



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROCESSAMENTO E MODELAGEM DE DADOS DE GPR UTILIZANDO O
REFLEXW 4.5**

CARLA PATRÍCIA QUEIROZ FURTADO

BELÉM-PARÁ

2009



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

CARLA PATRÍCIA QUEIROZ FURTADO

**PROCESSAMENTO E MODELAGEM DE DADOS DE GPR UTILIZANDO O
REFLEXW 4.5**

**BELÉM-PARÁ
2009**

CARLA PATRÍCIA QUEIROZ FURTADO

**PROCESSAMENTO E MODELAGEM DE DADOS DE GPR UTILIZANDO O
REFLEXW 4.5**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geofísica do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará,
em cumprimento às exigências para a obtenção
de grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Marcos Welby Correa Silva

**BELÉM-PARÁ
2009**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Furtado, Carla Patrícia Queiroz

F992p Processamento e modelagem de dados de GPR utilizando o
Reflexw 4.5. / Carla Patrícia Queiroz Furtado. – 2009
41 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) –
Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Pará, Belém, Primeiro Semestre de 2009.

Orientador, Marcos Welby Correa Silva.

1. Ground Penetrating Radar (GPR). 2. REFLEXW. 3.
Geofísica aplicada. I. Universidade Federal do Pará. II. Silva,
Marcos Welby Correa, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.: 621.3848

CARLA PATRÍCIA QUEIROZ FURTADO

**PROCESSAMENTO E MODELAGEM DE DADOS DE GPR UTILIZANDO O
REFLEXW 4.5**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geofísica do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará,
em cumprimento às exigências para a obtenção
de grau de Bacharel em Geofísica.

Data de aprovação: ____/____/____
Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. Marcos Welby Correa Silva- Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Cícero Roberto Teixeira Régis - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Eng. Alberto Leandro de Melo
Mestre em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais, Patrícia e Admar;
e irmão, Frank.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Patrícia pela dedicação, força, compreensão e paciência demonstrada. Ao meu pai Admar, pelo incentivo e apoio. Ao meu irmão pelo companheirismo.

Aos pais-avós Iva e Queiroz (Di) pelo carinho e ajuda quando necessária. A minha tia Celianne (Cé) e primo Renato pelo carinho.

Ao meu estimado orientador Marcos Welby Correa Silva pela oportunidade, credibilidade, apoio e compreensão.

Aos meus professores da Faculdade de Geofísica, Cícero Teixeira Régis, José Gouvêa Luiz e João Henrique pela competência no ato de ensinar e valiosas lições ao longo do Curso de Geofísica. Ao Prof. José Geraldo das Virgens Alves pela oportunidade de monitoria. E em especial a Prof.^a Lúcia Maria da Costa e Silva pelos valiosos conselhos e pela chance de participar do projeto Divulgando Geofísica.

Ao Welitom Borges (Geopesquisa) pelo imensurável auxílio disponibilizando os dados, que sem estes não seria possível a realização deste trabalho. Além das dicas de processamento e modelagem dos dados com o Reflexw.

Aos colegas de Graduação e Pós-Graduação em Geofísica, em especial ao Elias (Maluco), Thiago Rosa (Saint pink), Odinei Júnior (Odin), Ana Araújo (Frau), Larissa Beatriz (Bia), Anderson Costa (Carteiro), Diego Miranda (Filhão), Gerson Pompeu, Edelson Luz, Herbert (Moicano), Alex Raiol, Ângelo (Japônes) e Maiton (Haroldo) pelos momentos de descontração, pela ajuda e incentivo no decorrer do curso.

A Danusa Mayara (Dandan), em especial, pela ajuda incondicional, paciência imensurável, conselhos, conversas e boas risadas.

Aos meus queridos amigos Diogo (Camelo), Luiz (Bu), Ciro (Cirolee) e Marcelo (Tchelo) por compartilhar as alegrias e as tristezas, dividir as incertezas, conselhos, ajudas, discussões e pelas inúmeras tentativas de conquistar o mundo.

Ao meu namorado Saulo pelo companheirismo, carinho, apoio e compreensão nos momentos mais difíceis, entendendo minhas ausências, meus anseios e angústias.

Aos momentos de descontração compartilhados por amigos e colegas de curso no Restaurante Universitário (RU), Vadião e Mormaço.

Enfim, agradeço a todos que participaram e acompanharam direta e indiretamente no decorrer deste trabalho.

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas.”

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

Neste trabalho realizamos o processamento, interpretação e a modelagem de um perfil de dado de *Ground Penetrating Radar* (GPR) obtido em Cariacica/ES, Brasil utilizando o *software* REFLEXW[®] 4.5. Os objetivos desse estudo foram apresentar as etapas do processamento de dados GPR, realizar uma interpretação com base nas características de reflexão nas interfaces das estruturas geo-elétricas e demonstrar o desempenho deste *software* na modelagem de dados de GPR. Este trabalho apresenta dois experimentos construídos com o módulo de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) do REFLEXW. O primeiro experimento caracteriza-se pelo uso da fonte “refletor explosivo” e o segundo pela aplicação da fonte “onda plana”, ambas fontes de energia eletromagnética. O resultado desse estudo está em concordância tanto com os dados obtidos em campo como aqueles publicados na literatura.

Palavras - chave: Ground Penetrating Radar (GPR). REFLEXW. Geofísica Aplicada.

ABSTRACT

In this work we perform the processing, interpretation and modeling of a GPR (Ground Penetrating Radar) profile obtained in Cariacica, ES, Brazil. We use the REFLEXW[®] 4.5 software. Our objectives were to present the processing steps, to interpret the data based on the reflection characteristics on the interfaces in the geo-electric structures and to demonstrate the performance of the software when modeling GPR data. We present two experiments, both built with the Finite Differences Time Domain (FDTD) module in the REFLEXW software. The first experiment employs the “explosive reflector” source while the second is done with a “plane wave” source. Our results are in agreement with the field data as well as with those published in the GPR literature.

