ainda são considerados como muito “básicos” e outros métodos devem ser utilizados para melhorar a interpretação das seções.

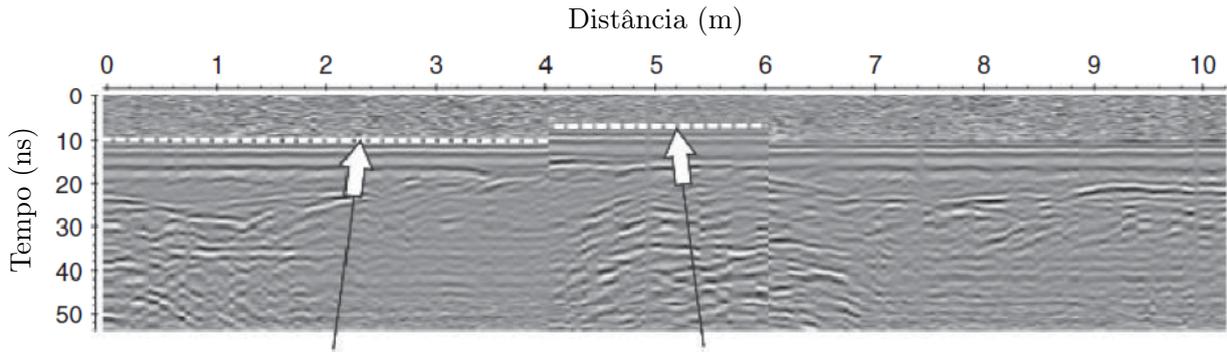


Figura 2.7: Exemplo de variações no tempo zero em uma seção obtida com uma antena de 450 MHz (Jol, 2009).

2.4.4 Filtragem

Os filtros são geralmente aplicados aos dados para remover ruídos antrópicos (isto é, induzidos pelo homem) ou ruídos de sistema e melhoram a qualidade visual dos dados. Por exemplo, a remoção de “manchas” devido às altas frequências de transmissões de rádio (Oloft, 2000) ou o efeito de listras devido às vibrações das antenas (Lehmann et al., 1996). Além disso, eles também são úteis na extração de aspectos particulares dos dados e, portanto, auxiliam na interpretação (por exemplo, enfatizando refletores plano-horizontais ou difrações - Annan, 1999; Gerlitz et al., 1993). Há muitos tipos de filtros, desde filtros mais simples, como o passa-banda, até filtros mais sofisticados no domínio do comprimento de onda. Filtros simples são muito efetivos na remoção de ruídos de baixa e alta frequência, ao passo que os mais sofisticados são adequados para problemas específicos (por exemplo, vibração excessiva de antenas ou picos de ruído - Malagodi et al., 1996; Annan, 1993). Em geral, os filtros podem ser classificados em dois tipos básicos: temporal (atuando individualmente nos traços em tempo) ou espaciais (através de um número de traços em distância). Muitas vezes, eles são combinados para produzir filtros 2D mais avançados que operam sobre os dados em tempo e espaço simultaneamente.

Existem muitos tipos de filtros temporais 1D, incluindo os passa-baixa e passa-alta, ou uma combinação deles que é o passa-banda (filtros no domínio da frequência). O passa-baixa deixa “passar” apenas as frequências mais baixas (bom para remover ruídos), enquanto o passa-alta deixa “passar” as frequências mais altas (bom para remover efeitos de deriva do sinal). Os filtros passa-banda são muito comuns e há uma grande variedade de tipos, cada um com características próprias que definem a forma da região que passará pelo filtro. Na prática, esses filtros temporais são bons apenas para a remoção de ruídos com frequências maiores ou menores do que a largura de banda do sinal principal de GPR e, como tal, estes filtros fazem uma “limpeza” e melhoram a visualização da seção. Uma boa regra é definir a região de passagem simetricamente ao redor do pico da frequência do sinal com uma largura

de banda que é igual a 1,5 vezes este valor central (por exemplo, para um pico de frequência de 400 MHz, a região de passagem deve ser, pelo menos, 100-700 MHz).

Os filtros espaciais operam bem com dados de boa qualidade e de baixa desordem (ambientes mais homogêneos) e, em geral, tendem a ser eficientes na eliminação da forte resposta da onda direta pelo ar/terra e dos efeitos causados pela vibração das antenas.

2.4.5 Análise de velocidade e conversão da seção em profundidade

Até agora, as etapas de processamento têm operado no domínio do tempo e os dados não foram relacionados diretamente com a profundidade. Sendo assim, com a finalidade de converter as seções em uma escala de profundidade, o que é necessário para interpretações realistas e aplicação de correções de topografia, uma estimativa precisa da velocidade média do subsolo deve ser obtida. Para isto, utiliza-se a técnica de levantamento com ponto médio comum (CMP) e ou estudo das curvaturas das hipérboles.

No processamento CMP, o procedimento geralmente toma a forma de uma análise de “semblance” (Yilmaz, 2001), onde o perfil de velocidade da subsuperfície é determinado automaticamente ou manualmente a partir da velocidade ideal de empilhamento. Já na análise de velocidade através das curvas hiperbólicas, faz-se coincidir as hipérboles de difração e ou reflexão observadas nos dados com hipérboles fornecidas pelo usuário através de uma função específica que combina a forma ideal da hipérbole observada com a velocidade respectiva. Um exemplo de adaptação de hipérboles de difração para análise de velocidade pode ser visto na Figura 2.8.

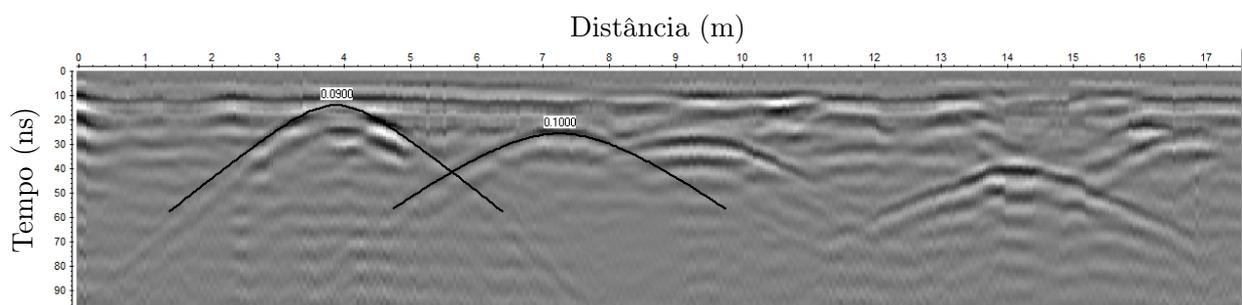


Figura 2.8: Um exemplo de adaptação de hipérboles de difração para análise de velocidade. Dados de GPR usando uma antena de 200 MHz.

Utilizando a velocidade média entre as duas velocidades encontradas através deste método, pode-se converter a seção em profundidade (Figura 2.9).

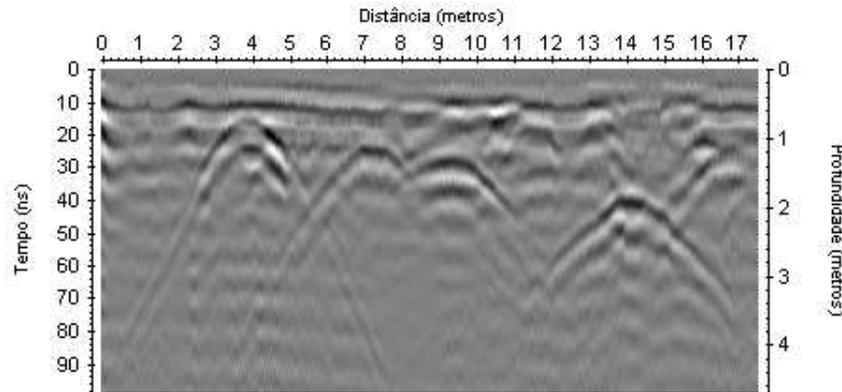


Figura 2.9: Radargrama referente à seção mostrada na Figura 2.8 convertida em profundidade.

2.4.6 Ganhos

Após a aplicação das etapas anteriores os dados estão em uma forma “processada”. Assim, pode-se aplicar os diversos tipos de ganhos para prosseguir com a interpretação e análise dos dados. Os ganhos melhoram a apresentação visual das seções de GPR e a maioria das técnicas alteram a estrutura dos dados de algum modo (ou seja, as amplitudes relativas e ou relações de fase são alteradas). Portanto, é importante que os efeitos de cada ganho sejam bem entendidos antes de serem aplicados e que os dados sejam tratados com cautela na interpretação (Annan, 1999). Os ganhos temporais devem realçar a aparência dos eventos que chegam mais tardiamente, isto é necessário devido ao efeito da atenuação do sinal e do espalhamento da energia graças à geometria da subsuperfície. Existem diferentes tipos de ganhos, por exemplo, o ganho constante, o ganho exponencial, SEC, AGC, cada um com a sua forma de atuar sobre os dados (aplicando algum fator de multiplicação para regiões sucessivas do traço no tempo). Um exemplo de como a aplicação de ganho altera a qualidade visual da seção pode ser visto nas Figuras 2.10 (sem ganho), 2.11 (com ganho de 2 db/m) e 2.12 (com ganho de 3 db/m).

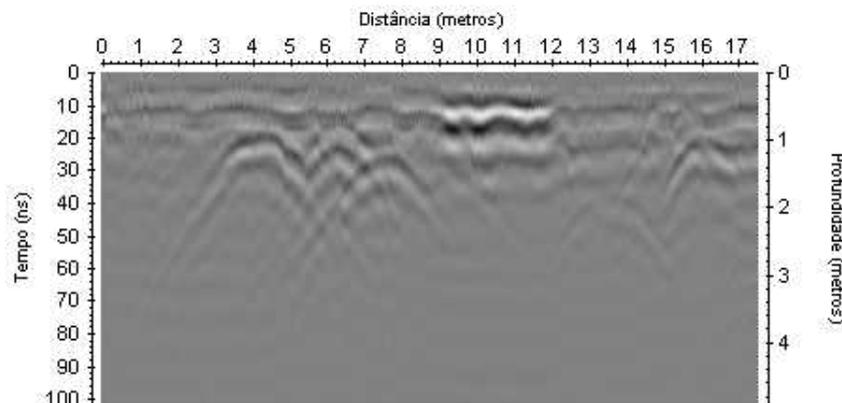


Figura 2.10: Radargrama referente a uma seção de GPR sem aplicação de ganho.

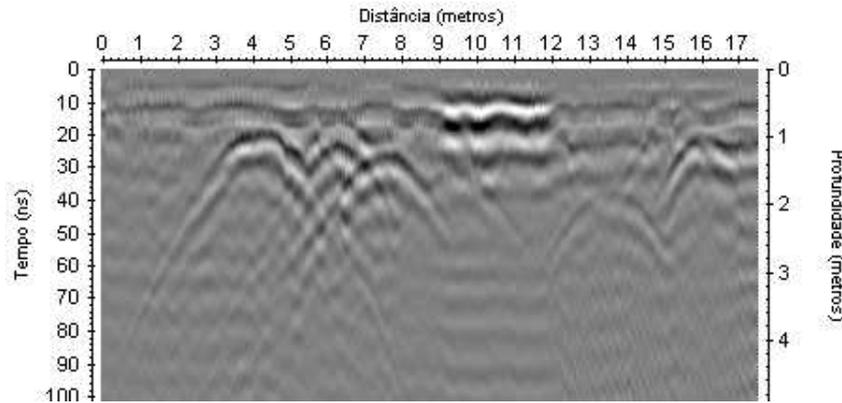


Figura 2.11: Radargrama referente a uma seção de GPR com aplicação de ganho exponencial de 2 db/m.

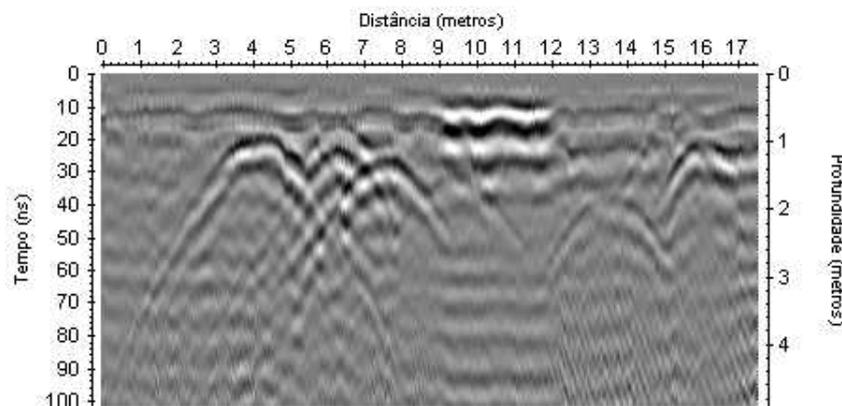


Figura 2.12: Radargrama referente a uma seção de GPR com aplicação de ganho exponencial de 3 db/m.

No entanto, a aplicação de um ganho efetivamente altera os dados e, em geral, tanto os sinais quanto os ruídos são amplificados em conjunto numa forma indiscriminada. Nota-se que no radargrama da Figura 2.12, houve uma grande amplificação dos ruídos com a aplicação do ganho exponencial de 3 db/m.

A capacidade de definir a função de ganho mais adequada aos dados é de valor inestimável tanto para a interpretação quanto para a publicação da seção final, mas fazer esta escolha pode ser demorado e trabalhoso. Em última análise, é uma escolha que deve ser feita entre as necessidades de interpretação e de tempo/custo, mas sempre vale a pena gastar um pouco de tempo testando diferentes ganhos para ajudar a melhorar a aparência das seções e, portanto, o processo interpretativo.

Neste ponto, a seção encontra-se numa forma adequada para o processo interpretativo. Os dutos serão identificados através das hipérbolas de difração presentes no radargrama. O fenômeno da difração provoca um espalhamento da energia em quinas com raios de curvatura l menor ou igual que o comprimento de onda λ ($l \leq \lambda$). Tal fenômeno vai aparecer na seção distribuído ao longo de um evento hiperbólico levando um refletor a ser interpretado com

uma dimensão num domínio maior do que a extensão física dos refletores correspondentes.

2.4.7 Migração

A última etapa do processamento dos dados de GPR é a migração. A migração é geralmente utilizada para melhorar a resolução da seção e para posicionar corretamente no espaço os refletores, assim, apresentando os verdadeiros mergulhos e profundidades. Pode-se citar algumas técnicas clássicas que têm sido utilizadas em aplicações de GPR. Exemplos incluem a migração reversa no tempo (RTM) (Botelho e Pestana, 1997), (Fisher et al., 1992a), (Fisher et al., 1992b), migração F-K (Fisher et al., 1994) e a migração Kirchhoff (Moran et al., 1998).

Embora cada método de migração possa empregar uma técnica numérica diferente, todos eles se baseiam na tentativa de “reconstruir” a seção de GPR em uma forma espacialmente mais precisa, utilizando um campo de velocidades da subsuperfície. Idealmente, as hipérboles de difração seriam colapsadas a uma fonte pontual, ou melhor, ao ponto difrator, que no caso deste estudo são os tubos enterrados (Figura 2.13 e Figura 2.14), bem como todos os refletores inclinados e curvos são reposicionados em suas corretas localizações.

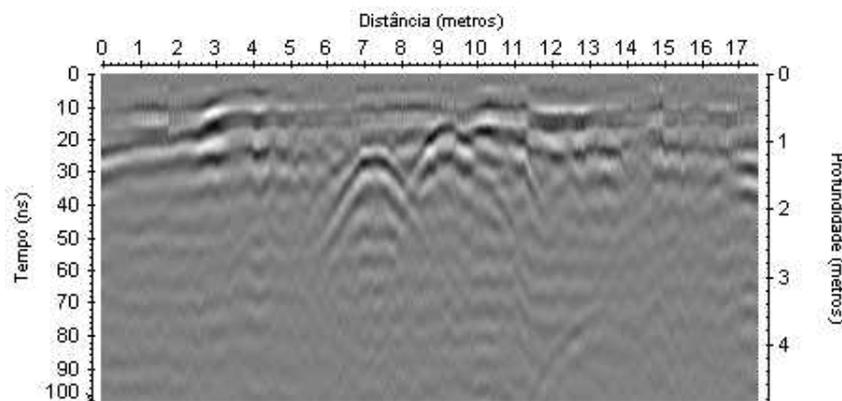


Figura 2.13: Radargrama referente a uma seção de GPR não migrada.

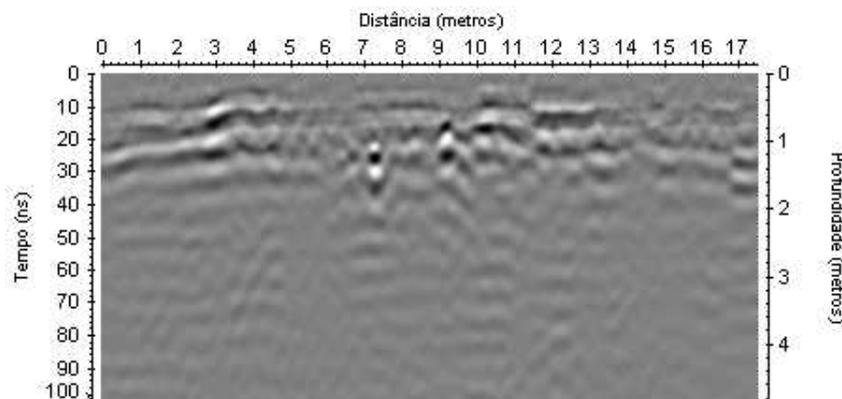


Figura 2.14: Radargrama referente à seção da Figura 2.13 migrada.

Infelizmente, os métodos de migração fazem suposições sobre o campo de velocidades do pulso de radar que são muitas vezes não correspondentes à realidade devido à complexidade e heterogeneidade da geologia da subsuperfície. Estas limitações podem ser generalizadas como se segue:

- O comportamento da velocidade do pulso eletromagnético no subsolo deve ser conhecido (ou estimado com precisão) e a estratigrafia é normalmente construída de camadas sem variação lateral de velocidade;
- A fonte é espacialmente uniforme e se propaga esfericamente (o mundo é isotrópico);
- As condições de campo distante são assumidas para a propagação de um campo escalar radial que se propaga uniformemente;
- Os dados são coletados considerando a incidência normal, ou antenas no modo monoestático, ou seja, não existe nenhuma separação entre as antenas;
- Não há dispersão ou atenuação - ou seja, os materiais são considerados sem perdas e têm propriedades independentes da frequência.

De todas estas, a suposição de que não existe variação lateral de velocidade é provavelmente a mais importante. Em ambientes homogêneos simples, esta suposição é razoavelmente válida e as seções serão migradas corretamente. No entanto, em ambientes complexos, a variação lateral de velocidade pode ser muito grande em escala de centímetros.

O sucesso da migração está relacionado diretamente com uma boa informação de velocidade e, portanto, a questão prática deve ser: “o que é um grau aceitável de erro de velocidade?” Na sísmica, e admitindo que estes resultados são verdadeiros para o GPR, erros de velocidade acima de 5-10% podem causar borrões, desfocagem das características dos alvos e o desalinhamento de refletores (Yilmaz, 2001). Se este erro for superior a 20%, então as seções migradas serão mais difíceis de interpretar do que as não migradas.