Key-Words: Ground Penetrating Radar (GPR). REFLEXW. Applied Geophysics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Técnicas de aquisições com GPR: (a) Commom Offset, (b) Sondagens de Velocidade, (c) Trans-iluminação.....	17
Figura 2 - Exemplo de radargrama.....	18
Figura 3.1 - Localização da área de estudo.....	24
Figura 3.2 - Exemplo de configurações de reflexão de radargramas de acordo com a litologia e estratigrafias de sedimentos glaciais.....	28
Figura 3.3 - Etapas do processamento do perfil 1 (Cariacica/ES): a) Dado Bruto, (b) Static correction, (c) Dewow, (d) Fk filter.....	30
Figura 3.4 - Etapas do processamento do perfil 1 (Cariacica/ES): <i>Background removal</i> ..	31
Figura 3.5 - Etapas do processamento do perfil 2 (Cariacica/ES): (a) Dado Bruto, (b) <i>Static correction</i> , (c) <i>Dewow</i> , (d) <i>Fk filter</i>	32
Figura 3.6 - Etapas do processamento do perfil 2 (Cariacica/ES): Etapas do processamento do perfil 2 (Cariacica/ES): (a) <i>Background removal</i> , (b) <i>Gain Manual</i>	33
Figura 4.1 - Modelo geológico.....	34
Figura 4.2 - Dado sintético 1 não processado.....	37
Figura 4.3 - Dado sintético 1 processado.....	37
Figura 4.4 - Dado sintético 2 não processado.....	38
Figura 4.5 - Dado sintético 2 processado.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da Profundidade Máxima de Penetração em função da Frequência Central das Antenas	15
Tabela 2 - Vertical Teórica em função da Frequência Central das Antenas.....	18
Tabela 3 - Propriedades físicas dos alvos utilizados na construção dos modelos	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	METODOLOGIA.....	14
2.1	O MÉTODO <i>GROUND PENETRATING RADAR</i> (GPR).....	14
2.2	PRINCÍPIOS METODOLÓGICOS.....	14
2.3	PRINCÍPIOS FÍSICOS DO MÉTODO GPR.....	19
2.3.1	Relações Constitutivas do Meio.....	19
2.3.2	Velocidade de Propagação da Onda Eletromagnética.....	20
2.3.3	Perdas da Energia do Sinal de GPR.....	21
3	PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR.....	24
3.1	PROCESSAMENTOS DE DADOS DE GPR.....	24
3.1.1	Etapas do Processamento.....	25
3.2	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE GPR.....	27
3.3	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CARIACICA/ES.....	29
3.3.1	Perfil 1.....	29
3.3.2	Perfil 2.....	31
4	MODELAGEM DE DADOS DE GPR.....	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MODELAGEM.....	34
4.2	PARÂMETROS DA MODELAGEM.....	35
4.3	RESULTADOS.....	36
4.3.1	Experimentos.....	36
5	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Em 1904 Christian Hülsmeier patenteou (Patente nº 165546) a idéia de usar ondas eletromagnéticas (EM) de alta frequência para o estudo da subsuperfície. Seis anos depois, em 1910, foi publicado o primeiro trabalho descrevendo essa metodologia, no qual os sinais eletromagnéticos foram empregados na detecção de artefatos enterrados. Posteriormente, por volta de 1926, Hülsenbeck patenteou (nº 489434) a idéia de usar pulsos eletromagnéticos curtos e Stern em 1929 realizou na Áustria o primeiro levantamento para determinar a espessura de uma geleira (DANIELS, 2000; STERN¹, 1929 apud OLHOEFT, 1996).

Durante as décadas de 50 e 60, os militares norte-americanos desenvolveram e aprimoraram o método eletromagnético de alta resolução, denominado Radar (*Radio Detection and Ranging*) ou *Ground Penetrating Radar* (GPR), com o objetivo de detectar túneis usados pelos Vietcongs. A partir desse momento foram desenvolvidos sistemas de GPR mais complexos e precisos, permitindo a aplicação desse método em uma vasta área, tais como: hidrogeologia; exploração mineral, mapeamento de estruturas geológicas no subsolo; arqueologia; geotecnia; aplicações ambientais, entre outras (DANIELS, 2004).

Entretanto, somente nas décadas de 70 e 80 as empresas, dispendo das inovações eletrônicas e computacionais, passaram a construir e comercializar o equipamento GPR. Devido aos avanços no processamento sísmico, ao aprimoramento das técnicas de aquisição, resolução, penetração e interpretação dos dados adquiridos o método GPR evidenciou-se dos demais. Fato que tornou este um dos maiores métodos geofísicos empregados no estudo da subsuperfície (DANIELS, *op. cit.*).

O estudo realizado neste trabalho consistiu-se de processamento e de modelagem de dados reais de GPR obtidos em Cariacica/ES, cuja finalidade é apresentar as principais etapas de processamento de dados de GPR, identificando as suas necessidades de aplicação e demonstrando o uso do Reflexw versão 4.5 na modelagem de dados.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Introdução: apresenta um breve histórico do método GPR e os objetivos do

¹Stern, W. **Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis**: Ger. Beitr. zur Geophysik, v.23, 1929.

trabalho.

- Segundo Capítulo: aborda uma descrição dos princípios metodológicos do método GPR, suas características peculiares quanto à forma de aquisição de dados e seus princípios físicos. Além disso, expõe as propriedades intrínsecas do meio e as principais perdas da energia do sinal do GPR.

- Terceiro Capítulo: mostra as etapas do processamento empregadas, os princípios da interpretação adotados e a interpretação dos dados de Cariacica/ ES.

- Quarto Capítulo: descreve a modelagem realizada, a caracterização e os parâmetros aplicados na construção dos experimentos, apresenta os experimentos e os dados sintéticos obtidos.

- Conclusão: mostra uma síntese desse trabalho, aponta os principais pontos do procedimento adotado e expõe o resultado da comparação entre os experimentos realizados.

2 METODOLOGIA

2.1 O MÉTODO *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)

O GPR é um método eletromagnético baseado na propagação de ondas eletromagnéticas (EM) de alta frequência em um meio, i. e., baseia-se na emissão, reflexão e recepção da onda, que responde às mudanças das propriedades EM do meio. O método promove um bom imageamento do subsolo, ao ser capaz de caracterizar, localizar e mapear estruturas e feições geológicas de forma eficiente.

O método GPR destaca-se dos demais métodos de investigação geológicos e geofísicos por apresentar uma elevada resolução (de alguns metros a dezenas de metros), fornecer aquisição de um grande volume de dados em um curto período de tempo e ser não invasivo e não destrutivo (KNIGHT, 2001).

2.2 PRINCÍPIOS METODOLÓGICOS

O método GPR possui um conjunto de características peculiares que dizem respeito à aquisição dos dados, tais como as técnicas básicas de levantamento, os componentes do sistema, as frequências das antenas, os modos de funcionamento, os arranjos das antenas, as escalas de medidas e a dimensão dos dados.

A forma de aquisição de dados mais comum ocorre a partir do deslocamento de um sistema de GPR ao longo de um perfil traçado puxado pela mão ou com auxílio de um veículo. As medidas de GPR são realizadas por um sistema composto basicamente de seis módulos: duas antenas, Transmissora (Tx) e Receptora (Rx); unidades eletrônicas da antena receptora e da antena transmissora; unidade de controle central (gerador do sinal) e um *datalogger*, responsável pelo registro e armazenamento dos dados (DAVIS; ANNAN, 1989). As medições são efetuadas ao longo, ou em pontos, da superfície de acordo com o perfil, o qual deve assumir orientação perpendicular em relação à estrutura em subsuperfície (DANIELS, 2000).