2.5 O Método PCM

2.5.1 Princípios

O método PCM (Pipeline Current Mapper) é um método indireto de investigação da subsuperfície, baseado nos princípios elétricos e eletromagnéticos relativos à propagação de corrente elétrica contínua e geração dos campos magnéticos. Esses princípios físicos indicam que todas as cargas elétricas, deslocando-se de forma contínua num corpo eletricamente condutivo, produzem campos magnéticos (Figura 2.15). Este fenômeno de campo magnético gerado por

uma corrente elétrica contínua é descrito pela Lei de Biot-Savart, a qual indica que as cargas pontuais em movimento produzem um campo magnético que depende da carga, velocidade e aceleração da partícula.

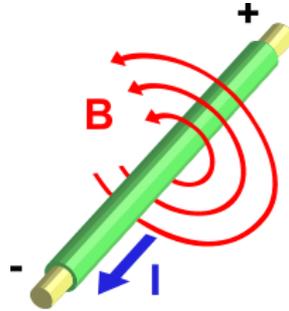


Figura 2.15: Campo magnético (B) produzido em torno do corpo condutor.

Assim, a corrente elétrica (I) que percorre um corpo condutor linear produz um campo magnético (B) em torno deste condutor, que no nosso caso se constitui no duto metálico a ser investigado, sendo que os campos magnéticos gerados formam círculos concêntricos (Figura 2.15) e suas intensidades diminuem com o aumento da distância ao condutor.

A direção do campo magnético em relação à extensão do corpo condutivo é determinada pela *regra da mão direita*, isto é, quando a corrente se move para a esquerda, o campo magnético aponta para cima, enquanto que à direita, aponta para baixo.

2.5.2 Modos de Aplicação

Em função dos princípios físicos já descritos, o método PCM pode executar levantamentos de duas maneiras, associadas a dois tipos de aplicação: **modo de localização**, para determinação do posicionamento e profundidade dos dutos, e **modo A-Frame**, para um completo diagnóstico do sistema de proteção catódica (Figura 2.16).

No modo de localização, o módulo transmissor de alta potência do sistema PCM aplica uma corrente elétrica de baixa frequência, normalmente 4 Hz, na Estação de Proteção Catódica (EPC) do duto para simular uma corrente elétrica contínua ao longo do mesmo, gerando, portanto, um campo magnético ao longo do corpo desta tubulação. Assim, o módulo receptor (*pipe locator*) pode localizar esse sinal característico emitido a uma distância de até 30 Km, indicando a magnitude do campo magnético (Figura 2.17) e a direção do sinal, definindo, assim, a posição e a profundidade da tubulação sem contato com o mesmo (método indireto).

Referente ao modo A-Frame, uma vez que o duto esteja localizado, pode ser efetuada uma avaliação de *perda de corrente elétrica* ao longo de seu trajeto. Desta forma, são realizadas medições contínuas relativas à magnitude da atenuação detectada ao longo da

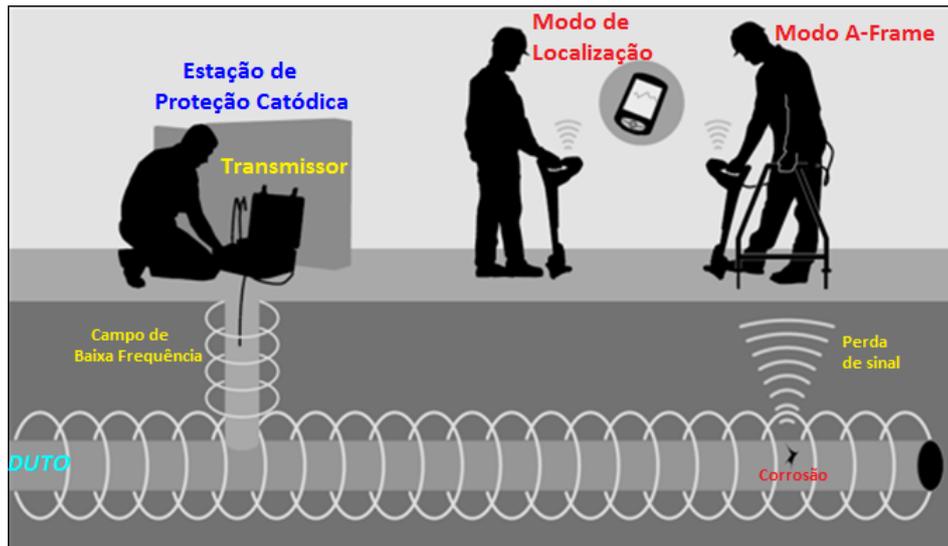


Figura 2.16: Modos de aplicação do método PCM.

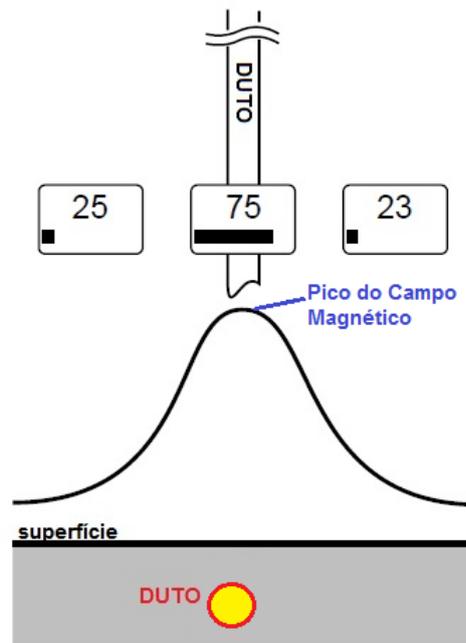


Figura 2.17: Esquema gráfico de detecção de dutos (modo de localização).

trajetória do duto (Figura 2.18) e que permite identificar os locais com falhas no revestimento, trechos desprotegidos, contatos com outras estruturas e determinando, também, pontos de corrosão no duto metálico. Neste modo de levantamento, os locais de desconformidades na estrutura do duto podem ser posicionados com precisão de até 1 m.

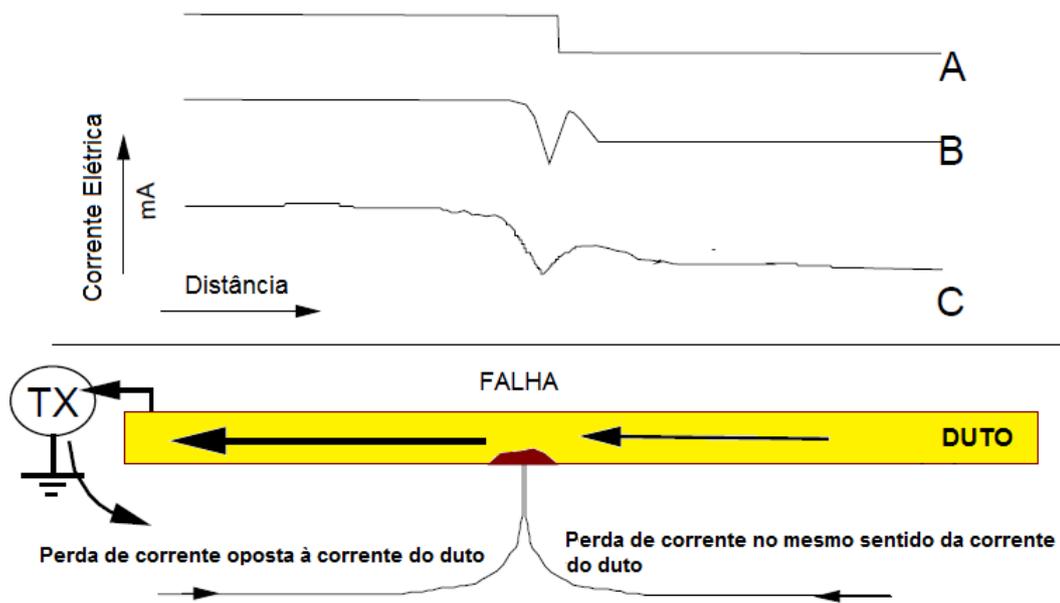


Figura 2.18: Esquema gráfico de identificação de falhas em dutos (modo A-Frame).

2.5.3 Equipamento PCM

O sistema instrumental do método PCM possui dois módulos principais, a saber: o módulo transmissor, que aplica uma corrente elétrica de baixa frequência (4 Hz) na Estação de Proteção Catódica (EPC) do duto a ser investigado, e o módulo receptor do sinal, que capta o campo magnético propagado ao longo do duto. Assim, o equipamento básico consiste em um receptor localizador de dutos (pipe locator), agregado na sua parte inferior a um sensor magnético (mag foot), e um transmissor de corrente elétrica de alta potência (Figuras 2.19 e 2.20).



Figura 2.19: Módulo Transmissor do PCM.

Este sensor permite obter, a partir da superfície e sem contato físico com a tubulação,



Figura 2.20: Módulo Receptor do PCM (Pipe Locator).

a localização precisa do duto, sua profundidade e a corrente gerada pelo transmissor. Estas informações são armazenadas na memória digital do equipamento para interpretações futuras. Além dos módulos transmissor e receptor, o equipamento completo consiste de cabos elétricos, baterias como fonte de energia e eletrodos metálicos para cravamento no solo e aterramento. Segundo as especificações técnicas, as potencialidades do sistema PCM podem ser elencadas a seguir:

- Localiza a tubulação que se deseja inspecionar até uma profundidade de 10 m;
- Possibilita a inspeção em qualquer ponto da tubulação;
- Permite a utilização em qualquer tipo de pavimento;
- Longo alcance (até 30 km);
- Independe da qualidade e do tipo de revestimento;
- Localiza falhas de revestimento e contatos com outras estruturas;
- Permite armazenar as coordenadas com GPS (opcional);
- Elabora relatórios digitais.

CAPÍTULO 3

Resultados e Discussões

3.1 Execução das Atividades

A primeira etapa deste trabalho baseou-se em estudos sobre o método GPR e suas aplicações. A segunda etapa foi composta da aquisição dos dados em campo, empregando diferentes modelos de GPR e o PCM. Nesta etapa, foram levantados perfis de GPR no modo afastamento constante, no sentido perpendicular às dutovias, sempre com o objetivo de testar a capacidade do GPR em detectar e inferir a profundidade dos dutos. Na terceira etapa do projeto foi realizado o processamento, a análise e a interpretação dos dados. Na etapa do processamento procurou-se comparar as velocidades obtidas pelo método de ajuste de hipérbolas com o método do colapso de hipérbolas com a migração.

3.2 Aquisição dos Dados

Na travessia estudada, vide Figura 3.1, empregamos dois equipamentos de GPR (Ramac I e o Easy Locator) e o PCM. Conforme pode ser visualizado no croqui da Figura 3.2, os perfis foram realizados a diferentes distâncias do rio que o gasoduto cruza, com o objetivo de analisar os efeitos da saturação de água no solo, no desempenho do GPR.

Os equipamentos utilizados nas aquisições dos dados foram dois tipos de GPR da empresa sueca Mala Geoscience. O primeiro deles, um modelo clássico de GPR, o Ramac I, vide a Figura 3.3. Com este GPR, adquiriu-se 10 perfis às margens do Rio Quiricó. O segundo equipamento, chamado de Easy Locator, vide a Figura 3.4, é um tipo de GPR dedicado ao mapeamento de utilidades em subsuperfície e fornece os radargramas já processados. Com o Easy Locator foram levantados mais 10 perfis sobre as mesmas linhas utilizadas na aquisição com o Ramac. No levantamento de campo implementado na travessia do corpo d'água, foi utilizado o equipamento PCM modelo RD 8.000, da empresa inglesa Radiodetection (Figura 3.5).



Figura 3.1: Foto do Rio Quiricó.

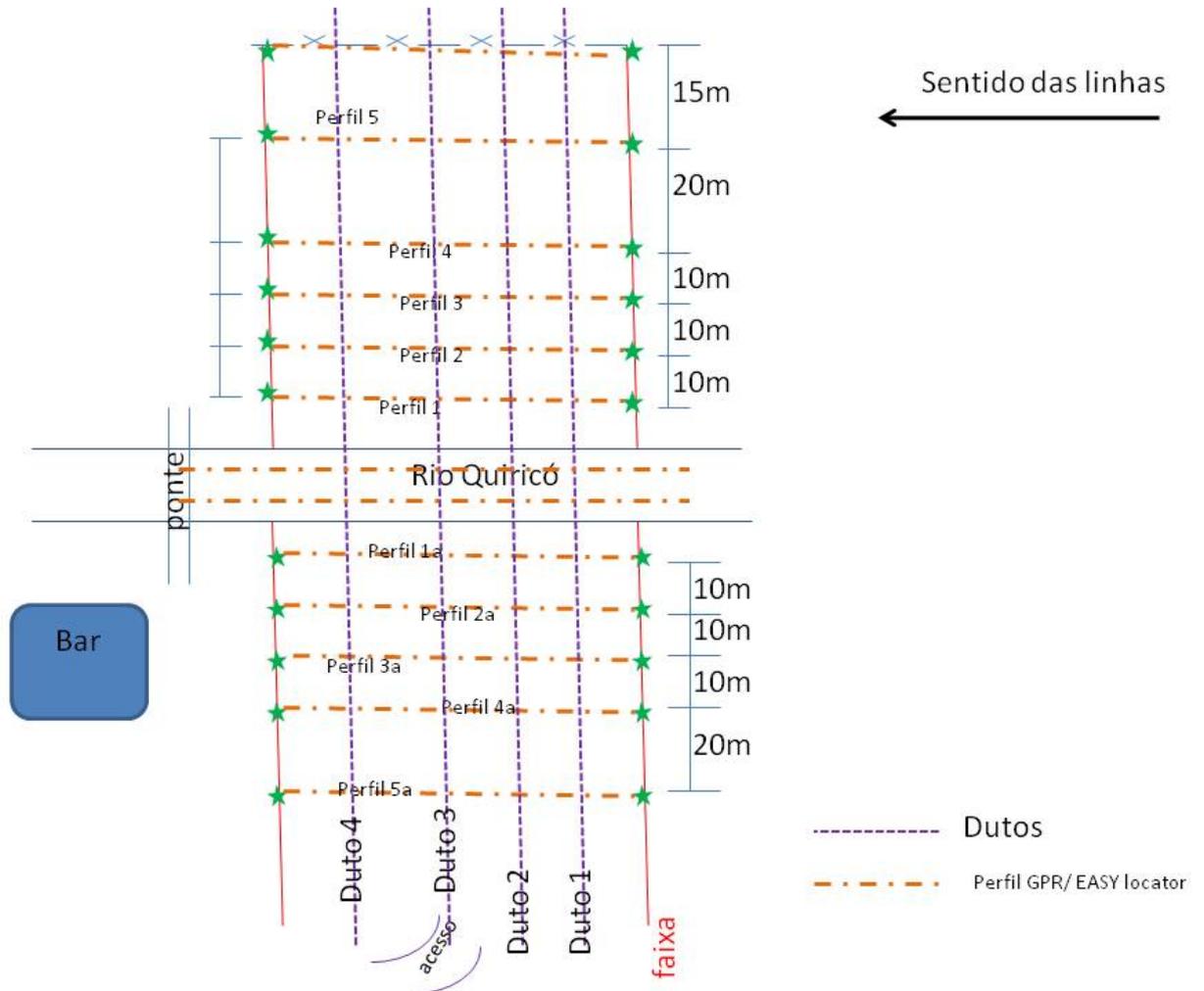


Figura 3.2: Croqui da área estudada.



Figura 3.3: Foto do sistema Ramac sendo puxado sobre o terreno usando uma separação de 60 cm entre as antenas de 200 MHz.



Figura 3.4: Foto do novo sistema Easy Locator HDR (High Dynamic Range) da Mala Geoscience.



Figura 3.5: Equipamento PCM, modelo RD 8.000 (Radiodetection).

3.3 Processamento, Análise e Interpretação dos Dados

A interpretação sobre a presença dos dutos, bem como o cálculo da profundidade de cada tubo, foi realizada após o tratamento de imagem feito na seção de GPR. Este tratamento segue as etapas de um fluxo de processamento, já apresentado, dentre as quais, destacamos a migração F-K (Stolt). O programa utilizado no processamento dos dados foi o *Reflex* (Sandmeier).

Um segundo objetivo desta pesquisa é comparar os resultados obtidos sobre a profundidade dos tubos com os diferentes equipamentos de GPR, com os resultados fornecidos pelo método PCM, muito utilizado na geotecnia, e ainda, comparar os resultados sobre a velocidade de propagação do pulso eletromagnético, usando o método de ajuste das hipérbolas e o da migração das hipérbolas para reduzi-las ao ponto de difração, ou seja, o próprio tubo.

3.3.1 GPR Ramac I

Apresentamos aqui os resultados sobre a identificação e posicionamento de dutos enterrados obtidos por meio do método geofísico indireto GPR, empregado nas proximidades do Rio Quiricó (Figura 3.1), situado no Estado da Bahia dentro do município de Araçás. E este levantamento ocorreu em 2013. Os dados foram obtidos através de perfis realizados paralelamente às margens deste rio, ou melhor, perpendicularmente à dutovia. Assim, os perfis estão orientados perpendicularmente às estruturas em subsuperfície que se deseja imagear.

Nas proximidades do Rio Quiricó foram adquiridos 10 perfis de radar, sendo 5 adquiridos na parte da área de acesso (perfis identificados com a letra **a**), onde também existia um bar e os outros 5 no lado oposto do rio, conforme pode ser visto na foto da Figura 3.1 e no croqui da Figura 3.2.

O equipamento utilizado para a aquisição dos dados de radar foi o sistema RAMAC I que consiste em quatro módulos, interligados por cabos de fibra ótica: antena transmissora, antena receptora, unidade de controle, e unidade de armazenamento e apresentação de dados (notebook). Foi utilizado um par de antenas (transmissora e receptora) com uma frequência de 200 MHz, assim, possibilitando uma profundidade de investigação de aproximadamente 8 metros (dependendo também da velocidade do meio).

Nesse levantamento, os dados coletados através do método GPR foram obtidos com um espaçamento de 5 cm entre os scans ou traços, 512 amostras em cada traço, empilhamento igual a 32 traços, uma janela de tempo de aproximadamente 293 ns, um comprimento de perfil igual a 23 m para cada perfil e uma distância de separação entre os perfis igual a 10 m ou 20 m em cada lado do rio. Com isto, conseguiu-se um maior entendimento sobre a distribuição de velocidade na área investigada, a qual corresponde ao cruzamento dos dutos

com o rio.

O tipo de arranjo adotado nesta aquisição de dados GPR foi o de *afastamento comum* ou *afastamento constante*. Com esse tipo de arranjo a distância entre o ponto de transmissão e o de recepção é mantida constante durante a movimentação das antenas. Normalmente, o espaçamento mínimo para os levantamentos de afastamento constante é igual a maior dimensão da antena.

Em todos os 10 perfis foi possível identificar a presença e inferir a profundidade de tubulações enterradas. A análise de alguns perfis possibilitou a identificação dos 4 dutos (100%), enquanto outros só possibilitaram a identificação de 2 dutos (50%). Por exemplo, o perfil 1 processado é mostrado na Figura 3.6. Nele é possível identificar a presença de 2 dutos através das hipérbolas de difração. Este radargrama exibe um resultado coerente e evidencia um comportamento muitas vezes esperado em levantamentos realizados nas proximidades de rios, pois quanto mais próximo das margens do rio, a saturação do terreno tende a aumentar e, com isso, há uma tendência natural no aumento da condutividade elétrica, que por sua vez, aumenta a atenuação do sinal devido às perdas de energia na forma de calor.

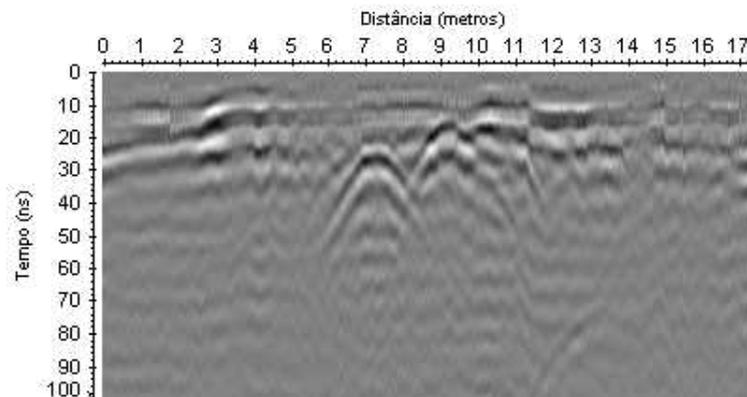


Figura 3.6: Radargrama correspondente ao perfil 1 no qual é possível a identificação de 2 dutos (50% de acerto).

Já no perfil 3a, também processado, conforme Figura 3.7, é possível a identificação bem clara de 4 hipérbolas de difração que são correspondentes aos 4 dutos enterrados. Percebe-se que este radargrama foi obtido a partir de um perfil adquirido numa porção do terreno mais distante das margens do rio (20 m do Rio), mostrando uma resposta com qualidade superior quando comparado com o perfil 1. A atenuação do sinal foi menor, o que possibilitou a identificação de todos os dutos.

Como parte do processo de aprendizagem para a elaboração deste trabalho, fez-se o processamento dos 10 perfis obtidos nas proximidades do Rio Quiricó e, por questões de espaço e qualidade das respostas (radargramas), selecionou-se o **perfil 4a** para mostrar as etapas do processamento básico e avançado aplicadas aos dados.

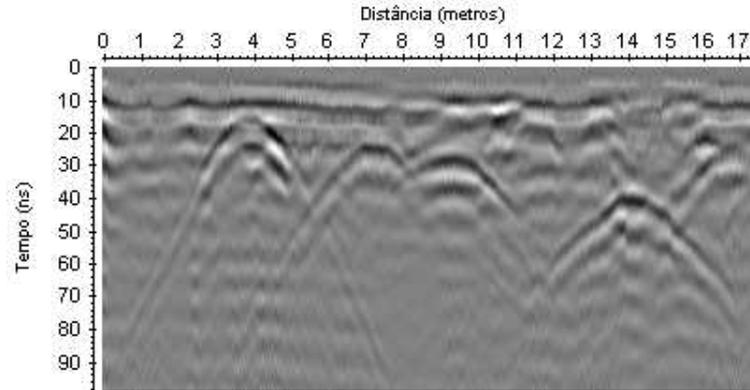


Figura 3.7: Radargrama correspondente ao perfil 3a no qual é possível a identificação de 4 dutos (100% de acerto).

Perfil 4a

O perfil 4a foi obtido do lado do acesso à área do levantamento, possui 433 traços, comprimento de 21,7 metros e uma janela de tempo de aproximadamente 293 ns. Ele é mostrado na Figura 3.8 sem a aplicação de nenhuma etapa de processamento aos dados (dados brutos).

1. Edição dos dados/traços

Esta etapa consiste na remoção e ou correção de dados incorretos/pobres na qualidade do sinal e triagem dos arquivos de dados. Devido à atenuação do sinal, vemos no radargrama que abaixo do tempo de 100 ns existe pouca informação e, além disso, o nosso alvo está a tempos menores na seção. Assim, faremos um corte selecionando uma janela de tempo igual a 115 ns. Também é possível perceber que a partir de 16,4 metros de comprimento do perfil, o GPR ficou parado, gerando traços na mesma posição, daí a invariância lateral da seção. Para consertar este erro, faremos uma extração dos últimos 103 traços, restando, então, os primeiros 330 traços da seção. O resultado da eliminação dos últimos traços e do corte no tempo, pode ser visto na Figura 3.9.

2. Filtro Dewow

Correção devido às baixas frequências. Assim, remove-se os efeitos causados pela saturação do sinal gravado pelas chegadas dos eventos mais rápidos (ou seja, ondas que viajam pelo ar/terra) e ou efeitos de acoplamento indutivo. Com a aplicação desse filtro percebe-se uma dessaturação do sinal, conforme pode ser visto na Figura 3.10.

3. Correção do tempo zero

Correção do tempo de início para coincidir com a posição da superfície, conforme Figura 3.11. Percebe-se como a seção se eleva para fazer coincidir o tempo zero com a chegada da onda direta pelo ar/terra. Estas três etapas de processamento são o mínimo necessário para visualizar os dados de uma forma inteligível. Embora estas etapas do

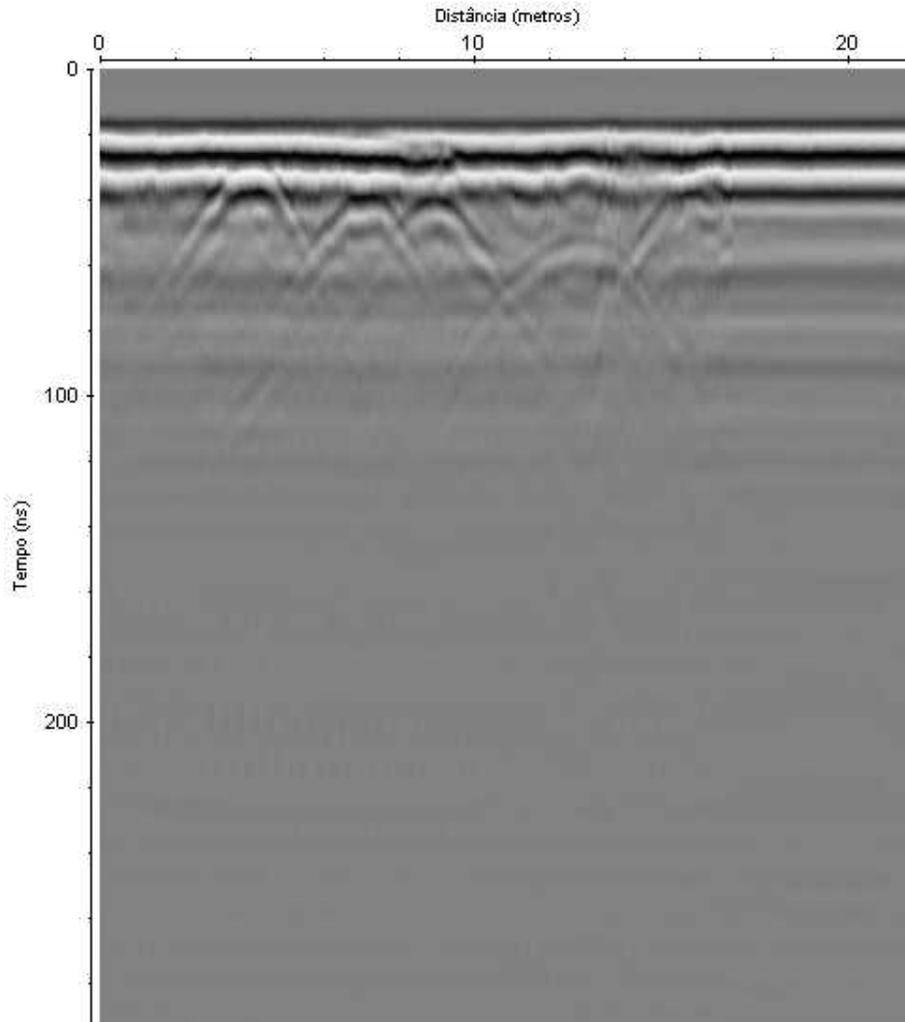


Figura 3.8: Radargrama correspondente ao perfil 4a sem a aplicação de nenhuma etapa de processamento aos dados.

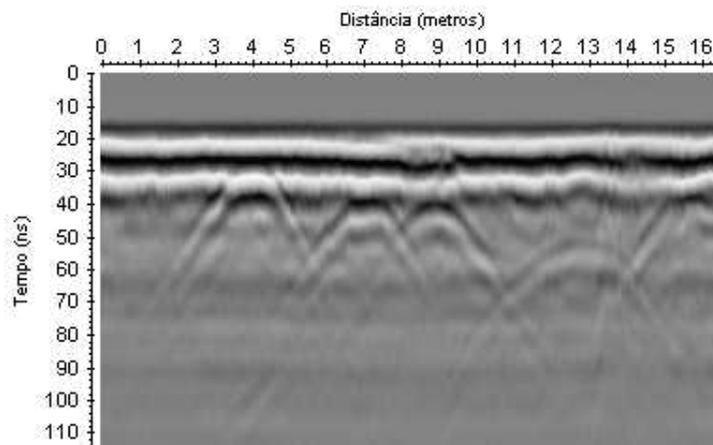


Figura 3.9: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição dos dados.

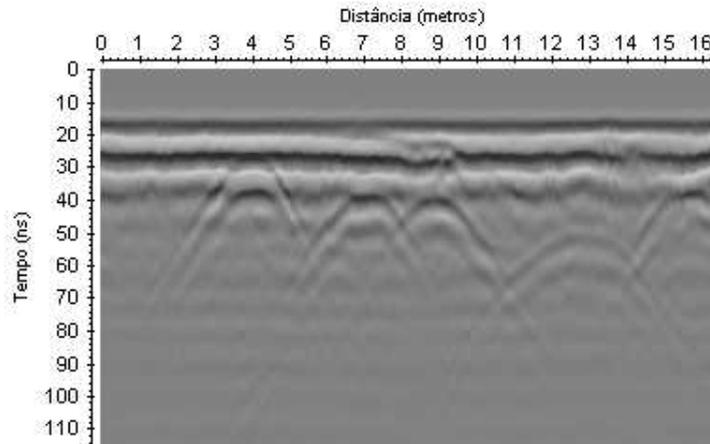


Figura 3.10: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição dos dados e filtro Dewow.

processamento tenham sido aplicadas, os dados ainda são considerados como muito “básicos” e outros métodos devem ser utilizados para melhorar a interpretação das seções.

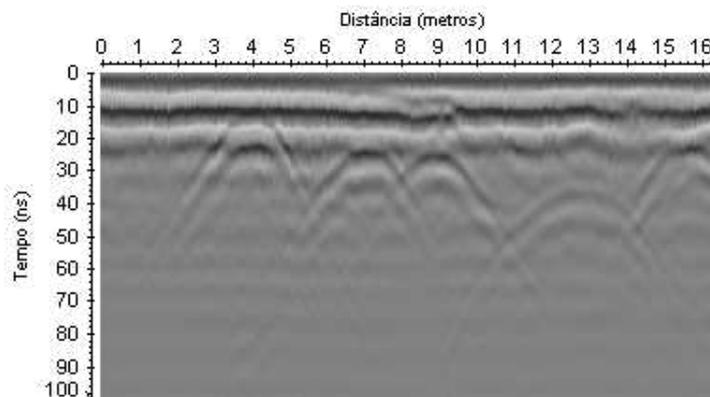


Figura 3.11: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow e correção do tempo zero.

4. Filtragem

Aplicação de filtros 1D e 2D para melhorar a razão sinal/ruído e a qualidade visual da seção. Aplicando o filtro temporal passa-banda butterworth (na faixa de frequência 50-350 MHz) e o filtro espacial de remoção de background, vemos o resultado obtido na Figura 3.12. É perceptível a melhora na qualidade de visualização da seção, principalmente devido à retirada das fortes respostas das ondas diretas pelo ar/solo.

A escolha da faixa de frequência para a aplicação do filtro passa-banda butterworth deve ser feita de forma correta, caso contrário, resultados indesejados podem ocorrer. Por exemplo, aplicando este filtro na faixa incorreta de frequência, digamos de 50-100 MHz, estamos eliminando um conteúdo de frequências essenciais aos dados e o

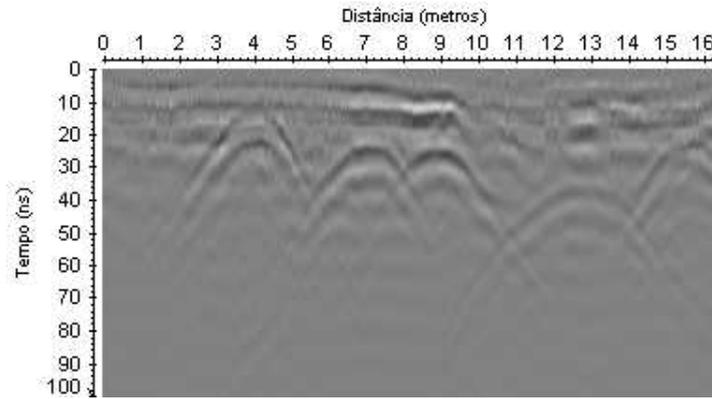


Figura 3.12: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz) e filtro de remoção de background.

resultado pode ser visto na Figura 3.13. Percebe-se que eventos de interesse, como as difrações nos dutos, são fortemente atenuadas.

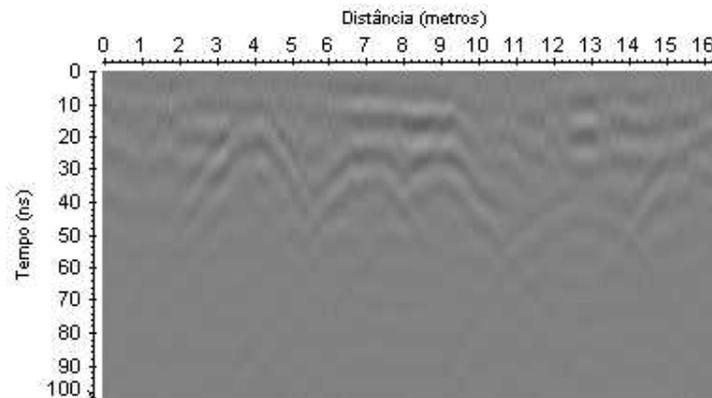


Figura 3.13: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-100 MHz) e filtro de remoção de background.

5. Análise de velocidade e conversão da seção em profundidade

Até agora, as etapas de processamento têm operado no domínio do tempo e os dados não foram relacionados diretamente com a profundidade. Sendo assim, com a finalidade de converter as seções em uma escala de profundidade, o que é necessário para interpretações realistas e também para a aplicação de correções de topografia, uma estimativa precisa da velocidade média (com erro menor ou igual a 10%) do subsolo deve ser obtida. O ajuste de hipérboles com velocidades conhecidas sobre os eventos de difração serve para realizar a análise de velocidade. Isto pode ser visto na Figura 3.14.

Convém mencionar que não vale a pena perder muito tempo tentando obter um campo de velocidades altamente preciso, uma vez que uma velocidade constante média para

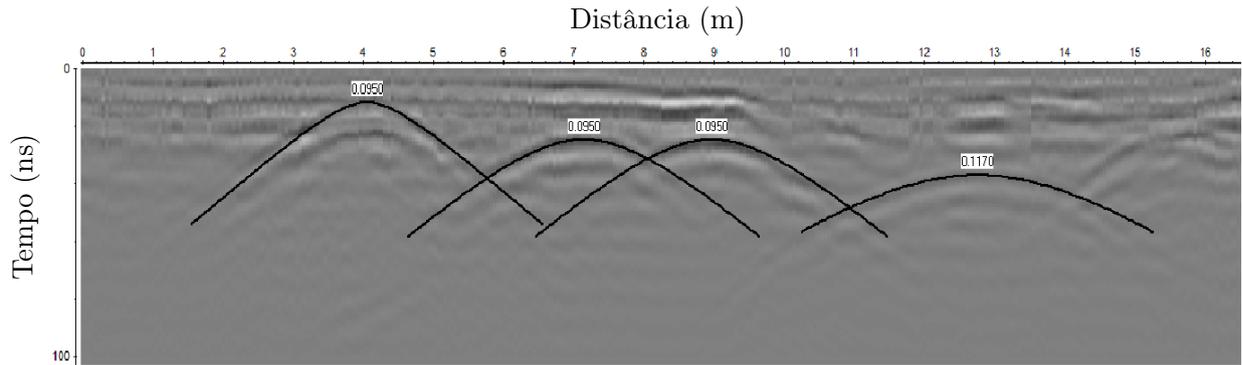


Figura 3.14: Ajuste de curvas hiperbólicas sobre eventos de difração para análise de velocidade.

todas as profundidades produziu os mesmos resultados de interpretação.

Utilizando a velocidade média de 0,09675 m/ns entre as quatro velocidades encontradas através deste método, pode-se converter a seção em profundidade (Figura 3.15).

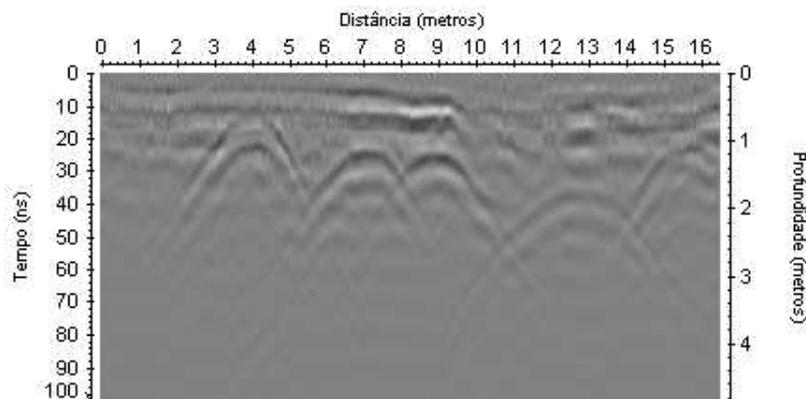


Figura 3.15: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background e conversão em profundidade.

Veja que se fosse utilizada a velocidade de 0,1 m/ns, por exemplo, o resultado seria o exibido na Figura 3.16. Este resultado mostra que não teríamos diferenças significativas na seção convertida em profundidade e, conseqüentemente, também não teríamos diferenças na interpretação.