Durante a aquisição de dados, a antena Tx utilizada emite ondas EM que podem variar no intervalo de 10 MHz a 2,5 GHz. A determinação da frequência da antena transmissora é um fator muito importante, uma vez que, depende do objetivo do levantamento. Cada frequência corresponde a uma antena dependendo do fabricante do

aparelho e de um modo geral elas podem assumir valores de 50, 100, 200, 400 MHz até 2,5 GHz. Além disso, cada frequência corresponde aproximadamente a uma profundidade de investigação, que por sua vez, depende do meio geológico (Tabela 1).

Tabela 1- Estimativa da Profundidade Máxima de Penetração em função da Frequência Central das Antenas.

Frequência (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Fonte: Adaptada de Porsani (1999).

Quanto às configurações geométricas das antenas, existem dois modos de funcionamento (ou operação) no sistema GPR. O primeiro modo denomina-se sistema Monoestático (*fixed mode*), em que uma mesma antena é utilizada para transmissão e recepção do sinal, enquanto o segundo modo opera no modo Biestático (*moved mode*), caracterizado pelo arranjo composto de um par de antenas (Tx e Rx) separadas ou dentro de uma mesma unidade. O primeiro modo destaca-se na aquisição de dados por permitir maior flexibilidade nas operações, tornando o processo mais ágil (DANIELS, 2000).

Um fator importante que deve ser considerado durante a aquisição dos dados é o espaçamento entre as antenas, Tx e Rx. O espaçamento, aliado a frequência e as propriedades do meio, determina a profundidade de investigação do método GPR. O espaçamento varia de acordo com o tipo de arranjo das estações para aquisição de dados. De um modo geral o valor estimado para o espaçamento entre as antenas deve ser cerca de 20% da profundidade do alvo (DAVIS; ANNAN, 1989).

O arranjo das estações é estabelecido pelo modelo do sistema (monoestático ou biestático), o qual é proposto de acordo com o objetivo do levantamento. Desse modo, existem três técnicas mais comuns de aquisições com o GPR (REYNOLDS, 1997). São elas:

- **Perfis de Reflexão com Afastamento Constante ou *Common Offset*:** nesta técnica o afastamento entre uma ou mais antenas permanece constante durante a aquisição de dados (Figura 1-a). Os dados obtidos nesta geometria são registrados em intervalos de distância ou tempo contínuos. Os perfis representam em seu eixo horizontal as posições

das antenas e em seu eixo vertical o tempo duplo dos refletores.

- **Sondagens de Velocidade:** nesta técnica ocorre o registro de um ponto ou área, de forma a “iluminar” a região com diferentes espaçamentos entre Tx e Rx. A estimativa da velocidade do sinal do GPR, a partir do espaçamento das antenas pode ocorrer de duas maneiras: *Common Mid Point (CMP)* ou *Wide Angle Reflection and Refraction (WARR)*. Na geometria WARR, uma antena permanece fixa, enquanto a outra é afastada gradativamente da primeira, como resultado obtemos um gráfico da distância (eixo horizontal) versus tempo (eixo vertical) (Figura 1-b). Já no CMP o espaçamento das antenas aumenta com o deslocamento das mesmas em sentidos opostos, simetricamente, a partir de um ponto central (Figura 1-c).

- **Técnica de Trans-iluminação ou Tomografia:** esta técnica é mais utilizada no interior de poços e divide-se em quatro tipos de aquisição de dados, as quais: **common offset**, em que a aquisição assemelha-se a técnica da reflexão, com as antenas se deslocando no interior do poço e diferindo em relação ao fato da antena registrar a seção radial do poço; **direta**, na qual as antenas Tx e Rx são dispostas em lados opostos do poço, deslocando-se através de uma distância conhecida e gerando como resultado uma seção de tempo de trânsito direto, ao invés do tempo duplo; **vertical radar profiling (VRP)**, em que antena Tx permanece posicionada na superfície, enquanto a Rx desloca-se ao longo do poço e finalmente a técnica **variável**, na qual ambas as antenas encontram-se no interior do poço, uma permanece imóvel (Tx), enquanto a outra percorre a área investigada (Rx).

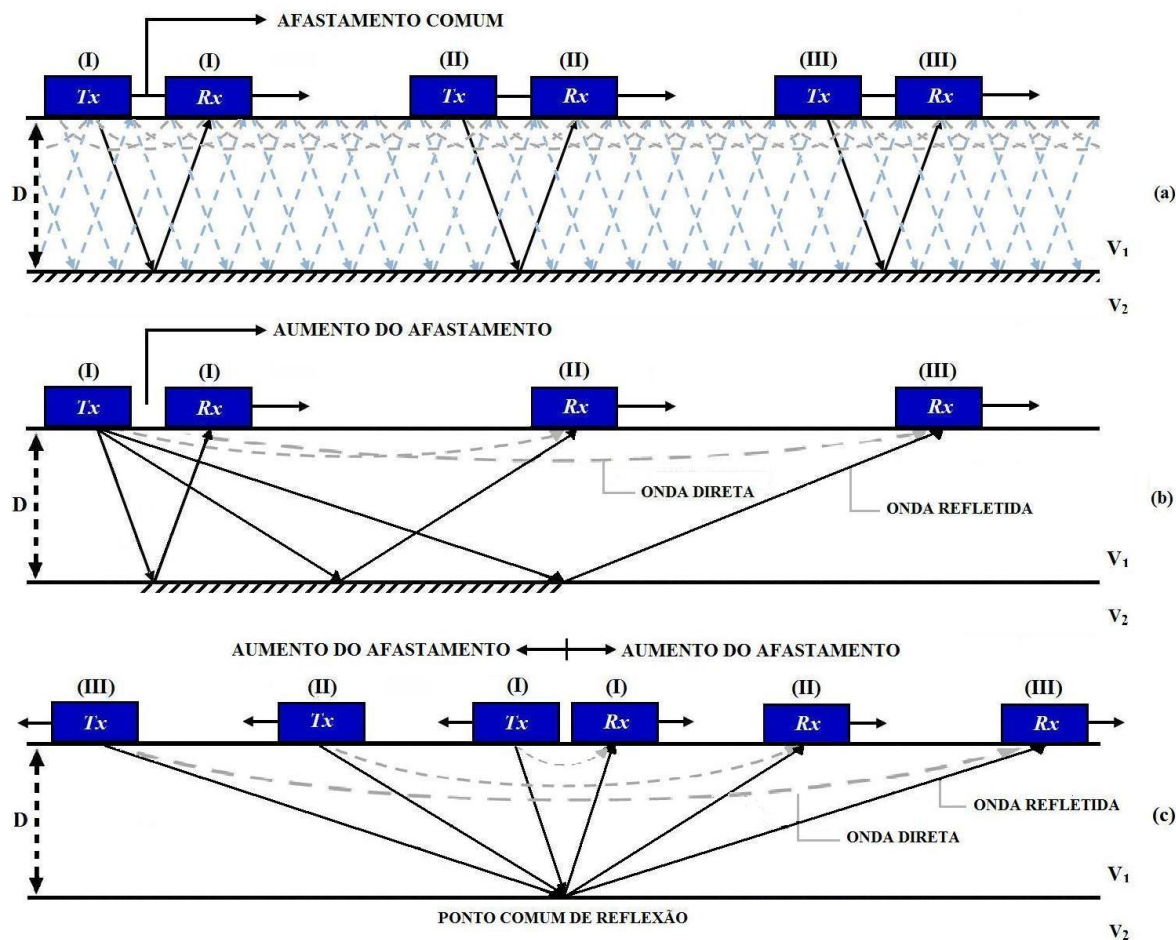


Figura 1- Técnicas de aquisições com GPR: (a) Commom Offset, (b) Sondagens de Velocidade, (c) Trans-illuminação.

Fonte: Adaptada de Reynolds (1997).

Independente do tipo de técnica de aquisição com o GPR, quando utilizado na caracterização do subsolo, deve-se levar em consideração a escala de medição. Esta representa o modo como os dados são registrados em relação a janela de tempo. A janela de tempo é um fator importante no levantamento, pois as informações obtidas de acordo com um escala específica possuem validade apenas para a mesma. Devendo esta ser pré-determinada e fixada ao longo de todo o levantamento (KNIGHT, 2001).

Outro fator importante que deve ser enfatizado é a resolução do GPR, tanto vertical como horizontal. A capacidade de resolução é primariamente dominada pelo comprimento de onda λ , sendo o limite de $\frac{1}{4} \lambda$ a menor distância perceptível. De um modo geral, a resolução define o menor elemento que pode ser identificado. No caso da resolução vertical isso se aplica à capacidade de discriminar dois eventos distintos em profundidade (Tabela 2). Já a resolução horizontal pode expressar tanto a capacidade de identificar a continuidade lateral de um ou mais eventos, quanto à diferenciação destes ao longo das

imagens do GPR (KNIGHT, 2001; DAVIS; ANNAN, 1989)

Tabela 2 - Resolução Vertical Teórica em função da Frequência Central das Antenas.

Frequência Central (MHz)	Resolução Vertical Teórica (m)
200	0,125 - 0,25
100	0,25 - 0,5
50	0,5 - 1
25	1 - 2

Fonte: Adaptada de Porsani (1999).

A imagem produzida pelo GPR ao longo dos perfis denomina-se radargrama (Figura 2), que consiste em uma compilação ou interação dos dados registrados nas estações de medidas, em nanosegundos (ns) (KNIGHT, *op.cit.*). Os dados são registrados na forma de traços, os quais representam a base das medições de GPR no domínio do tempo, pois consistem no registro do tempo de trânsito de um pulso de energia eletromagnética durante sua transmissão e propagação no meio e posterior captação. O traço pode ser utilizado para determinar a profundidade de alvos em subsuperfície, a partir dos valores do tempo de trânsito e do conhecimento da velocidade da onda no meio de propagação.

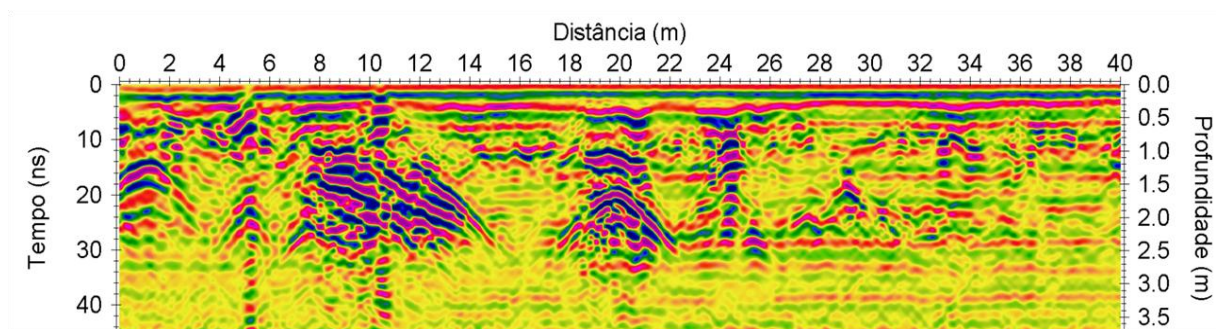


Figura 2 - Exemplo de radargrama.

Fonte: Souza (2008).

O traço será constituído de dois pulsos, os quais serão registrados pela antena Rx. O primeiro pulso registrado denomina-se onda direta, o qual se propaga diretamente através do ar, representando a entrada (*input*). Já o segundo pulso é aquele que interage com o meio, sendo refletido quando houver contraste entre as propriedades elétricas e a impedância/admitância nos meios adjacentes, dispersando-se em direção a superfície, consistindo na saída ou resposta (DANIELS, 2000).

2.3 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO MÉTODO GPR

O método GPR fundamenta-se na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas, a qual tem como base as Equações de Maxwell. Estas regem todos os fenômenos eletromagnéticos, relacionando os campos elétricos e magnéticos às suas fontes e ao meio (OLHOEFT, 1996). As Equações de Maxwell, juntamente com as relações constitutivas, descrevem o comportamento da onda EM no meio. A partir destas informações, e da frequência utilizada, pode-se determinar a velocidade de propagação das ondas EM, o comprimento da onda no meio e atenuação sofrida na propagação.

2.3.1 Relações Constitutivas do Meio

As relações constitutivas do meio são aquelas que determinam características intrínsecas dos materiais em subsuperfície, nos quais atuam os campos elétricos e magnéticos, de modo a quantificar suas propriedades físicas. As propriedades são: condutividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade magnética.