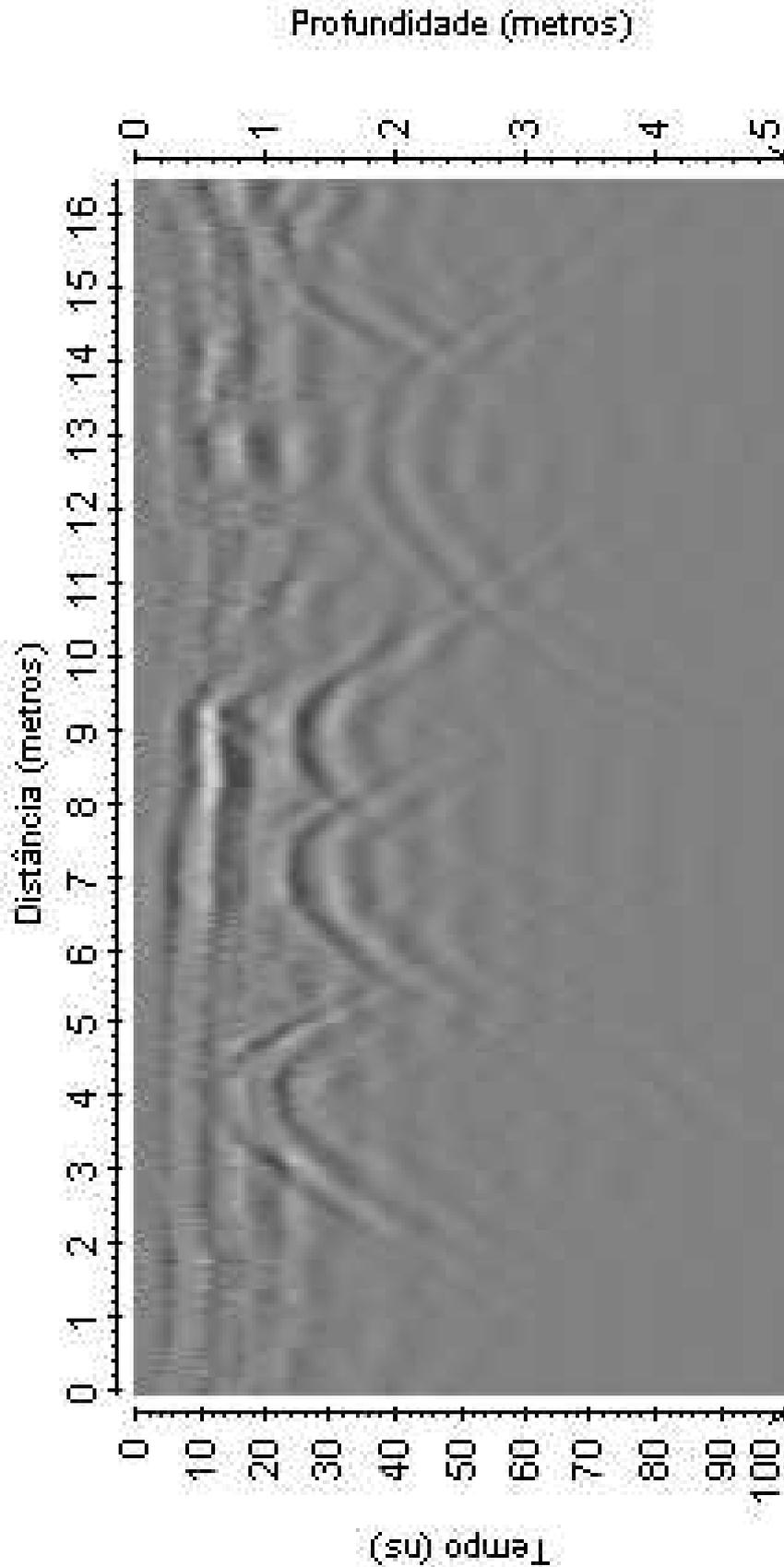


Figura 3.16: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background e conversão em profundidade.

6. Ganhos

Após a aplicação das etapas anteriores os dados estão em uma forma “processada”. Assim, pode-se aplicar os diversos tipos de ganhos para prosseguir com a interpretação e análise dos dados. Veja como a aplicação do ganho altera a qualidade visual da seção nas Figuras 3.17 (sem ganho), 3.18 (com ganho de 2 db/m) e 3.19 (com ganho de 3 db/m).

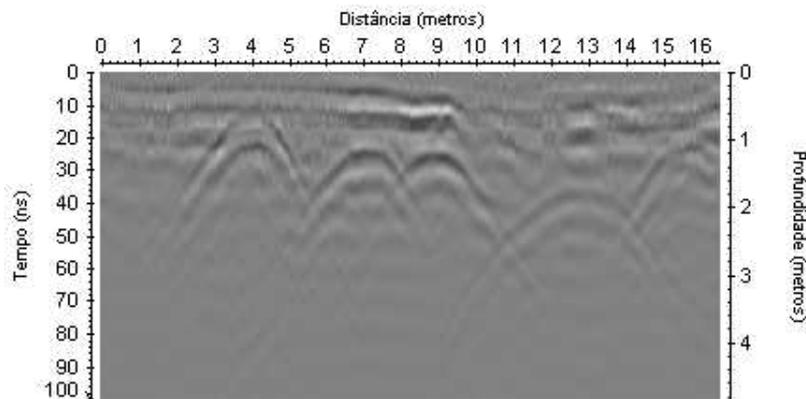


Figura 3.17: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background e conversão em profundidade (sem ganho).

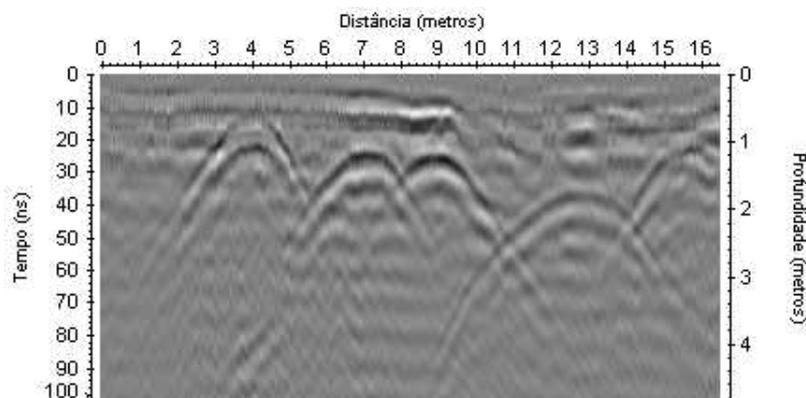


Figura 3.18: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho exponencial de 2 db/m.

No entanto, deve ser lembrado que a aplicação de um ganho efetivamente altera os dados e, em geral, tanto os sinais quanto os ruídos são amplificados em conjunto numa forma indiscriminada. Nota-se que no radargrama da Figura 3.19, houve uma grande amplificação dos ruídos com a aplicação do ganho exponencial de 3 db/m.

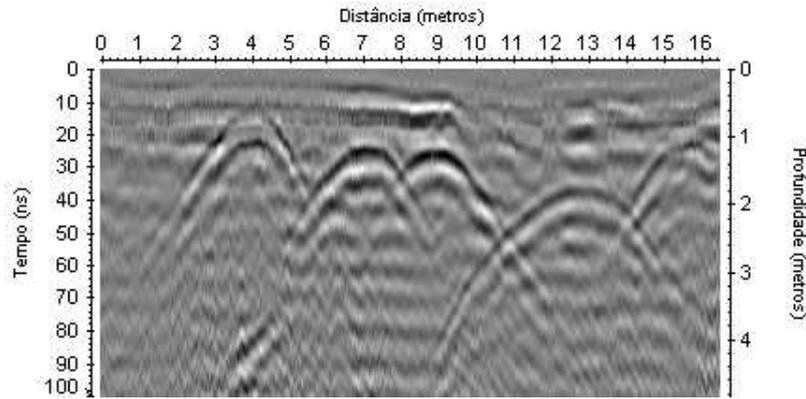


Figura 3.19: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho exponencial de 3 db/m.

Para fins de comparação, também foi aplicado um ganho linear e o resultado pode ser visto nas Figuras 3.20 e 3.21.

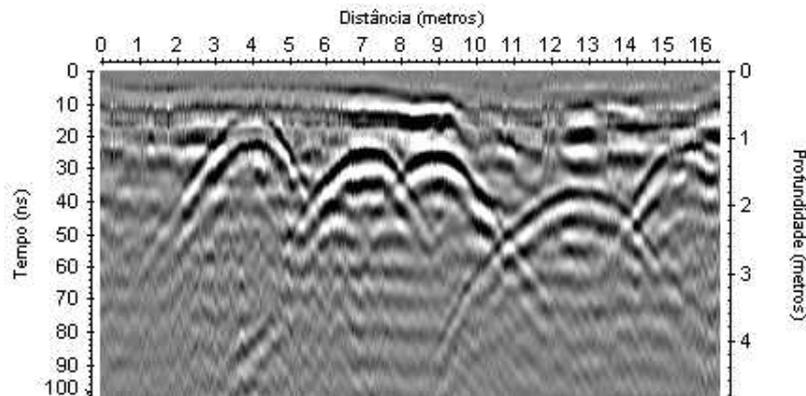


Figura 3.20: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho linear.

Também deve ser lembrado que a capacidade de definir a função de ganho mais adequada aos dados é de valor inestimável tanto para a interpretação quanto para a publicação da seção final. É uma escolha que deve ser feita entre as necessidades de interpretação e de tempo/custo, entretanto, sempre vale a pena gastar um pouco de tempo testando diferentes ganhos para ajudar a melhorar a aparência das seções e, portanto, o processo interpretativo.

Levando estas observações em consideração, escolheu-se a função de ganho exponencial de 2 db/m para aplicar nesta e nas outras nove seções obtidas no Rio Quiricó. Pode-se perceber que esta função ganho teve um bom resultado nos radargramas, uma vez que

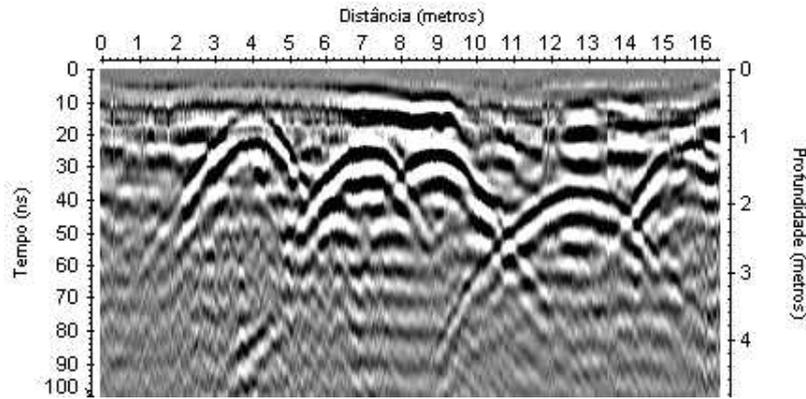


Figura 3.21: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho linear.

realçou as hipérboles de difração e os ruídos não foram tão amplificados a ponto de saturar as seções. Sendo assim, o perfil **4a** encontra-se numa forma adequada para o processo interpretativo e pode ser visualizado na Figura 3.22.

Como mencionado anteriormente, os dutos são identificados através das hipérboles de difração presentes no radargrama, levando em consideração que os pontos difratores estão localizados nos vértices dessas hipérboles, isto é, a posição da geratriz superior dos dutos. A título de informação, a 5^a hipérbole que pode ser vista na posição de 20 m na seção é devida à presença de um tubo plástico contendo fibra ótica. Sendo assim, centramos os nossos esforços nas 4 primeiras hipérboles. Portanto, foi possível localizar os dutos e o resultado é mostrado na Tabela 3.1.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,9	1,4	1,41	2,02
Distância ao início do perfil (m)	4,1	7,1	8,9	12,7

Tabela 3.1: Tabela que mostra a localização dos dutos com a profundidade e a distância ao início do perfil.

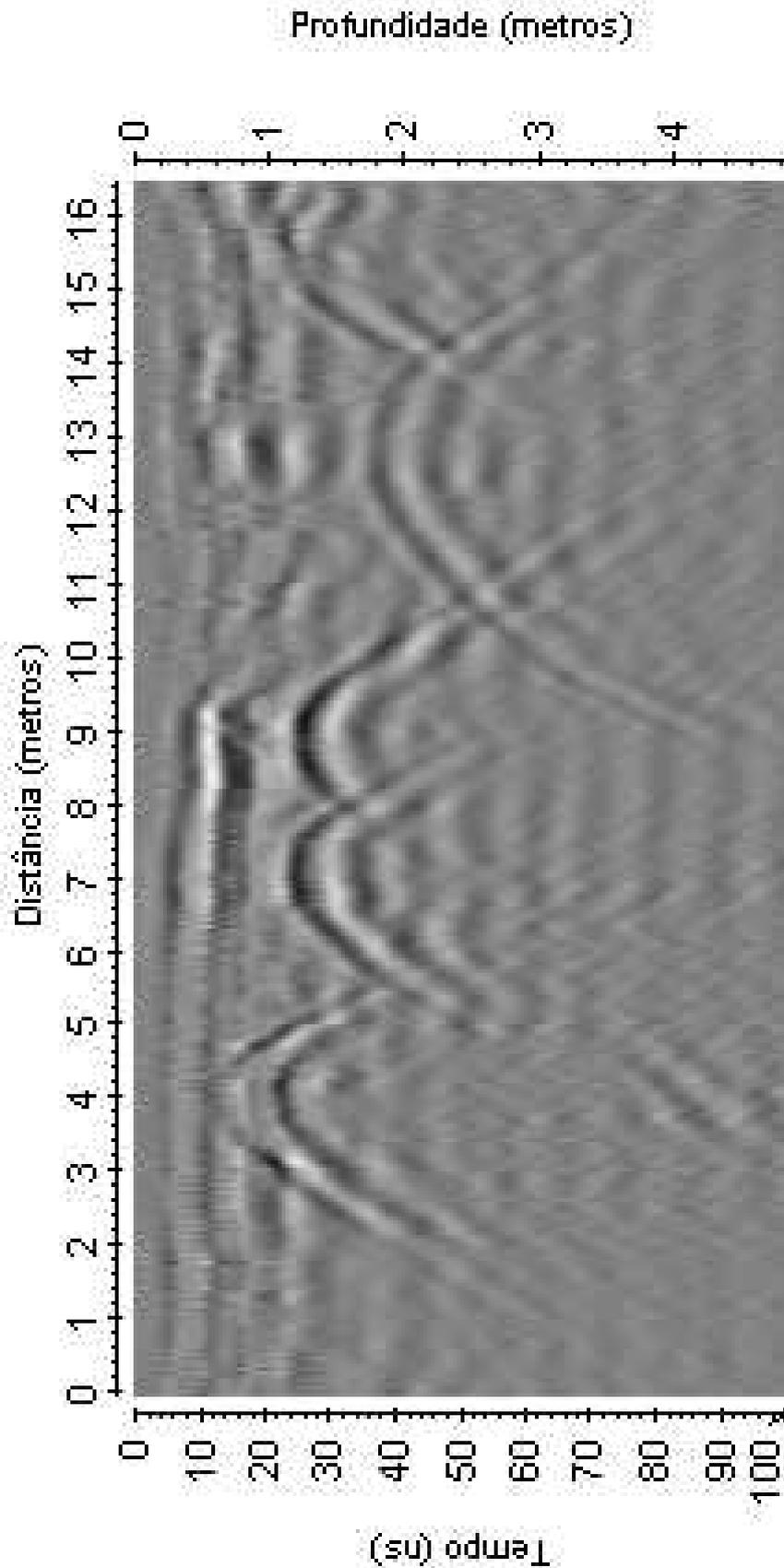


Figura 3.22: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade e ganho exponencial de 2 db/m.

7. Migração

Esta é a última etapa do processamento dos dados de GPR. Com a migração é feita a correção dos efeitos da geometria de levantamento dos dados e da distribuição espacial da energia. Idealmente, as hipérboles de difração são colapsadas à uma fonte pontual e os refletores inclinados e/ou curvos reposicionados em suas corretas localizações e com suas reais dimensões. No nosso estudo, a migração foi utilizada como uma ferramenta capaz de confirmar que as hipérboles presentes nas seções são oriundas do efeito de difração/reflexão da energia nos tubos e, ainda, testar a coerência das velocidades obtidas com ajuste de hipérboles, as quais foram utilizadas para a conversão da seção em profundidade. Sendo assim, o perfil 4a foi migrado com a velocidade média constante (0,09675 m/ns) determinada durante a análise de velocidade e conversão da seção em profundidade e o resultado pode ser visto na Figura 3.23. Às vezes, uma mudança na palheta de cores ajuda na visualização do colapso das hipérboles de difração (Figura 3.24).

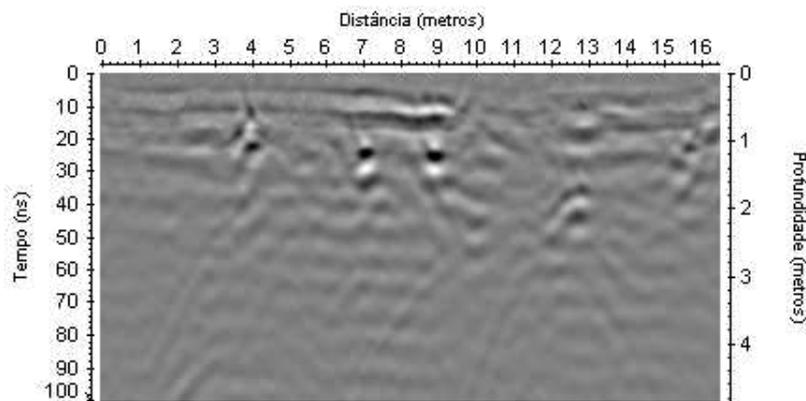


Figura 3.23: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,09675 m/ns.

Nota-se que as três primeiras (da esquerda para a direita) hipérboles foram totalmente colapsadas, o que confirma a nossa interpretação anterior. Em relação à quarta hipérbole, podemos perceber que ela foi parcialmente colapsada e isto nos diz que a velocidade naquela porção do terreno deve ser maior do que o valor utilizado na migração (variação lateral de velocidade). De fato, aplicando novamente a migração com a velocidade igual a 0,113 m/ns, percebemos o colapso da quarta hipérbole, ao passo que as outras três foram invertidas (“sorrisos” de migração). A seção migrada com este último valor para a velocidade pode ser vista nas Figuras 3.25 e 3.26.

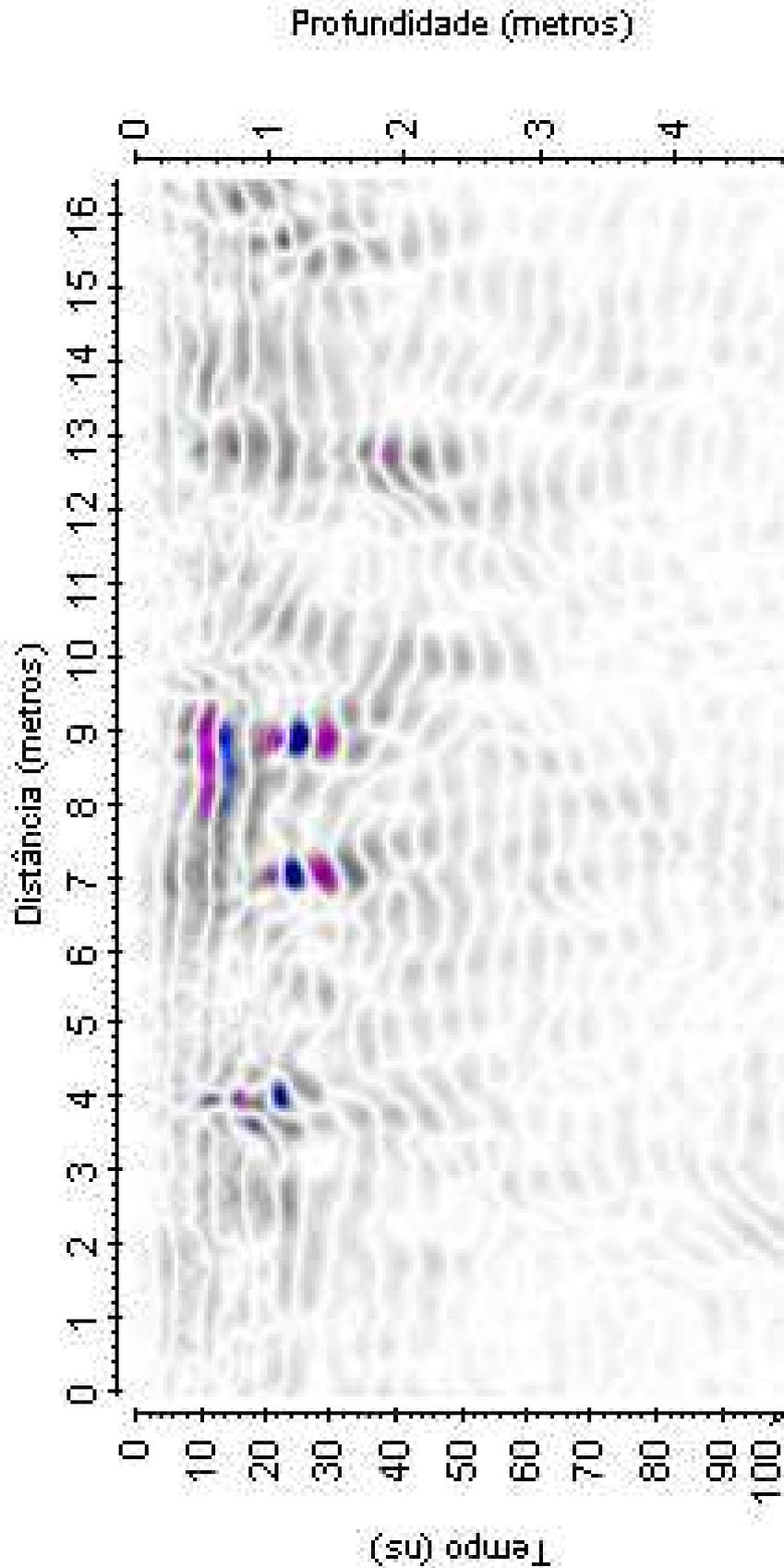


Figura 3.24: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,09675 m/ns.