A Condutividade Elétrica (σ) é a propriedade que determina a capacidade de um material em conduzir corrente elétrica e é medida em Siemens por metro (S/m). Esta propriedade descreve o fluxo de cargas livres devido a uma corrente, quando sujeitas a um campo elétrico. Logo, a condutividade elétrica pode ser obtida através da Lei de Ohm, a qual relaciona a densidade de corrente de condução ($\vec{J}$) ao campo elétrico ($\vec{E}$), ou seja, a densidade de corrente é proporcional ao campo elétrico.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

A resistividade elétrica (ρ) do meio é dada pelo inverso da condutividade e medida em unidade de $\Omega \cdot m$:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

Já a Permissividade Elétrica (ϵ) está relacionada diretamente ao campo elétrico ($\vec{E}$) e ao deslocamento elétrico ($\vec{D}$), medida em C/m^2 . Esta descreve o modo como as cargas se deslocam devido à presença do campo elétrico,

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} \quad (3)$$

em que χ_e é a susceptibilidade elétrica. Esta constante descreve o deslocamento dos elétrons, núcleos e moléculas polares sob influência de um campo elétrico externo, de estado neutro para o polarizado.

Por sua vez, a Permissividade Elétrica relativa é dada por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4)$$

em que ϵ é a permissividade elétrica do meio (F/m) e ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo (8.854×10^{-12} F/m).

Finalmente a Permeabilidade Magnética (μ) está relacionada ao vetor intensidade de campo magnético ($\vec{H}$) e ao vetor indução magnética ($\vec{B}$) e é medida em Henry por metro (H/m), de acordo com a equação abaixo:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Wb/m}^2) \quad (5)$$

em que μ dos materiais é determinada pela razão:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

sendo μ a permissividade magnética do meio e μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ F/m).

2.3.2 Velocidade de Propagação da Onda Eletromagnética

No método GPR a propagação de ondas eletromagnéticas pode ser representada pela equação de onda unidimensional na direção z:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (7)$$

cujas velocidade de propagação (v) é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad [\text{m/s}] \quad (8)$$

Dentre as três propriedades elétricas do meio apenas a Condutividade Elétrica e a Permissividade Elétrica controlam a velocidade, uma vez que a Permeabilidade Magnética

apresenta pouca variação nos meios geológicos, exceto na presença de minerais magnéticos (ilmenita, magnetita e pirrotita) (TELFORD; GELDART; SHERIF, 1990). Desse modo, μ_r assume um valor unitário em meios não magnéticos e a Eq. 8 será reduzida para a forma:

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

sendo c a velocidade da onda EM no vácuo ($2,99863 \times 10^8$ m/s).

2.3.3 Perdas da Energia do Sinal de GPR

A relação existente entre a velocidade da onda e as propriedades elétricas do meio é de fundamental importância para a determinação do uso do GPR em investigações da subsuperfície, uma vez que materiais com propriedades elétricas diferentes possuem velocidades de propagação da onda diferentes (DANIELS, 2000). A propagação é descrita pela equação da onda para meios com atenuação, a qual pode ser observada abaixo em sua solução geral:

$$E = E_0 e^{i(\omega t - \alpha z)} \quad (10)$$

em que

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon}{2} [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1] \right\}^{1/2} \quad [\text{Np/m}] \quad (11)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon}{2} [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} + 1] \right\}^{1/2} \quad [\text{Np/m}] \quad (12)$$

ou ainda, supondo pequena a perda, $\tan \delta \ll 1$:

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

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (14)$$

sendo E_0 a amplitude inicial da onda, z a profundidade investigada e α e β representam as constantes atenuação e propagação da onda, respectivamente (WARD; HOHMANN, 1987).

Durante o processo de propagação da onda, a onda emitida na superfície irradia-se através do meio até atingir um possível refletor, este causa distorção no campo da onda original e parte da onda retorna a superfície sendo detectada pela antena receptora. O campo de onda emitida possui uma superfície de pontos com o mesmo tempo de percurso denominada de frente de onda. A frente de onda desloca-se de acordo com uma direção de propagação, chamada de raio. O raio, por sua vez, determina a trajetória da onda, a qual sofrerá alterações caso a onda atinja uma interface entre materiais de diferentes propriedades elétricas. Ao atingir uma interface entre dois meios com propriedades elétricas diferentes, parte da energia da onda é refletida de volta a superfície e captada pela antena receptora, sendo registrada e armazenada para posterior interpretação. Já a outra parte é transmitida, propagando-se até alcançar outra interface ou dissipar-se completamente no meio (DAVIS; ANNAN, 1989).

Desse modo, a proporção de energia refletida é dada pelo coeficiente de reflexão (R), expresso por:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (15)$$

em que Z_1 e Z_2 são as impedâncias dos meios 1 e 2.

Assim, o coeficiente de reflexão é controlado pela diferença entre as impedâncias intrínsecas ou propriedades elétricas de um meio e é representado por:

$$Z = \sqrt{\frac{-i \omega \mu}{\sigma - i \omega \epsilon}} \quad [\Omega] \quad (16)$$

ou na forma simplificada para materiais de baixa perda

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (17)$$

Conforme a onda EM propaga-se no meio, interagindo com propriedades físicas contrastantes do meio ou interfaces, ocorre à perda ou dissipação da energia da onda, em que há conversão da energia eletromagnética em energia térmica. Esse processo é conhecido como atenuação.

Além da atenuação, outra forma de perda de energia é ocasionada pela difração. A difração consiste no espalhamento de energia da onda ao atingir uma interface ou objeto,

sofrendo mudança na direção de propagação. O modo como a energia se dispersa depende de fatores como: a forma e a rugosidade da interface; o tamanho e a forma do objeto e, principalmente, o contraste existente entre as propriedades elétricas entre o meio e o objeto (DANIELS, 2000).

Outro fenômeno envolvendo a propagação de ondas eletromagnéticas no meio é a dispersão, em que as propriedades físicas variam com a frequência do sinal ocasionando uma variação da velocidade de propagação com a frequência (DANIELS, 2000).

Tanto a atenuação quanto a dispersão limitam a profundidade de penetração de energia no meio. Essa profundidade de penetração é controlada pela frequência de operação do GPR e a resistividade do meio, sendo conhecida como *Skin Depth* (δ),

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (18)$$

logo, quanto maior for a frequência da onda, menor será seu comprimento de onda e menor será a profundidade de investigação.

3 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GPR

3.1 PROCESSAMENTOS DE DADOS DE GPR

O processamento de dados do GPR consiste no conjunto de técnicas de tratamentos de sinais aplicados aos dados digitalizados, com o objetivo de torná-los adequados à interpretação visual, produzindo seções mais nítidas e com melhor resolução temporal das camadas em subsuperfície. O processamento pode ser básico ou avançado e segue etapas, as quais são determinadas pela disponibilidade de recursos, objetivo do levantamento, qualidade dos dados, tempo disponível, disponibilidade e capacidade de processamento (*software* e *hardware*) e, principalmente, experiência do intérprete (DOURADO, 2004).

Os dados aqui processados foram adquiridos pelo equipamento GPR SIR 3000 produzido pela Geophysical Survey Systems, Inc – GSSI, em um levantamento realizado pela empresa Geopesquisa Investigações Geológicas S/C, no bairro Alice Coutinho situado a noroeste da região metropolitana do Município de Cariacica/ES (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Localização da área de estudo.

Fonte: Software Google Earth™ Mapping Service.

3.1.1 Etapas do Processamento

Neste trabalho utilizamos o *software* REFLEXW[®] versão 4.5, licenciado para a UFPA. As etapas adotadas no processamento foram as seguintes:

a) Edição de dados

A edição de dados possibilita modificar parâmetros de aquisição de campo, como por exemplo: tamanho do perfil, amostras por traço, janela temporal, espaçamentos entre os traços e assim por diante (BORGES, 2007).

Nesta primeira etapa escolhe-se ainda como serão apresentados os radargramas. Existem três modos distintos, são eles: *Winggle Trace*, o qual indica a amplitude do sinal em função do tempo; *Gray scale* é o segundo modo de exibição e refere-se a aplicação da escala de cinza a seção do GPR e o terceiro modo é *Color coding*, o qual usa uma escala de cores. A escolha fica a critério do intérprete (DUARTE, 1997).

b) Correção Estática

A Correção Estática ou *Set Time Zero* elimina o efeito da onda direta e realiza a correção do tempo zero. A correção estática ocorre atribuindo a onda aérea o valor de tempo igual a zero, ou seja, corresponde a superfície onde o levantamento é realizado. Este passo do processamento é aplicado a fim de realizar o ajuste do tempo-nulo com a profundidade nula e corrigir a topografia do terreno. Fato que permite determinar a localização de alvos e estruturas em subsuperfície, devido o ajuste dos valores de tempo duplo (LIMA, 2006).

c) Filtragem Temporal (1D)

O filtro 1D permite realçar a estrutura investigada ou remover sinais espúrios (ruídos) através da análise do espectro de amplitude dos traços que compõem o radargrama e conseqüente determinação das frequências mínimas e máximas utilizadas nesse filtro.

Neste trabalho foi aplicado o filtro 1D denominado *Subtract-mean (Dewow)*. O

Dewow remove as componentes de baixa frequência do sinal, as quais são causadas pela indução eletromagnética. O filtro *Dewow* efetua a média entre os valores de cada traço (subtraindo o valor obtido de um valor central). Este filtro atua em cada traço independentemente e é aplicado quando se deseja eliminar ruído de baixa frequência (*dewow*). O filtro *Dewow* pode ser aplicado para eliminar ruídos eletrônicos e estáticos inerentes ao sistema.

d) Filtro Fk

O Filtro Fk é empregado para atenuar ruídos de refletores inclinados (reverberações) e enfatizar mergulhos procurados. Sua aplicação envolve a geração do *fk-spectrum*, o qual realiza a transformada de Fourier dos dados do domínio do tempo-espaco para o domínio frequência-número de onda e fornece o *spectrum fk* correspondente. Entretanto, o uso do filtro Fk acarreta no aumento do ruído de alta frequência, fato que ocasiona o cruzamento de refletores de alta frequência.

e) Filtragem Espacial (2D)

Os filtros espaciais (2D) realçam ou removem tipos de variações espaciais diferentes, atenuando ruídos provocados pelo deslocamento horizontal das antenas (PORSANI, 1999). Os filtros 2D utilizados foram:

- **Background Removal:** este filtro (passa alta) foi utilizado objetivando remover as reverberações das antenas de baixa frequência e realçar os refletores pontuais e inclinados.

- **Running average:** este filtro atua efetuando uma media móvel em um número de traço escolhidos. Este filtro (passa baixa) foi empregado com o objetivo de enfatizar os refletores e a continuidade lateral dos refletores horizontais.

f) Ganho

O ganho compensa os efeitos da atenuação do sinal do radar, melhorando a visualização das estruturas mais profundas através de funções de ganho. Ou seja, sua aplicação objetiva melhorar a visualização de refletores “fracos”.

Neste trabalho, aplicamos um ganho manual conhecido como *manual gain* (y). Este ganho permite definir uma curva de ganho de forma manual na direção y (tempo) e aplicar a mesma sobre cada ponto de cada traço do dado.

3.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE GPR

A identificação de fácies, estratigrafias ou seqüência de camadas segue um conjunto de técnicas de interpretação. A metodologia adotada para esta interpretação distingue unidades litológicas ou outras estruturas de acordo com os parâmetros apresentados pelas reflexões. Cada reflexão identifica parâmetros diferentes e assim unidades litológicas diferentes (MØLLER, 2006).

Os métodos de interpretação podem ser de dois tipos: qualitativo e quantitativo. O método qualitativo resume na análise visual e comparativa, em que se deseja obter informações sobre as estruturas e a estratigrafia do subsolo e a localização de regiões anômalas em relação às propriedades eletromagnéticas. O método quantitativo, por sua vez, consiste na análise numérica, objetivando produzir um modelo aproximado das propriedades elétricas, químicas e biológicas do solo em estudo que produziram determinado fenômeno (KNIGHT, 2001).

De acordo com Xavier Neto (2006) as litologias e as discontinuidades são representadas por variações na morfologia e no padrão das reflexões do radargrama, em que as variações na litologia representam alterações nos padrões dos refletores, de acordo com o contraste da permissividade elétrica e condutividade (Figura 3.2).

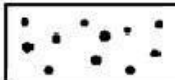
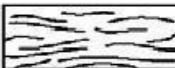
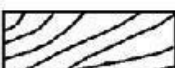
TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE REFLEXÃO			INTERPRETAÇÃO	
Configuração de Reflexão Livre	Reflexão Livre		1) Atenuação de Energia 2) Sedimentos Lacustrinos Siltosos 3) Areia, acamamento espesso ou maciço 4) Til, maciço, alguns matacões	
	Reflexão Livre com Difrações		1) Sedimentos, maciço e matacões	
Configuração de Reflexão de Acamamentos	Acamamento Simples	Paralelo		1) Silte e laminações finas 2) Areia e laminações espessas
		Onda		1) Silte e Areia, acamamento 2) Areia e acamamento
		Hummocky		1) Areia e acamamento 2) Areia e cascalho e acamamento
	Acamamento Complexo	Obliquo		1) Areia e acamamento delgado a espesso
		Sigmóide		1) Silte e acamamento delgado 2) Areia e acamamento delgado
Configuração de Reflexão Caótica	Caótico		1) Areia e Cascalho e estratigrafia cruzada	
	Caótico com Difrações		1) Areia, estratigrafia cruzada e matacões 2) Til, maciço e numerosos matacões	

Figura 3.2- Exemplo de configurações de reflexão de radargramas de acordo com a litologia e as estratigrafias de sedimentos glaciais.

Fonte: Adaptada de Haeni (1988).