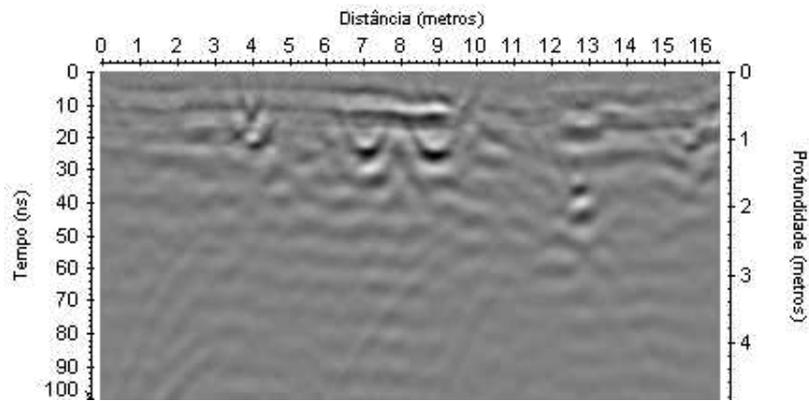


Figura 3.25: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,113 m/ns.

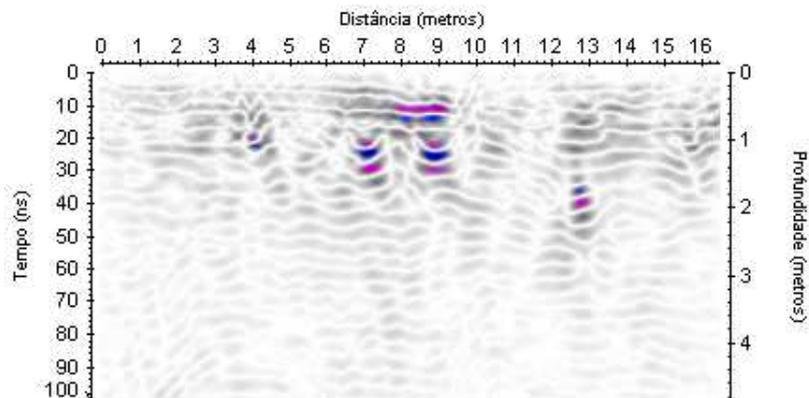


Figura 3.26: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,113 m/ns.

Como mencionado anteriormente, podemos utilizar a migração como uma ferramenta valiosa para proceder com a análise de velocidade e, assim, comparar os resultados sobre a velocidade de propagação do pulso eletromagnético, usando o método de ajuste das hipérbolas e o da migração das hipérbolas para reduzi-las ao ponto de difração, ou seja, o tubo. Feitas estas observações e partindo da velocidade determinada pelo método do ajuste hiperbólico como um “palpite” inicial, vamos utilizar um processo dedutivo e, migrar a seção adotando erros de 25%, 10% e 5% em relação à este valor e observar o impacto causado nas imagens, podendo então, determinar o melhor valor de velocidade que colapsa as hipérbolas.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,12 m/ns (25% maior)

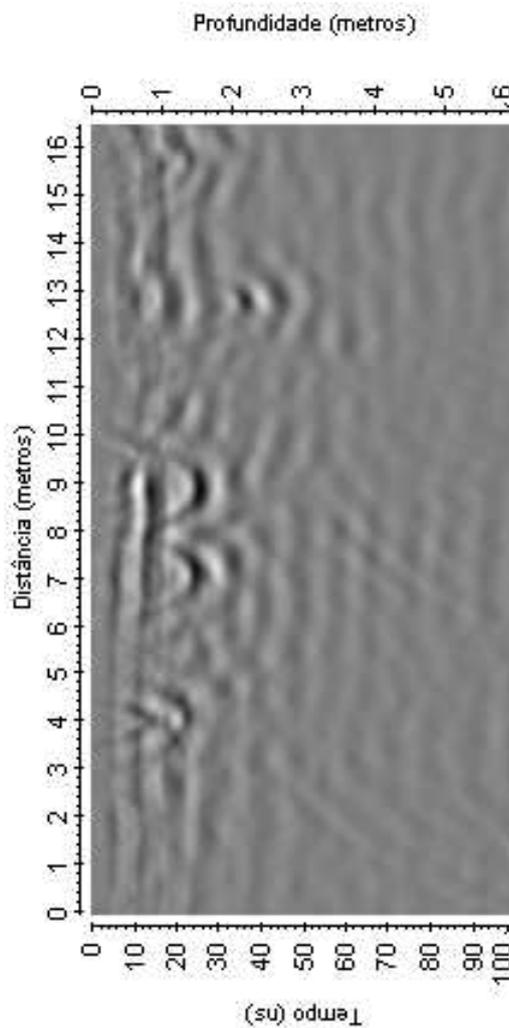


Figura 3.27: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,12 m/ns.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,073 m/ns (25% menor)

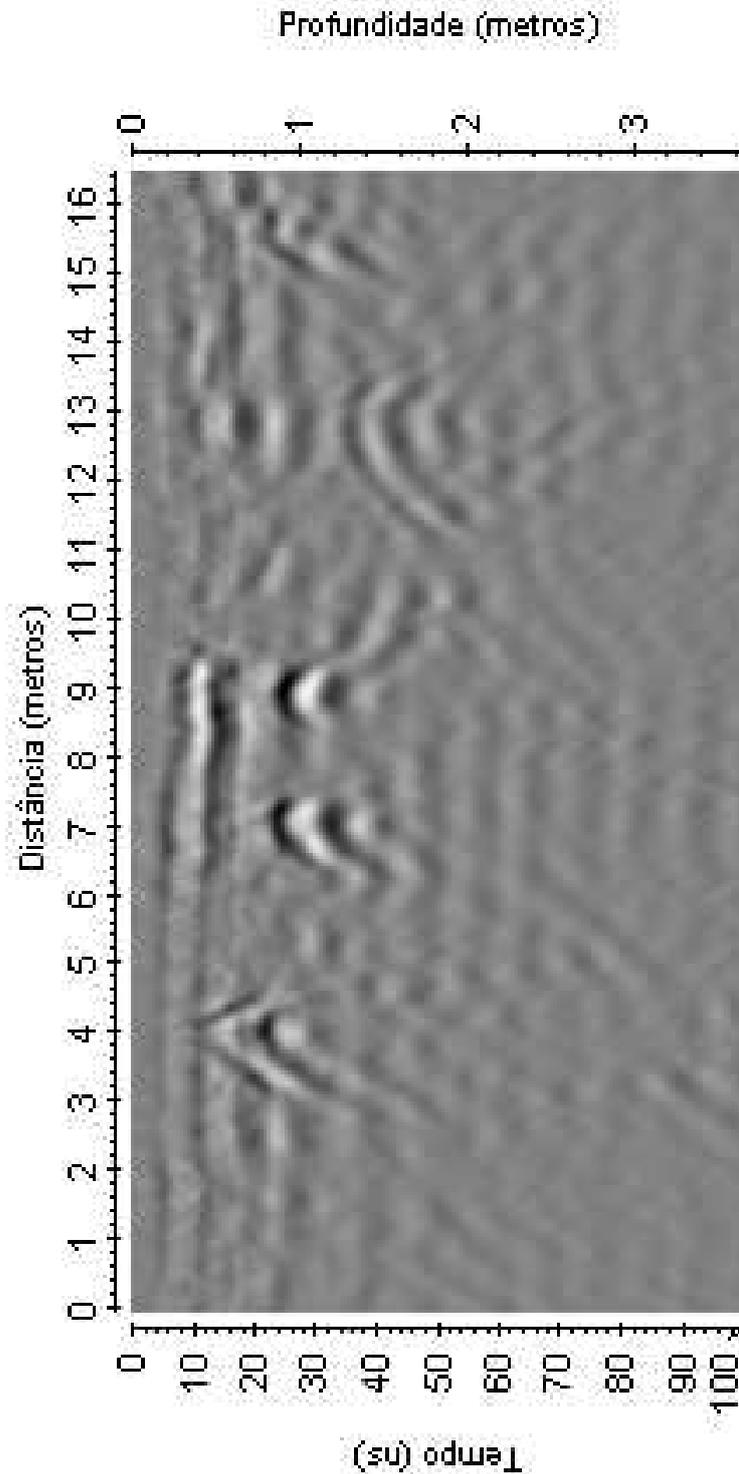


Figura 3.28: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,073 m/ns.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,11 m/ns (10% maior)

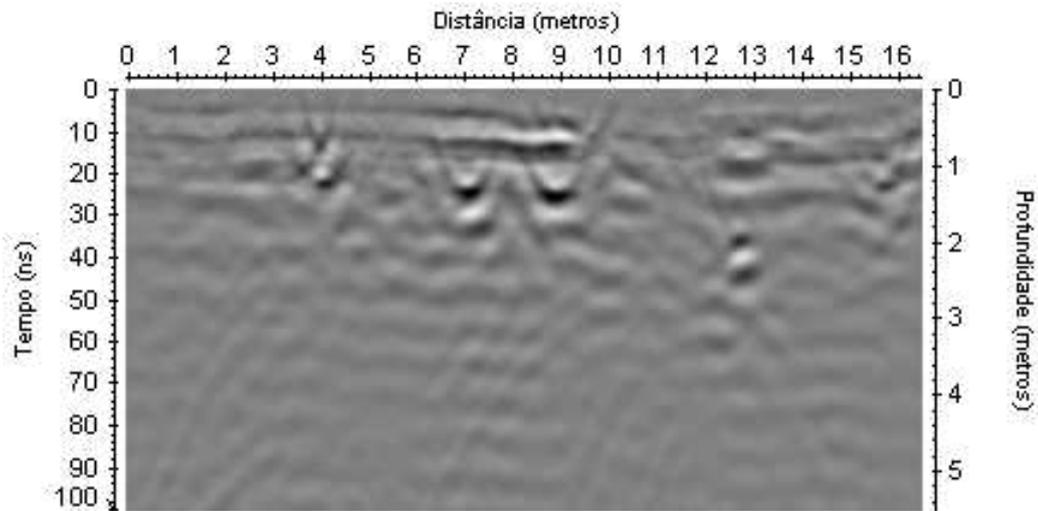


Figura 3.29: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,11 m/ns.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,087 m/ns (10% menor)

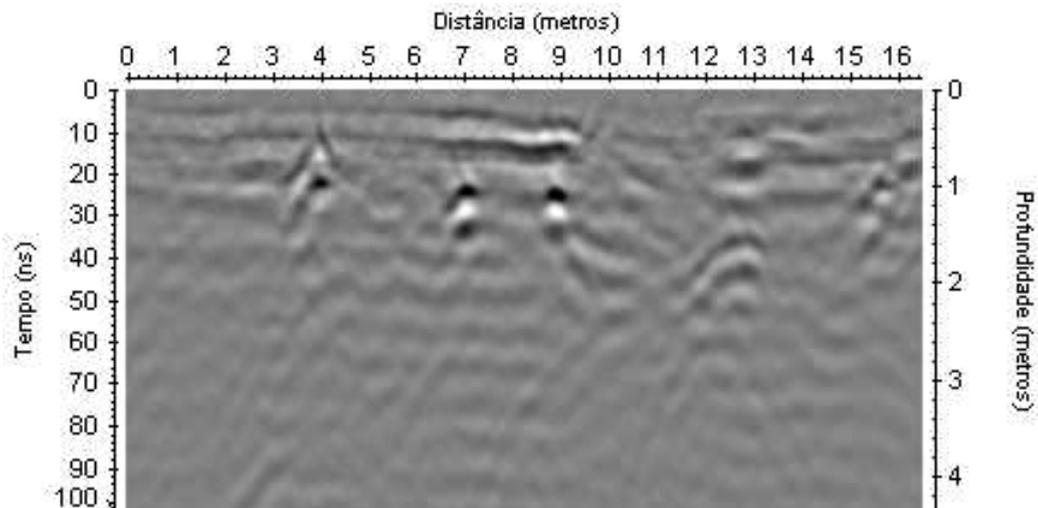


Figura 3.30: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de operações de edição, filtro Dewow, correção do tempo zero, filtro passa-banda butterworth (50-350 MHz), filtro de remoção de background, conversão em profundidade, ganho exponencial de 2 db/m e migração com velocidade constante de 0,087 m/ns.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,1 m/ns (5% maior)

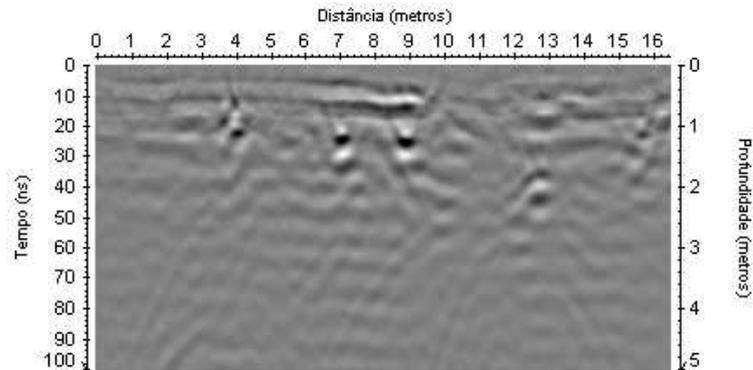


Figura 3.31: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de todas as etapas anteriores e migração com velocidade constante de 0,1 m/ns.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,092 m/ns (5% menor)

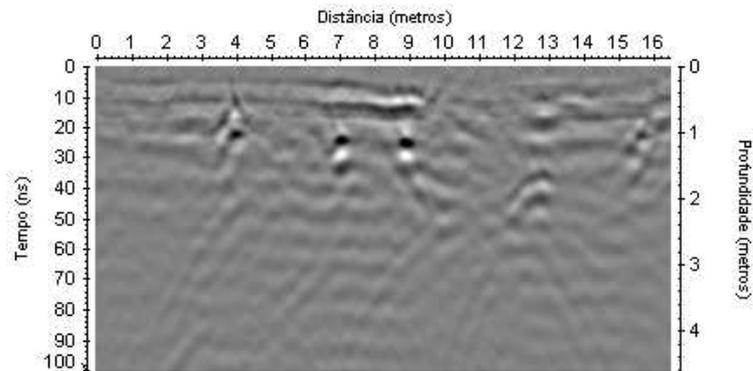


Figura 3.32: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de todas as etapas anteriores e migração com velocidade constante de 0,092 m/ns.

- Seção migrada com velocidade constante igual a 0,09675 m/ns (melhor valor)

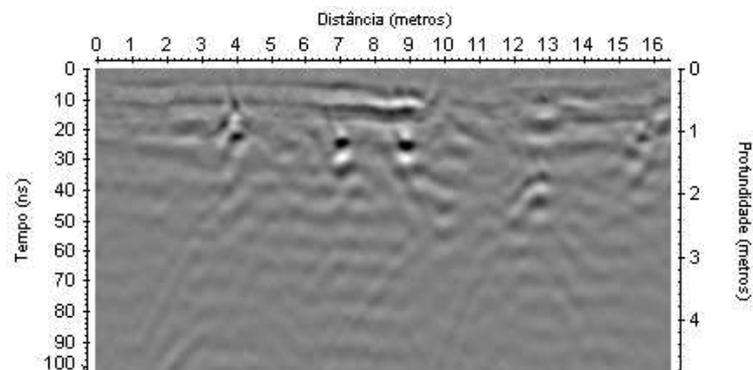


Figura 3.33: Radargrama correspondente ao perfil 4a com a aplicação de todas as etapas anteriores e migração com velocidade constante de 0,09675 m/ns.

Com a análise desses radargramas, podemos confirmar a hipótese de que o sucesso da migração está relacionado diretamente com uma boa informação de velocidade e, também, que a migração pode ser utilizada para proceder tal análise de velocidade. Notamos que com um erro de 5% no valor da velocidade, a seção migrada não apresentou grandes mudanças, ou seja, o erro é praticamente imperceptível. Já com erros de 10% e 25% no valor da velocidade, notamos a inversão das hipérbolas (erro para mais - sobre-migração); percebemos também que houve uma sub-migração (erro para menos), deixando ainda parte das “pernas” das hipérbolas sem colapso. Certamente, a profundidade dos dutos é alterada quando temos erros na velocidade de migração, de tal forma que, com uma velocidade maior, interpretamos o duto como mais profundo, ao passo que, com uma velocidade menor, o interpretamos como mais raso. Portanto, podemos responder à questão prática, “o que é um grau aceitável de erro de velocidade?”, como sendo um erro menor ou igual a 5%.

Aplicação do Fluxograma

Nesta seção o fluxograma proposto na presente pesquisa foi utilizado em cada um dos 10 perfis com a aplicação dos 6 primeiros passos. Além disso, também foi construída uma tabela para cada perfil analisado, mostrando a localização dos dutos (profundidade e distância ao início do perfil). Quando o duto não foi localizado, o espaço correspondente aos dados na tabela foi deixado em branco. O fluxograma pode ser visto na Figura 3.34.

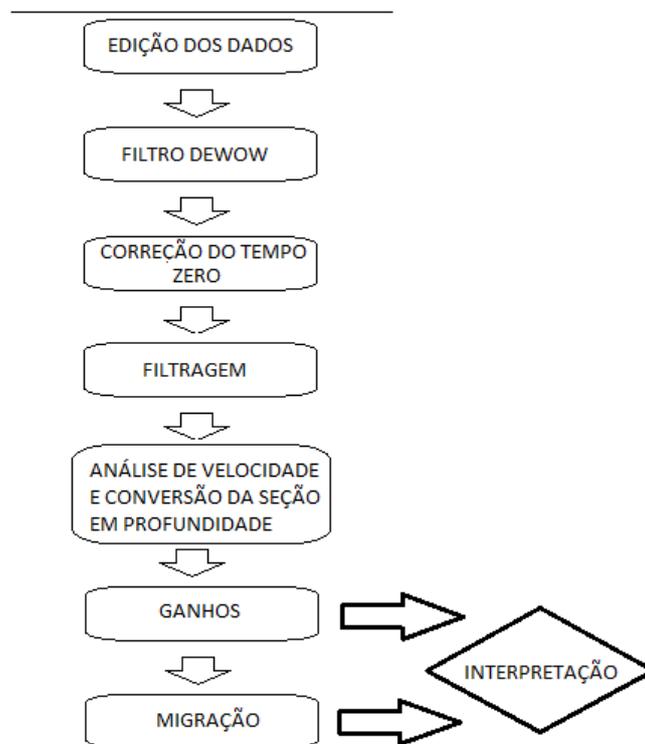


Figura 3.34: Fluxograma utilizado no processamento dos dados.

- Perfil 1a

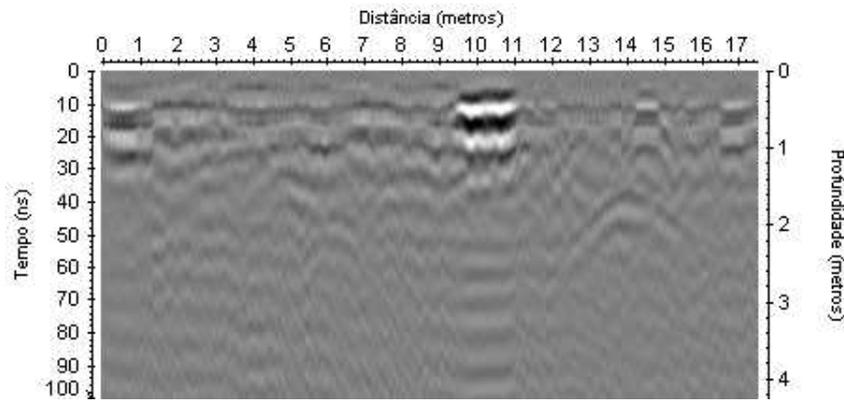


Figura 3.35: Perfil 1a processado ($v=0,085$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)				1,83
Distância ao início do perfil (m)				14,1

Tabela 3.2: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1a.

- Perfil 2a

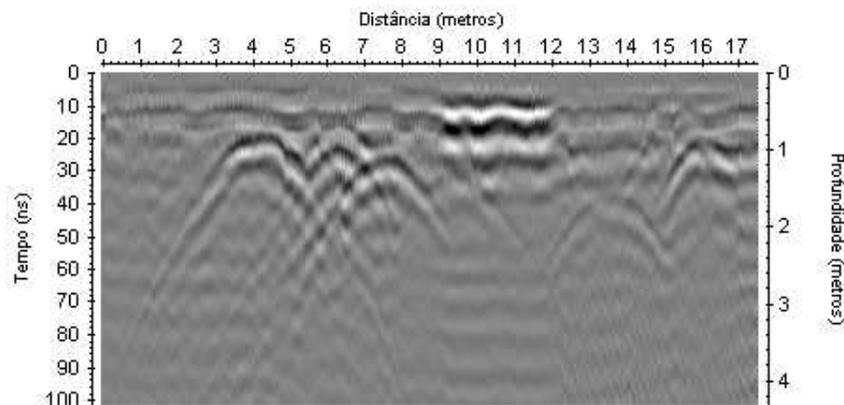


Figura 3.36: Perfil 2a processado ($v=0,083$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	1,11	1,30	1,38	1,82
Distância ao início do perfil (m)	4,2	7,0	9,4	13,5

Tabela 3.3: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2a.

- Perfil 3a

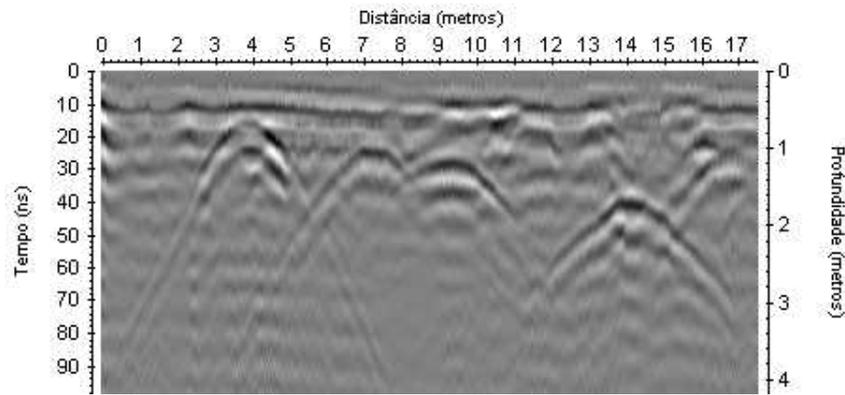


Figura 3.37: Perfil 3a processado ($v=0,093$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,88	1,21	1,38	1,86
Distância ao início do perfil (m)	3,9	7,3	9,2	14,2

Tabela 3.4: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3a.

- Perfil 4a

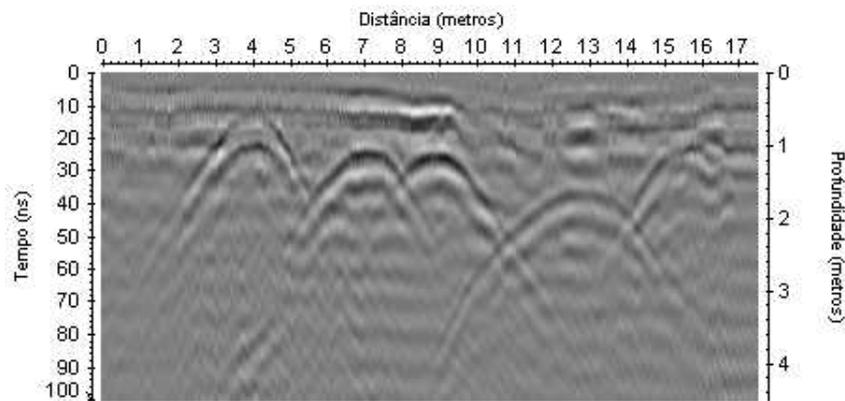


Figura 3.38: Perfil 4a processado ($v=0,093$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,86	1,34	1,42	1,92
Distância ao início do perfil (m)	4,0	7,1	8,9	12,7

Tabela 3.5: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4a.

- Perfil 5a

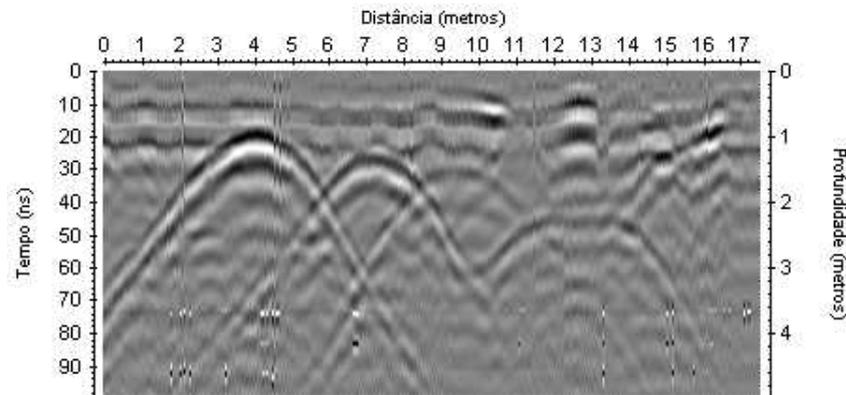


Figura 3.39: Perfil 5a processado ($v=0,105$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	1,38	1,69	1,82	2,42
Distância ao início do perfil (m)	4,1	7,2	9,5	12,7

Tabela 3.6: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5a.

- Perfil 1

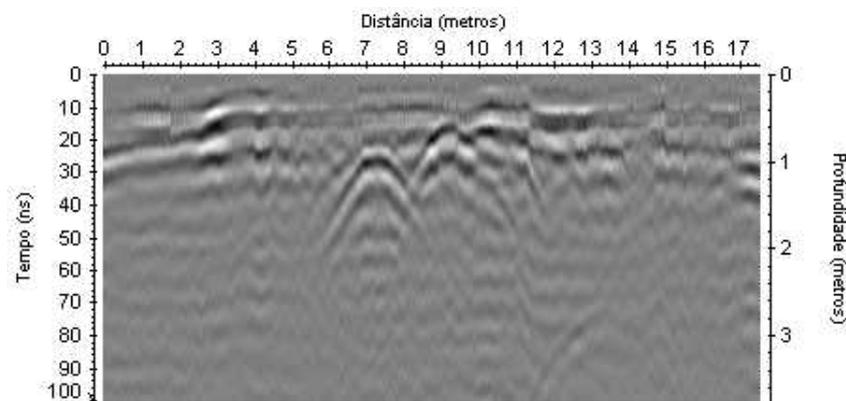


Figura 3.40: Perfil 1 processado ($v=0,075$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)		0,95	0,88	
Distância ao início do perfil (m)		7,3	9,3	

Tabela 3.7: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1.

- Perfil 2

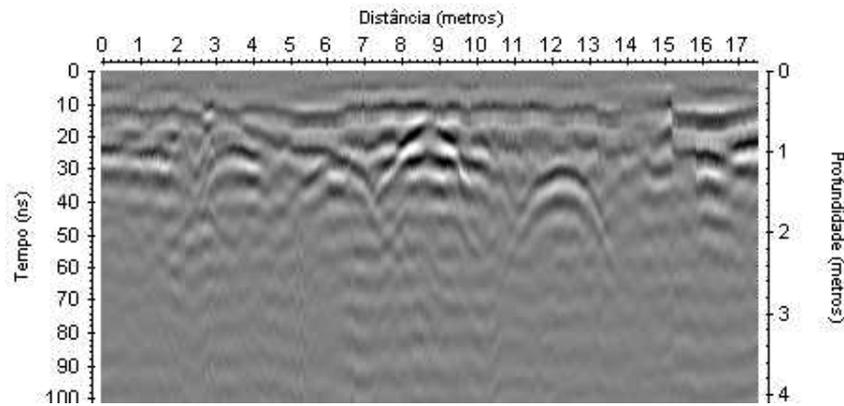


Figura 3.41: Perfil 2 processado ($v=0,078$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	1,14	1,3	1,14	1,53
Distância ao início do perfil (m)	3,5	6,3	8,7	12,3

Tabela 3.8: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2.

- Perfil 3

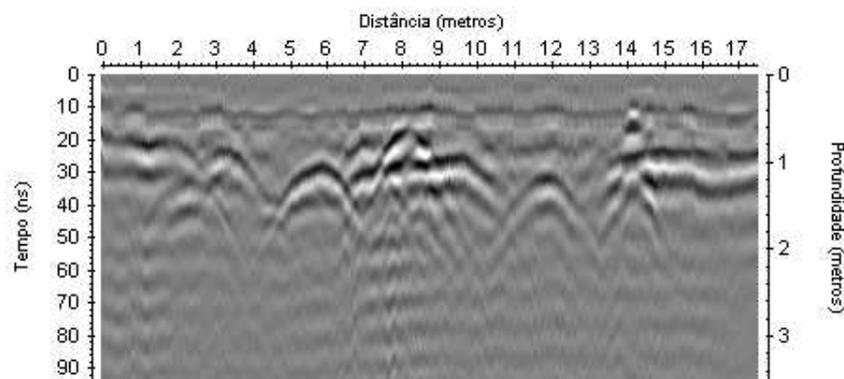


Figura 3.42: Perfil 3 processado ($v=0,074$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	1,54	1,22	0,9	1,34
Distância ao início do perfil (m)	2,8	5,9	8,2	11,9

Tabela 3.9: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3.

- Perfil 4

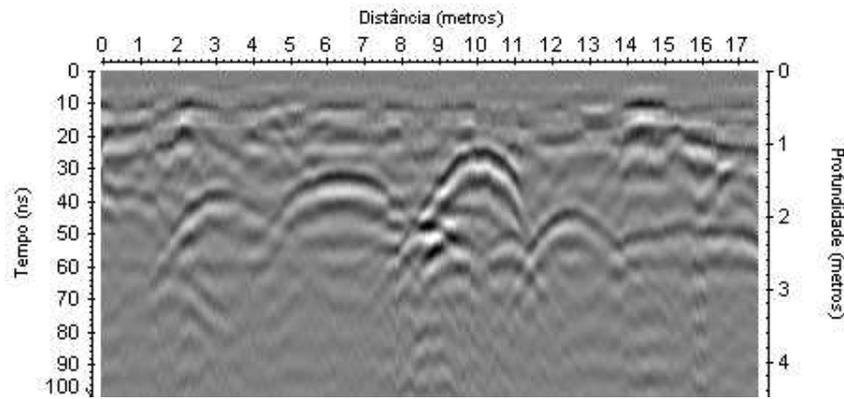


Figura 3.43: Perfil 4 processado ($v=0,091$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	1,75	1,49	1,27	2,01
Distância ao início do perfil (m)	3,1	6,4	10,1	12,6

Tabela 3.10: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4.

- Perfil 5

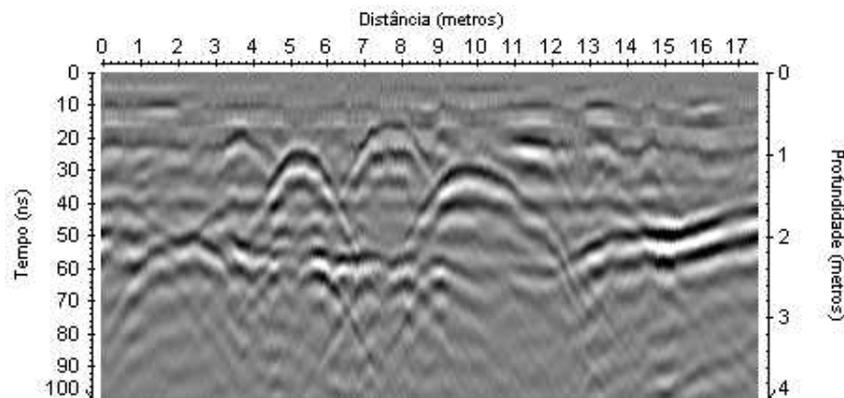


Figura 3.44: Perfil 5 processado ($v=0,084$ m/ns).

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	2,21	1,15	1,02	1,56
Distância ao início do perfil (m)	2,4	5,3	7,7	9,9

Tabela 3.11: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5.

3.3.2 GPR Easy Locator

O segundo GPR utilizado foi o Easy Locator. Este equipamento é um tipo de GPR dedicado ao mapeamento de utilidades em subsuperfície e fornece imagens prontas de radargramas, os quais já sofreram algum processamento. Com o Easy Locator foram levantados mais 10 perfis sobre as mesmas linhas utilizadas na aquisição com o Ramac. Sendo assim, apresentamos os resultados do levantamento com o GPR Easy Locator na localização de tubulações enterradas na travessia do Rio Quiricó.

- Perfil 1a

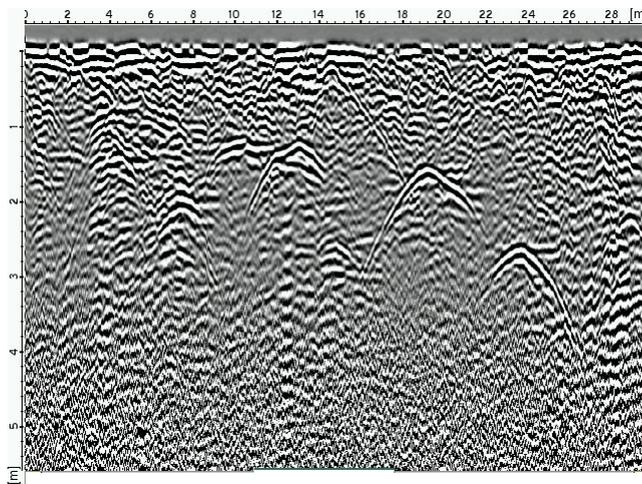


Figura 3.45: Perfil 1a processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)				1,30
Distância ao início do perfil (m)				13

Tabela 3.12: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1a.

- Perfil 2a

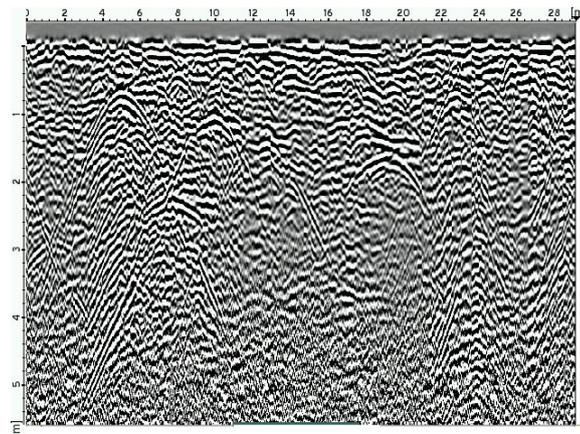


Figura 3.46: Perfil 2a processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,8	0,5	1,0	1,6
Distância ao início do perfil (m)	5	8	10	13

Tabela 3.13: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2a.

- Perfil 3a

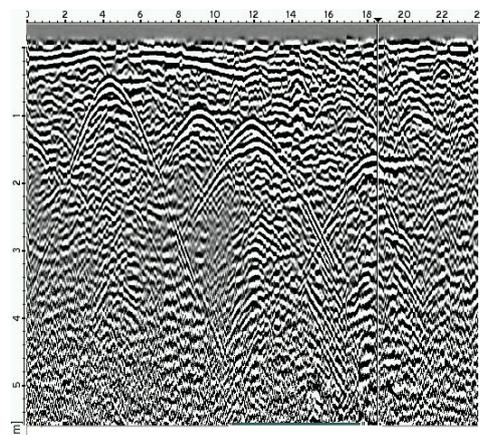


Figura 3.47: Perfil 3a processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,5		1,0	1,4
Distância ao início do perfil (m)	4,4		9	12

Tabela 3.14: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3a.

- Perfil 4a

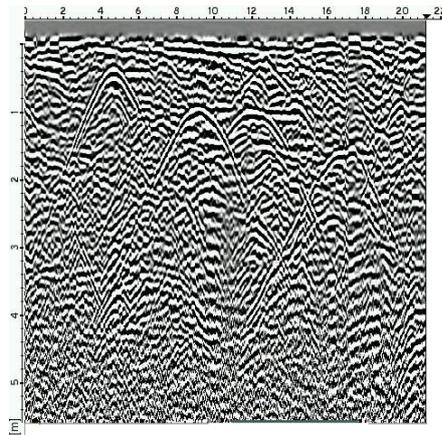


Figura 3.48: Perfil 4a processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,4		1,0	1,0
Distância ao início do perfil (m)	4,4		9,2	12

Tabela 3.15: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4a.

- Perfil 5a

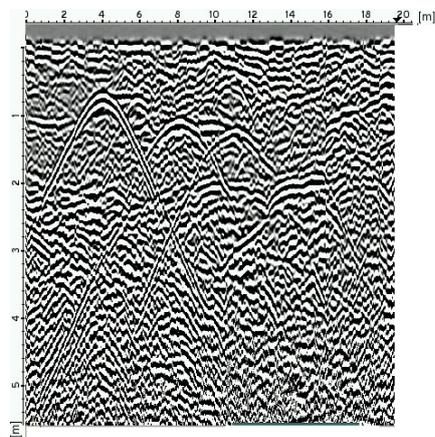


Figura 3.49: Perfil 5a processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,8	1,1	1,3	
Distância ao início do perfil (m)	4	8	10,4	

Tabela 3.16: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5a.