A interpretação das seções do GPR depende do conhecimento do intérprete sobre o meio geológico, de modo que este possua capacidade e habilidade no reconhecimento de modelos reais de estruturas e feições. Através da análise dos perfis de GPR identificamos três tipos básicos de padrões das reflexões, são eles:

- **Incoerente, “Quebrado” ou Caótico:** esse padrão está associado a materiais não consolidados ou desagregados.

- **Laminado, Sub-horizontal, Concordante ou Coerente:** padrão associado a refletores horizontais contínuos. Refere-se às estruturas acamadas horizontais ou sub-horizontais e aos materiais compactados, características das rochas sedimentares.

- **Hipérboles de Difrações, Descontinuidades Laterais, Feições de “Alargamento” Sigmoidal ou Elíptico:** padrão característico de descontinuidades

geológicas (falhas, fraturas e estruturas de dissolução intra-acamamento) ou objetos soterrados.

Durante a interpretação das seções deve-se atentar ainda aos deslocamentos e as interrupções abruptas dos refletores, as quais estão associadas à presença de falhas e fraturas. Além disso, o método GPR permite mapear e caracterizar estruturas metálicas e não metálicas em subsuperfície. As reflexões produzidas por objetos 2D e 3D (dutos, tanques, galerias, e assim em diante) enterrados apresentam feições hiperbólicas “fechadas” na seção de GPR. Enquanto que objetos na superfície (edificações, árvores, torres de alta tensão, postes, entre outros) são caracterizados por hipérboles “abertas” (BORGES, 2007).

3.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE CARIACICA/ ES

No processamento dos dados de GPR de Cariacica-ES foram aplicadas as etapas “a”, “b”, “c”, “d” e “e” (*Background Removal*) nos dois perfis utilizados. As demais foram usadas no processamento dos resultados obtidos na modelagem.

Para a interpretação foram obtidas informações *a priori* sobre a geologia e características peculiares presentes no perfil, tal como a fonte da hipérbole, as quais auxiliaram da interpretação dos dados.

3.3.1 Perfil 1

Na Figura 3.3 (a), podemos observar um refletor inclinado relacionado ao corpo granítico, o qual se estende ao longo de todo perfil. Notamos ainda uma zona de atenuação situada aproximadamente no centro do radargrama, determinada por uma maior concentração de argila (material de elevada condutividade elétrica). Além disso, a presença de uma hipérbole “fechada” caracteriza uma tubulação de PVC (Policloreto de Vinila) e outras estruturas pedológicas menores que constituem o meio silte-arenoso seco.

O processamento do dado possibilitou uma melhor visualização do corpo granítico e das estruturas pedológicas mais evidentes, além da zona de atenuação decorrente da presença da lente de argila, ressaltada no topo da seção (Figura 3.4).

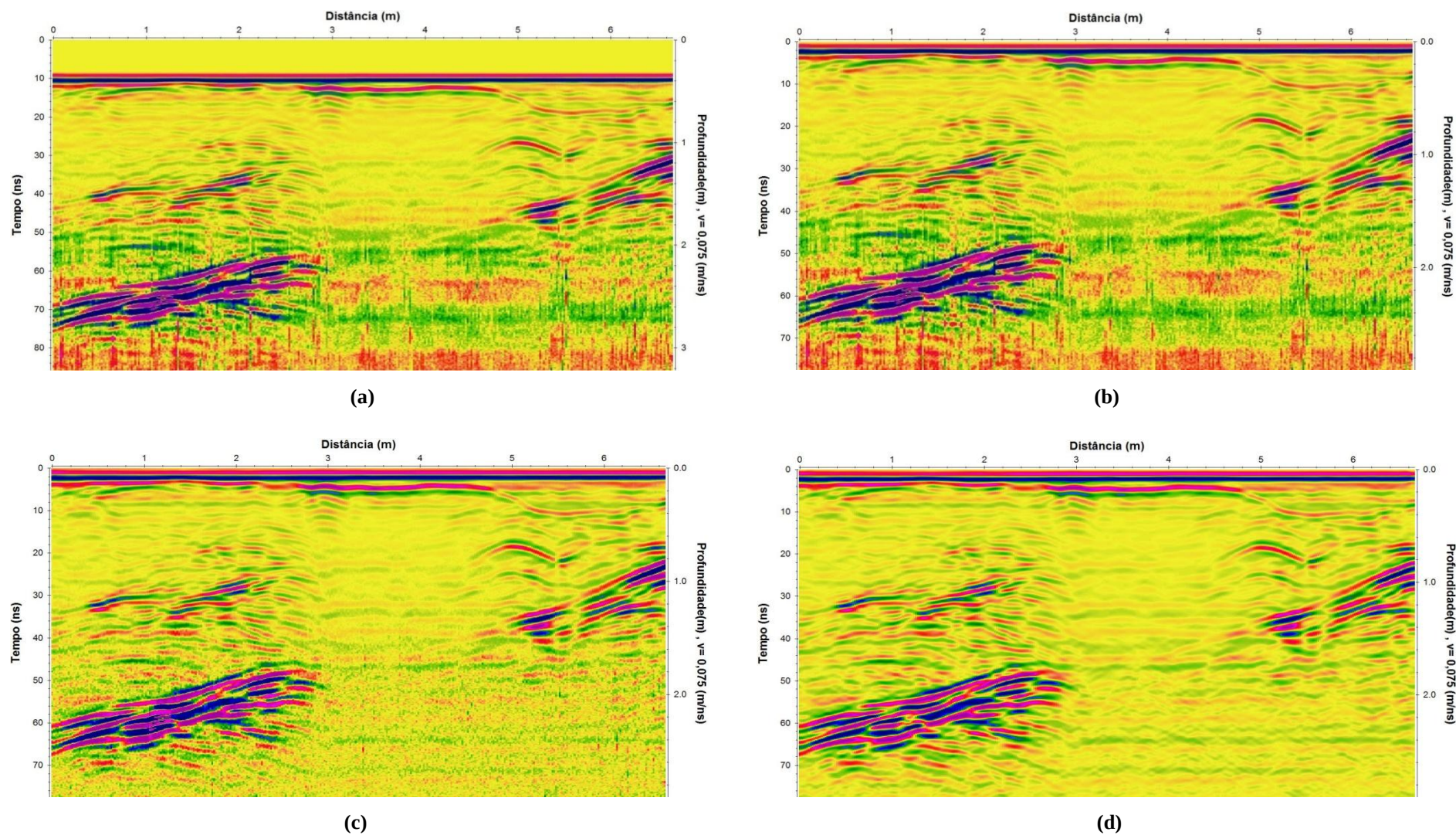


Figura 3.3 - Etapas do processamento do perfil 1 (Cariacica/ES): (a) Dado Bruto, (b) *Static correction*, (c) *Dewow*, (d) *Fk filter*.