- Perfil 1

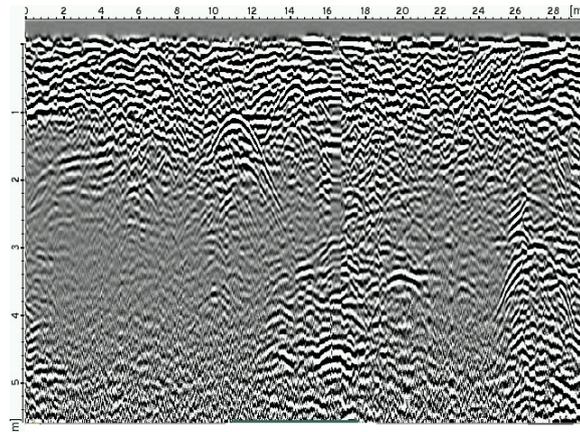


Figura 3.50: Perfil 1 processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)			1,0	
Distância ao início do perfil (m)			10,4	

Tabela 3.17: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 1.

- Perfil 2

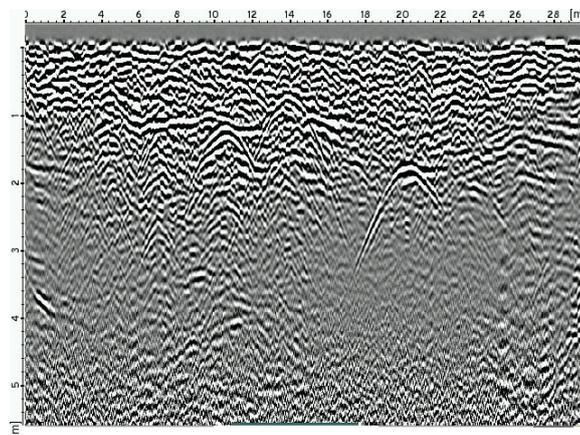


Figura 3.51: Perfil 2 processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	0,8	1,3	1,2	0,8
Distância ao início do perfil (m)	4,4	7	10,4	14

Tabela 3.18: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 2.

- Perfil 3

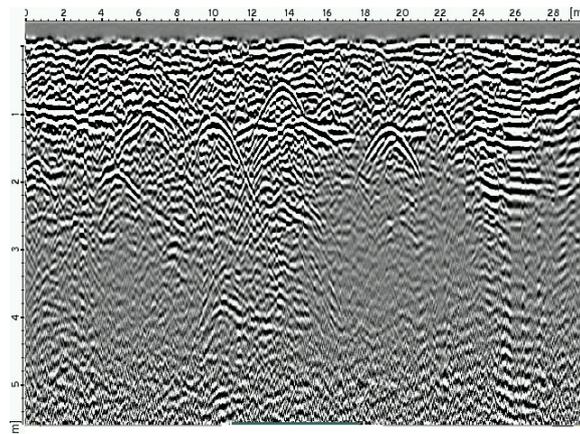


Figura 3.52: Perfil 3 processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)		1,0	1,2	0,7
Distância ao início do perfil (m)		6,4	10	14

Tabela 3.19: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 3.

- Perfil 4

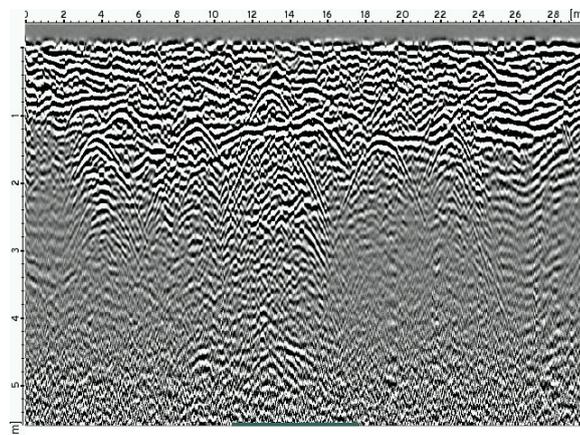


Figura 3.53: Perfil 4 processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	1,4		1,2	0,8
Distância ao início do perfil (m)	4		9	13

Tabela 3.20: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 4.

- Perfil 5

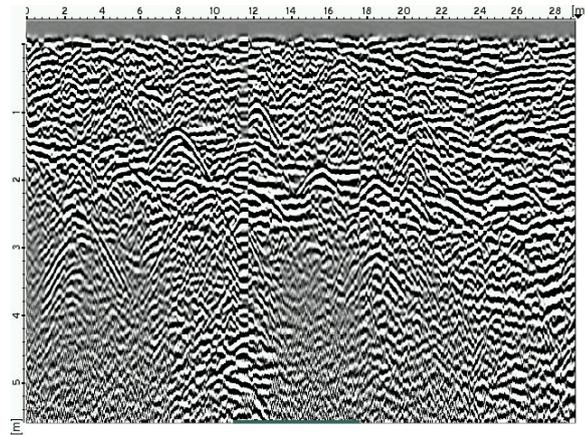


Figura 3.54: Perfil 5 processado pelo Easy Locator.

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
Profundidade (m)	2,6	1,6	1,3	1,0
Distância ao início do perfil (m)	2,4	5	8	12

Tabela 3.21: Localização dos dutos no radargrama referente ao Perfil 5.

3.3.3 Método PCM

Este método serviu de referência aos resultados obtidos com GPR na detecção e definição da profundidade de dutos dos gasodutos. Esta técnica é dedicada à localização de dutos metálicos e é muito utilizada por engenheiros em trabalhos geotécnicos.

Conforme os objetivos do Projeto, foi utilizado tão somente o *modo de localização* (Exemplo ilustrativo - Figura 3.55), cujo intuito foi identificar a presença dos dutos, dentro dos limites da Faixa de Dutos da Transpetro, determinando seu posicionamento, como também sua profundidade estimada.



Figura 3.55: Exemplo ilustrativo do modo de localização com PCM (pipe locator).

Na execução dos trabalhos de campo, o equipamento foi deslocado lateralmente ao longo do alinhamento estabelecido, transversal à Faixa de Dutos, sendo anotada a profundidade estimada do duto quando o sensor indicava a existência do mesmo no visor do instrumento (Exemplo Figura 3.56).

Assim, obedecendo às especificações do Projeto, foram efetuadas medições nas duas margens dos corpos d'água, portanto, na lateral de acesso e no seu lado oposto, como pode ser observado no croqui da Figura 3.2 na página 35.

Desta forma, os perfis executados com o PCM, tiveram seus posicionamentos de acordo com as linhas GPR executadas (acrescentando um perfil em cada margem e um perfil a 65 m do rio), estabelecidas previamente por GPS, e dispostos nas seguintes distâncias a partir do corpo d'água:

- Perfil Margem (borda do corpo d'água);
- Perfil 0 m [perfil 1 ou 1a do GPR];

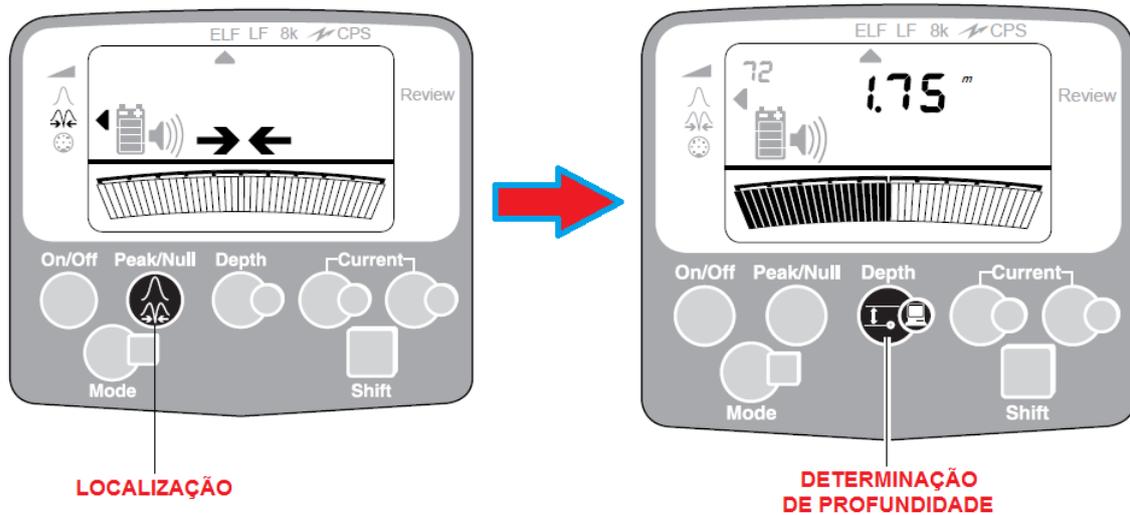


Figura 3.56: Exemplo de indicação de localização e profundidade no visor do PCM.

- Perfil 10 m [perfil 2 ou 2a do GPR];
- Perfil 20 m [perfil 3 ou 3a do GPR];
- Perfil 30 m [perfil 4 ou 4a do GPR];
- Perfil 50 m [perfil 5 ou 5a do GPR];
- Perfil 65 m (apenas um perfil no lado oposto ao acesso).

Sendo assim, apresentamos os resultados do levantamento com o método PCM na localização de tubulações enterradas na travessia do Rio Quiricó. Cabe mencionar que na posição onde o equipamento não localizou o duto foi descrito como “ - ”. Além disso, as leituras que estavam com uma grande variação nos valores da profundidade foram identificadas com o caractere “ * ”. Para esses pontos escolhemos um valor intermediário da variação (valor médio).

No lado do **acesso**, as profundidades dos dutos, em metros, podem ser vistas na Tabela 3.22.

Perfil	50 m	30 m	20 m	10 m	0 m	Margem do Rio
Duto 1	2,12	0,87	0,95	1,19	1,85	0,85
Duto 2	2,68	1,34	1,35	1,34	1,55	0,90
Duto 3	2,50	1,49	1,41	1,39	1,65	0,72
Duto 4	7,50*	2,70	2,50	2,78	2,30	-

Tabela 3.22: Profundidade dos dutos no lado do acesso, com o método PCM.

No lado **oposto** ao acesso, as profundidades dos dutos, em metros, podem ser vistas na Tabela 3.23.

Perfil	65 m	50 m	30 m	20 m	10 m	0 m	Margem do Rio
Duto 1	3,02	3,30	1,65	2,10	2,34	2,40	0,35
Duto 2	1,51	1,90	1,39	1,37	1,37	1,25	1,00
Duto 3	1,97	2,48	1,87	2,40	2,39	-	2,40
Duto 4	1,80	3,30	1,20	1,93	1,60	3,50*	-

Tabela 3.23: Profundidade dos dutos no lado oposto ao acesso, com o método PCM.

3.3.4 Comparações entre os resultados

Após a análise e processamento dos dados, construiu-se as Tabelas comparando as profundidades obtidas com os três equipamentos em cada perfil. Quando o duto não foi localizado com um equipamento, o espaço correspondente aos dados na tabela foi deixado em branco. Além disso, as leituras que estavam com uma grande variação nos valores da profundidade foram identificadas com o caractere “ * ”. Para esses pontos determinamos o valor médio entre as medidas.

No lado do **acesso**, temos:

- Perfil 1a

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC				1,83
EASY LOCATOR				1,30
PCM	1,85	1,55	1,65	2,30

Tabela 3.24: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 2a

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	1,11	1,30	1,38	1,82
EASY LOCATOR	0,8	0,5	1,0	1,6
PCM	1,19	1,34	1,39	2,78

Tabela 3.25: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 3a

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	0,88	1,21	1,38	1,86
EASY LOCATOR	0,5		1,0	1,4
PCM	0,95	1,35	1,41	2,50

Tabela 3.26: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 4a

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	0,86	1,34	1,42	1,92
EASY LOCATOR	0,4		1,0	1,0
PCM	0,87	1,34	1,49	2,70

Tabela 3.27: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 5a

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	1,38	1,69	1,82	2,42
EASY LOCATOR	0,8	1,1	1,3	
PCM	2,12	2,68	2,50	7,50*

Tabela 3.28: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

No lado **oposto** ao acesso, temos:

- Perfil 1

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC		0,95	0,88	
EASY LOCATOR			1,0	
PCM	2,40	1,25		3,50*

Tabela 3.29: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 2

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	1,14	1,3	1,14	1,53
EASY LOCATOR	0,8	1,3	1,2	0,8
PCM	2,34	1,37	2,39	1,60

Tabela 3.30: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 3

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	1,54	1,22	0,9	1,34
EASY LOCATOR		1,0	1,2	0,7
PCM	2,10	1,37	2,40	1,93

Tabela 3.31: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 4

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	1,75	1,49	1,27	2,01
EASY LOCATOR	1,4		1,2	0,8
PCM	1,65	1,39	1,87	1,20

Tabela 3.32: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

- Perfil 5

	DUTO 1	DUTO 2	DUTO 3	DUTO 4
RAMAC	2,21	1,15	1,02	1,56
EASY LOCATOR	2,6	1,6	1,3	1,0
PCM	3,3	1,90	2,48	3,30

Tabela 3.33: Comparação entre as profundidades encontradas com os três equipamentos.

A partir da análise dessas tabelas e dos radargramas, é possível tirar algumas conclusões. No lado do acesso, os resultados obtidos sobre a profundidade dos dutos enterrados, com os métodos do PCM e do GPR Ramac, foram concordantes, apresentando, na maioria das vezes, valores próximos. Entretanto, quando comparados com o GPR Easy Locator, os erros, ou diferenças, atingem valores mais significantes. Por exemplo, no perfil 4a, o PCM indicou 0,87 m de profundidade para o duto 1, o Ramac indicou 0,86 m, enquanto que o Easy Locator mostrou apenas 0,4 m. Para os dutos 1,2 e 3, a diferença entre as profundidades obtidas com os equipamentos Ramac e PCM ficaram numa margem pequena de erro, menor ou igual a 10%, exceto, para o perfil 5a, que atinge o valor de 37%. Entretanto, para o duto 4, as diferenças foram bem maiores, chegando a erros de 35% no perfil 2a. Por sua vez, no lado oposto ao acesso, os resultados obtidos com os três equipamentos mostram-se com diferenças bem maiores em relação às profundidades das tubulações. Nas seções obtidas

neste lado do rio, podemos perceber a presença de um forte refletor variando entre 1 e 2 metros de profundidade, que pode ser interpretado como o nível de saturação de água no terreno. Sendo assim, a presença dessa interface contribuiu para a atenuação do sinal de GPR e também poderia contribuir para valores não muito confiáveis do PCM.

As profundidades dos dutos determinadas com os três equipamentos podem ser um pouco diferentes para o mesmo duto, isto acontece por causa de problemas com a definição do tempo zero ou na escolha das hipérbolas de difração para realização da análise de velocidade e, posteriormente, a conversão da seção em profundidade. Podemos citar também os erros associados aos equipamentos, por exemplo, no modo A-frame, os locais de desconformidades na estrutura do duto podem ser posicionados com precisão de até 1 m. No caso do GPR Easy Locator, para que ele faça todo o processamento de forma automática, o usuário precisa informar “a priori” o valor da constante dielétrica (e o equipamento calcula a velocidade) do meio estudado e este é um fator que ocasiona muitos erros. Neste aspecto, o estudo feito com o GPR Ramac, mostrou-se superior, pois durante o processamento dos dados foi realizada a análise da velocidade do pulso eletromagnético nas seções através de dois métodos (ajuste hiperbólico e colapso das hipérbolas com a migração).

Visando uma melhor compreensão do comportamento da velocidade do pulso eletromagnético na subsuperfície, foi realizado um estudo sobre as seções de radar obtidas com o GPR Ramac. Este estudo consistiu na determinação da velocidade da onda eletromagnética imediatamente acima de cada tubulação enterrada. Após esta fase de análise, construiu-se algumas tabelas que mostram os resultados encontrados. As velocidades foram determinadas através de dois métodos diferentes, o primeiro, utiliza o colapso das hipérbolas de difração com a aplicação da migração e, o segundo, utiliza o ajuste de tais hipérbolas por curvas hiperbólicas com velocidades conhecidas (faz-se a superposição das curvas). Além disso, para cada método, elaborou-se tabelas mostrando as velocidades médias em cada seção.

Os resultados obtidos para as velocidades, pelo método do colapso das hipérbolas com a migração, bem como as respectivas velocidades médias, em m/ns, podem ser visualizadas nas Tabelas 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37.

- Velocidades no lado do **acesso**

	PERFIL 1a	PERFIL 2a	PERFIL 3a	PERFIL 4a	PERFIL 5a
DUTO 1		0,090	0,085	0,090	0,120
DUTO 2		0,080	0,095	0,090	0,100
DUTO 3		0,088	0,085	0,090	0,100
DUTO 4	0,085	0,080	0,085	0,110	0,100

Tabela 3.34: Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo colapso das hipérbolas de difração com a migração.

- Velocidades no lado **oposto** ao acesso

	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	PERFIL 5
DUTO 1		0,085	0,075	0,085	0,080
DUTO 2	0,075	0,080	0,075	0,120	0,070
DUTO 3	0,075	0,090	0,075	0,085	0,085
DUTO 4		0,070	0,070	0,070	0,085

Tabela 3.35: Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo colapso das hipérbolos de difração com a migração.

- Velocidades médias no lado do **acesso**

	VELOCIDADE MÉDIA (m/ns)
PERFIL 1a	0,085
PERFIL 2a	0,085
PERFIL 3a	0,085
PERFIL 4a	0,095
PERFIL 5a	0,100

Tabela 3.36: Velocidade média em cada perfil.

- Velocidades médias no lado **oposto** ao acesso

	VELOCIDADE MÉDIA (m/ns)
PERFIL 1	0,075
PERFIL 2	0,081
PERFIL 3	0,074
PERFIL 4	0,090
PERFIL 5	0,080

Tabela 3.37: Velocidade média em cada perfil.

A análise dessas tabelas mostra que em cada perfil a velocidade do pulso eletromagnético não é constante, exceto no perfil 1 e 1a (perfis com grande atenuação do sinal de GPR), o que indica uma variação lateral de velocidade em cada seção. Além disso, percebe-se uma tendência no aumento do valor da velocidade à medida que nos afastamos das margens do rio, o que pode ser uma indicação dos efeitos da saturação de água no solo, no desempenho do GPR.

Os resultados obtidos para as velocidades, pelo método do ajuste das curvas hiperbólicas, bem como as respectivas velocidades médias, em m/ns, podem ser visualizadas nas Tabelas 3.38, 3.39, 3.40 e 3.41.

- Velocidades no lado do **acesso**

	PERFIL 1a	PERFIL 2a	PERFIL 3a	PERFIL 4a	PERFIL 5a
DUTO 1		0,090	0,085	0,090	0,120
DUTO 2		0,085	0,090	0,090	0,100
DUTO 3		0,075	0,100	0,090	0,100
DUTO 4	0,085	0,080	0,095	0,100	0,100

Tabela 3.38: Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo ajuste das hipérbolas de difração.

- Velocidades no lado **oposto** ao acesso

	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	PERFIL 5
DUTO 1		0,075	0,075	0,080	0,075
DUTO 2	0,075	0,075	0,075	0,120	0,075
DUTO 3	0,075	0,090	0,075	0,090	0,085
DUTO 4		0,070	0,070	0,075	0,100

Tabela 3.39: Velocidade do pulso eletromagnético em cada duto, obtido pelo ajuste das hipérbolas de difração.

- Velocidades médias no lado do **acesso**

	VELOCIDADE MÉDIA (m/ns)
PERFIL 1a	0,085
PERFIL 2a	0,083
PERFIL 3a	0,093
PERFIL 4a	0,093
PERFIL 5a	0,105

Tabela 3.40: Velocidade média em cada perfil.

- Velocidades médias no lado **oposto** ao acesso

	VELOCIDADE MÉDIA (m/ns)
PERFIL 1	0,075
PERFIL 2	0,078
PERFIL 3	0,074
PERFIL 4	0,091
PERFIL 5	0,084

Tabela 3.41: Velocidade média em cada perfil.

A análise dessas tabelas mostra que os resultados obtidos foram análogos aos encontrados pelo método do colapso das hipérbolas com a aplicação da migração.

Além disso, sendo que as velocidades foram determinadas através de dois métodos diferentes, é pertinente compará-los. O primeiro método utilizado foi o do colapso das hipérbolas de difração com a aplicação da migração. Este é um método computacional bastante robusto e mostrou-se capaz de determinar as velocidades do pulso de radar com boa precisão. O segundo método utilizado foi o do ajuste das hipérbolas de difração por curvas hiperbólicas com velocidades conhecidas (faz-se a superposição das curvas). Este é um método gráfico bastante simples e também mostrou-se capaz de determinar as velocidades do pulso de radar com boa precisão.

Encontramos diferenças entre as velocidades médias menores ou iguais a 5%, exceto, no perfil 3a, com uma diferença de 8,6%. Como as diferenças entre as velocidades determinadas através dos dois métodos foram muito pequenas e o tempo computacional na determinação das velocidades foi bem menor com o método do ajuste das hipérbolas, mediante uma avaliação do tempo disponível e das necessidades de cada projeto, sugerimos a aplicação deste método para proceder com a análise de velocidade.

CAPÍTULO 4

Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi determinar a presença e inferir a profundidade de dutos em subsuperfície a partir da interpretação de radargramas gerados com afastamento constante entre as antenas. A fim de alcançar tal objetivo, fez-se uma revisão geral sobre o método GPR, dando ênfase nos princípios físicos envolvidos, nas técnicas de aquisição, nas etapas básicas e avançadas do processamento, na análise e na interpretação dos dados obtidos. Além disso, foi apresentada uma breve contextualização histórica sobre o radar de penetração no solo e sobre o método PCM.

O primeiro equipamento utilizado para a aquisição dos dados nas proximidades do Rio Quiricó, na Bahia, foi o sistema RAMAC I. Em todos os 10 perfis levantados na área foi possível identificar a presença e inferir a profundidade de tubulações enterradas. A análise de alguns perfis possibilitou a identificação dos 4 dutos (100% de aproveitamento), enquanto outros só possibilitaram a identificação de 2 dutos (50% de aproveitamento). Por exemplo, após o processamento do perfil 1 (perfil mais próximo do rio), foi possível identificar a presença de 2 dutos através das hipérbolas de difração geradas pela incidência da onda eletromagnética nos dutos enterrados. Isto porque, quanto mais próximo das margens do rio, a saturação do terreno tende a aumentar e, com isso, há uma tendência no aumento da condutividade elétrica, que, por sua vez aumenta a atenuação do sinal devido às perdas de energia na forma de calor. Por outro lado, no perfil 3a, também processado, foi possível a identificação bem clara de 4 hipérbolas de difração que são correspondentes aos 4 dutos enterrados. Como este radargrama foi obtido a partir de um perfil adquirido numa porção do terreno mais distante das margens do rio, obtém-se uma resposta com qualidade superior quando comparado com o perfil 1. A atenuação do sinal foi menor, o que possibilitou a identificação de todos os dutos. Sendo assim, analisando a presença das hipérbolas nos diferentes perfis, observamos um menor número na beira do rio (1 ou 2) e que passa a crescer (3 ou 4) conforme nos afastamos do mesmo.

Como parte do processo de aprendizagem para a elaboração deste trabalho, foi feito o processamento dos 10 perfis obtidos nas proximidades do Rio Quiricó e, por questões de espaço e qualidade das respostas (radargramas), selecionou-se o perfil 4a para mostrar as etapas do processamento básico e avançado aplicadas aos dados. O fluxograma aplicado aos

dados contempla desde uma simples edição dos traços e aplicação de filtros, até etapas de análise de velocidade, conversão da seção em profundidade e migração. Utilizando a técnica de ajuste hiperbólico das difrações, foi possível gerar um campo de velocidades $V(x, t)$, o qual pôde ser interpretado para migrar e converter em profundidade as seções de radar registradas em tempo, com a finalidade de definir a geometria da subsuperfície. Portanto, a partir da utilização deste tipo de arranjo entre as antenas, foi possível investigar e analisar a qualidade das respostas (radargramas) em termos do número de dutos detectados. A interpretação da presença de tubos também foi realizada sobre seções de GPR migradas, nas quais o campo de velocidades aplicado na migração pôde ser testado pelo colapso das hipérboles de difração.

O campo de velocidades também foi determinado pelo método do colapso das hipérboles de difração com a aplicação da migração. Este é um método computacional bastante robusto e mostrou-se capaz de determinar as velocidades do pulso de radar com boa precisão. Entretanto, como as diferenças entre as velocidades determinadas através dos dois métodos foram muito pequenas e o tempo computacional na determinação das velocidades foi bem menor com o método do ajuste das hipérboles, mediante uma avaliação do tempo disponível e das necessidades de cada projeto, sugerimos a aplicação deste método para proceder com a análise de velocidade.

O segundo equipamento utilizado foi o Easy Locator. Ele é um tipo de GPR dedicado ao mapeamento de utilidades em subsuperfície e fornece os radargramas já processados. Com o Easy Locator foram levantados mais 10 perfis sobre as mesmas linhas utilizadas na aquisição com o Ramac. O Easy Locator mostrou-se eficiente na localização dos dutos, entretanto, na questão que diz respeito à determinação da profundidade dos mesmos, os resultados não foram tão bons se comparados com o Ramac e ou com o PCM. A inferência “a priori” da constante dielétrica usada no equipamento Easy Locator, a despeito da eficiência do mesmo em localizar dutos, causou erros graves na definição das profundidades. O PCM é uma técnica muito utilizada na geotecnia para a localização de tubulações metálicas enterradas e, neste trabalho, serviu como parâmetro de referência para testar as medidas de profundidades de dutos obtidas com os 2 equipamentos de GPR.

O método GPR teve a propriedade de localizar e inferir a profundidade de dutos enterrados. Notou-se que quanto mais próximo do rio, pior é a qualidade das respostas (radargramas) do meio e, com isso, recomenda-se que este método geofísico seja aplicado em solos mais resistivos (baixo teor de argilominerais) e com o menor teor de umidade possível. Além disso, a fim de reduzir eventuais ambiguidades durante o processo interpretativo, sugere-se a utilização concomitante com outros métodos geofísicos/geotécnicos disponíveis.

Agradecimentos

À Deus por estar perto de mim nesta caminhada.

À minha família, em especial a minha mãe pelo constante apoio, incentivo e investimento.

Ao CPGG/UFBA pela oportunidade de concretizar mais um importante passo na minha vida acadêmica.

Ao professor Marco Antônio Barsottelli Botelho, meu orientador, pela paciência, compreensão, incentivo e ensinamentos, os quais, foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos integrantes da banca examinadora pelas críticas e sugestões que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

Aos professores do CPGG/UFBA pelos valiosos ensinamentos.

À uma certa Florzinha (Alice Chan) pela paciência, compreensão, incentivo e carinho.

Aos funcionários do CPGG/UFBA.

Referências

- Annan, A.P. (1973) *Radio Interferometry Depth Sounding: Part I - Theoretical Discussion*, Geophysics, Vol. 38, P. 557-580.
- Annan, A.P. and Davis, J.L. (1976) *Impulse Radar Soundings in Permafrost*, Radio Science, Vol. 11, pp. 383-394.
- Annan, A.P., Davis, J.L. and Gendzwill, D. (1988) *Radar Sounding in Potash Mines: Saskatchewan, Canada*, Geophysics, Vol. 53, pp. 1556-1564.
- Annan, A.P. and Chua, L.T. (1992) *Ground Penetrating Radar Performance Predictions*, The Geological Survey of Canada, Paper 90-4, pp. 5-13.
- Annan, A.P. (1993) *Practical processing of GPR data*, Proceedings of the Second Government Workshop on Ground-Penetrating Radar, Columbus, Ohio.
- Annan, A.P., Davis, J.L. and Johnston, G.B. (1997) *Maximizing 3D GPR Image Resolution: A Simple Approach*, Proceedings of the High Resolution Geophysics Workshop, University of Arizona, Tucson, AZ, January 6-9, 1997.
- Annan, A.P. (1999) *Practical processing of GPR data*, Sensors and Software Inc, Mississauga, ON, Canada.
- Annan, A.P. (2002) *The history of Ground penetrating radar. Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Vol. 3, N. 4, October, pp. 303-320.
- Annan, A.P. (2003) *Ground penetrating radar: Principles, procedures and applications*, Sensors and Software Inc. Technical Paper.
- Annan, A.P. (2009) *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Archie, G.E. (1942) *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, Trans. AIME, Vol. 146, pp. 54-62.
- Arcone, S.A. (2009) *Glaciers and Ice Sheets*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Benson, R.C., Glaccum, R.A. and Noel, M.R. (1984) *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*, US EPA Contract No. 68-03-3053. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Office of R&D. US EPA, Las Vegas, Nevada 89114. 236p.

- Bevan, B. and Kenyon, J. (1975) *Ground-penetrating radar for historical archaeology*, MASCA Newsletter, Vol. 11, no. 2, pp. 2-7.
- Botelho, M.A.B. e Pestana, R. (1997) *Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea*, Rev. Bras. Geof. V. 15, N. 1, Março, São Paulo.
- Brewster, M.L. and Annan, A.P. (1994) *Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar*, Geophysics, Vol. 59, P. 1211-1221.
- Bridge, J. (2009) *Advances in Fluvial Sedimentology using GPR*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Bristow, C.S. and Jol, H.M. (2003) *Ground Penetrating Radar in Sediments*, Geological Society, London, Special Publications, 211.
- Bristow, C. (2009) *Ground Penetrating Radar in Aeolian Dune Sands*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Buynevich, I.V., Jol, H.M. and FitzGerald, D.M. (2009) *Coastal Environments*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Cassidy, N.J. (2009) *Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Cassidy, N.J. (2009) *Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Cook, J.C. (1973) *Radar Exploration Through Rock in Advance of Mining*, Trans. Society Mining Engineers, AIME, V. 254, pp. 140-146.
- Coon, J.B., Fowler, J.C. and Schafers, C.J. (1981) *Experimental Uses of Short Pulse Radar in Coal Seams*, Geophysics, Vol. 46, No. 8, pp. 1163-1168.
- Daniels, D.J. (2009) *Antennas*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Darracott, B. W. and Lake, M. I. (1981) *An initial appraisal of ground probing radar for site investigation*, in Britain, Ground Engineering, pp. 14-18.
- Davis, J.L., Annan, A.P., Black, G. and Leggatt, C.D. (1985) *Geological sounding with low frequency radar*, in Extended Abstracts, 55th Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Washington, D.C.

- Davis, J.L. and Annan, A.P. (1986) *Borehole Radar Sounding in CR-6, CR-7 and CR-8 at Chalk River, Ontario*, Technical Record TR-401, Atomic Energy of Canada Ltd.
- Davis, J.L. and Annan, A.P. (1989) *Ground Penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*, Geophysical Prospecting, Vol. 37, pp. 531-551.
- Dolphin, L.T., et al. (1978) *Radar Probing of Victorio Peak, New Mexico*, Geophysics, Vol. 43, No. 7, p. 1441-1448.
- Doolittle, J.A. (1987) *Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys*, Soil Survey Techniques, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, Special Publication no. 20, pp. 11-32.
- Doolittle, J.A. and Asmussen, L.E. (1992) *Ten years of applications of Ground Penetrating Radar by United States Department of Agriculture*, Proceedings of the Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Geological Survey of Finland, Special Paper 16, p. 139-147.
- Doolittle, J.A. and Butnor, J.R. (2009) *SOILS, PEATLANDS, AND BIOMONITORING*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Dougherty, M.E., Micheals, P., Pelton, J.R. and Liberty, L.M. (1994) *Enhancement of ground penetrating radar data through signal processing*, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 94), Boston, USA, pp. 1021-1028.
- El Said, M.A.H. (1956) *Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes*, Proc. I.R.E., Vol. 44, pp. 24-30 and 940.
- Fisher, E., McMechan, G.A. and Annan, A.P. (1992a) *Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data*, Geophysics, Vol. 57, N. 3, p. 495-504.
- Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P. and Cosway, S.W. (1992b) *Examples of reverse-time migration of single-channel, ground-penetrating radar profiles*, Geophysics, Vol. 57, N. 4, pp. 577-586.
- Fisher, C.S., Stewart, R.R. and Jol, H.M. (1994) *Processing ground penetrating radar data*, Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 94), Canada, pp. 661-675.
- Gerlitz, K., Knoll, M.D., Cross, G.M., Luzitano, R.D. and Knight, R. (1993) *Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets*, Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Diego, California.
- Grasmueck, M. (1996) *3-D Ground-Penetrating Radar Applied to Fracture Imaging in Gneiss*, Geophysics, Vol. 61, pp. 1050-1064.

- Goodman, D. (1994) *Ground-Penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology*, Geophysics, Vol. 59, pp. 224-232.
- Goodman, D., Piro, S., Nishimura, Y., Schneider, K., Hongo, H., Higashi, N., Steinberg, J. and Damiata, B. (2009) *GPR Archaeometry*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Holliger, K. and Bergmann T. (2000) *Finite-difference modelling of borehole georadar data*, in press, Geophysics.
- Holser, W.T., Brown, R.J.S., Roberts, F.A., Fredriksson, O.A. and Unterberger, R.R. (1972) *Radar logging of a salt dome*, Geophysics, 37, P. 889-906.
- Hulsenbeck and Co. (1926) *German patent no. 489434*.
- Hulsmeyer, C. (1904) *German patent no. 165546*.
- Jol, H. (1996) *Digital Ground Penetrating Radar (GPR): A New Geophysical Tool for Coastal Barrier Research (Examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts U.S.A.)*, Journal of Coastal Research, Fall 1996.
- Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Koppenjan, S. (2009) *Ground Penetrating Radar Systems and Design*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of Wisconsin-Eau Claire, USA.
- Lampe, B. and Holliger, K. (2000) *Finite-difference modelling of ground-penetrating radar antenna radiation*, 556 bis 560, Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia, May 23-26, 2000.
- Leggo, P. J. and Leech, C. (1983) *Subsurface investigations for shallow mine workings and cavities by the ground impulse radar technique*, Ground Engineering, Vol. 16, pp. 20-23.
- Lehmann, F., Horstmeyer, H., Green, A., Sexon, J. and Coulybaly, M. (1996) *Georadar data from the northern Sahara Desert: Problems and processing strategies*, Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR96), Japan, pp. 51-56.
- Leimbach, G. and Lowy, H. (1910) *German patent no. 237944*.
- Maijala, P. (1992) *Application of Some Seismic Data Processing Methods to Ground Penetrating Radar Data*, Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar June 8-13, 1992, Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 16, 365 pages.
- Malagodi, S., Orlando, L. and Piro, S. (1996) *Approaches to increase resolution of radar signal*, Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR96), Japan, pp. 83-88.

- Moran, M., Arcone, S.A., Delaney, A.J. and Greenfield, R. (1998) *3-D migration/array processing using GPR data*, Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 98), USA, pp. 225-231.
- Morey, R.M. (1974) *Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar*, Proceedings of Engineering Foundations Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavations and Heavy Construction, Henniker, N.H. p. 213-232.
- Olhoeft, G.R. (1975) *The Electrical Properties of Permafrost*, Ph.D. Thesis, University of Toronto, 172 pages.
- Olhoeft, G.R. (2000) *Maximizing the information return from ground penetrating radar*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, pp.175-187.
- Owen, T.R. (1981) *Cavity Detection Using VHF Hole to Hole Electromagnetic Techniques*, Proceedings of the Second Tunnel Detection Symposium, Colorado School of Mines, Golden CO, July 21-23, 1981, U.S. Army MERADOM, Ft. Belvoir, VA, pp. 126-141.
- Redman, J.D. (2009) *Contaminant Mapping*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Reynolds, J. M. (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, England.
- Roberts, R.L. and Daniels, J.J. (1996) *Analysis of GPR Polarization Phenomena*, JEEG, vol. 1, no. 2, p. 139-157.
- Rubin, Y. and Hubbard, S.S. (eds) (2005) *Hydrogeophysics*, Springer, Dordrecht, The Netherlands. Kluwer.
- Saarenketo, T. (2009) *NDT Transportation*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Simmons, G., Strangway, D., Annan, A.P., Baker, R., Bannister, L., Brown, R., Cooper, W., Cubley, D., deBettencourt, J., England, A.W., Groener, J., Kong, J.A., LaTorraca, G., Meyer, J., Nanda, V., Redman, J.D., Rossiter, J., Tsang, L., Urner, J. and Watts, R. (1973) *Surface Electrical Properties Experiment*, in Apollo 17: Preliminary Science Report, Scientific and Technical Office, NASA, Washington, D.C., pp. 15-1 - 15-4.
- Slater, L. and Comas, X. (2009) *The Contribution of Ground Penetrating Radar to Water Resource Research*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Theirbach, R. (1974) *Electromagnetic Reflections in Salt Deposits*, J. Geophys. 40, P. 633-637.

- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) *Electromagnetic determination of soil water content*, Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research, Vol. 16, N. 3, pp. 574-582.
- Ulriksen, C.P.F. (1982) *Application of Impulse Radar to Civil Engineering*, Unpublished Ph.D. Thesis, Dept. of Engr, Geol., U. of Technology, Lund, Sweden, p. 175.
- Unterberger, R.R. (1978) *Radar propagation in rock salt*, Geophys. Prosp., 26, P. 312-328.
- Waite, A.H. and Schmidt, S.J. (1961) *Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow*, IRE International Convention Record, Part 5, pp. 38-54.
- Ward, S.H., Phillips, R.J., Adams, G.F., Brown, Jr., W.E., Eggleton, R.E., Jackson, P., Jordan, R., Linlor, W.I., Peeples, W.J., Porcello, L.J., Ryu, J., Schaber, G., Sill, W.R., Thompson, S.H. and Zelenka, J.S. (1972) *Apollo Lunar Sounder Experiment*, in Apollo 17: Preliminary Science Report, Scientific and Technical Office, NASA, Washington, D.C., p. 22-1 - 22-26.
- Watts, R.D. and England, A.W. (1976) *Radio-echo Sounding of Temperate Glaciers: Ice Properties and Sounder Design Criteria*, Journal of Glaciology, Vol. 21, No. 85, pp. 39-48.
- Yarovoy, A. (2009) *Landmine and Unexploded Ordnance Detection and Classification with Ground Penetrating Radar*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA. In: Jol, Harry M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier. University of wisconsin-Eau Claire, USA.
- Yilmaz, O. (2001) *Seismic data analysis: Processing inversion and interpretation or Seismic Data*, Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, USA.
- Zeng, X., McMechan, G.A., Cai, J. and Chen, H.W. (1995) *Comparison of Ray and Fourier Methods for Modeling Monostatic Ground-Penetrating Radar Profiles*, Geophysics Vol. 60, pp. 1727-1734.