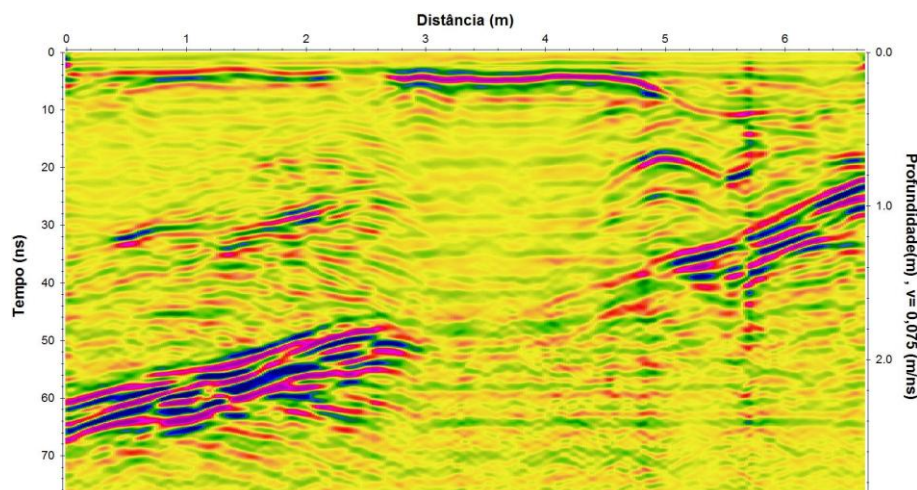


Figura 3.4 – Perfil 1 Processado (Cariacica/ES): *Background removal*.

3.3.2 Perfil 2

Assim como no perfil 1 podemos identificar um refletor inclinado referente ao granito, o qual é interrompido por uma zona de atenuação, devido ao aumento na espessura da camada de argila próxima à superfície. Esta lente estende-se por quase todo o topo do perfil impedindo a observação de parte do refletor, dividindo a interface inclinada do granito. A hipérbole correspondente a tubulação de PVC, situada aproximadamente a 4,8 m na direção x, mostra-se mais “aberta” em relação ao perfil 1. Além disso, são observadas estruturas pedológicas menores (Figura 3.5 (a)).

A aplicação da etapa descrita na Figura 3.6 (a) determinou um aumento de ruído de alta frequência, fato que resultou na ênfase de áreas de não interesse no perfil 2. Com isso, aplicou-se um ganho manual a fim de tornar a seção mais nítida. Como resultado, observa-se que as características geológicas foram enfatizadas, além da lente de argila no topo da seção ser bastante realçada (Figura 3.6 (b)).

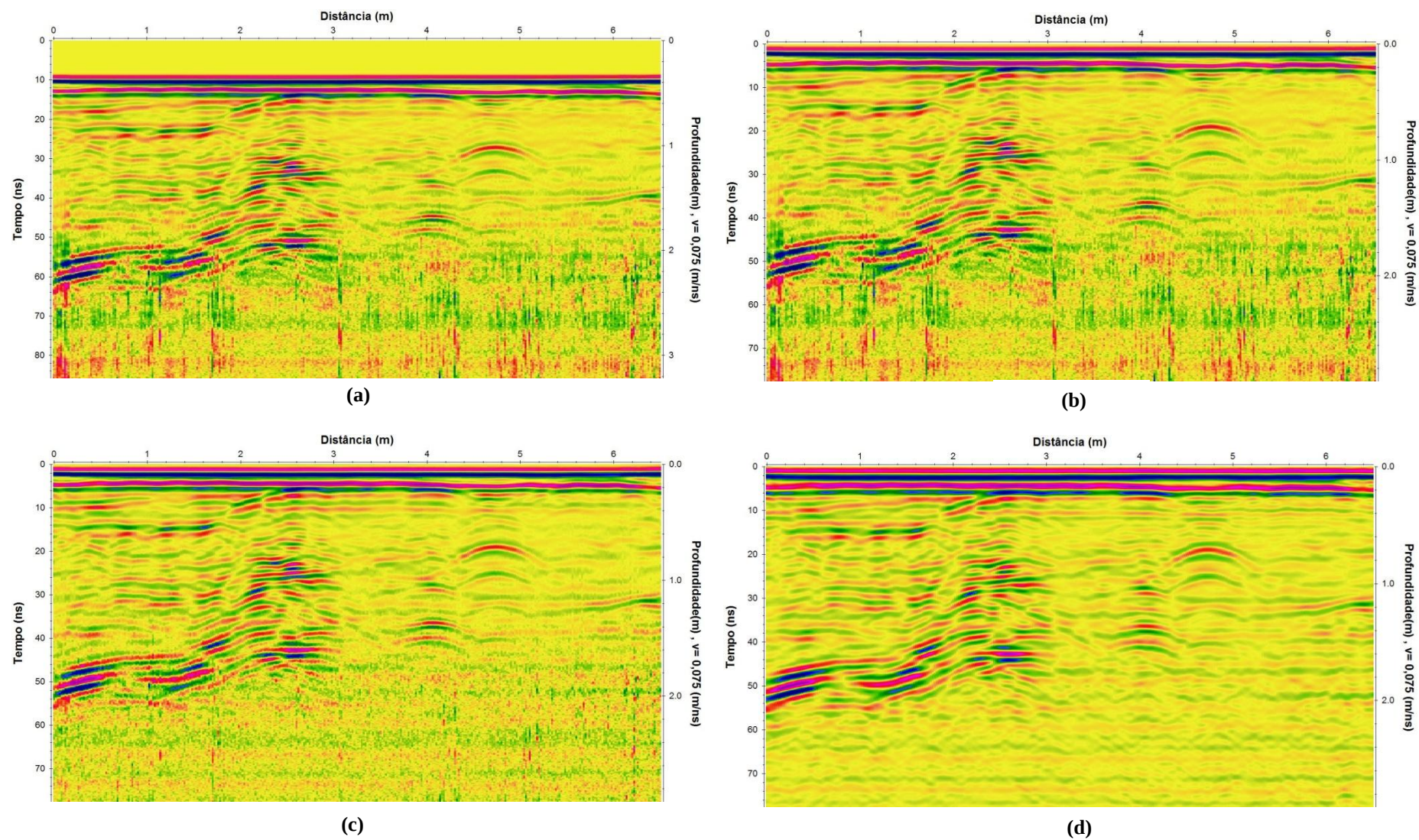


Figura 3.5 - Etapas do processamento do perfil 2 (Cariacica/ES): (a) Dado Bruto, (b) *Static correction*, (c) *Dewow*, (d) *Fk filter*.

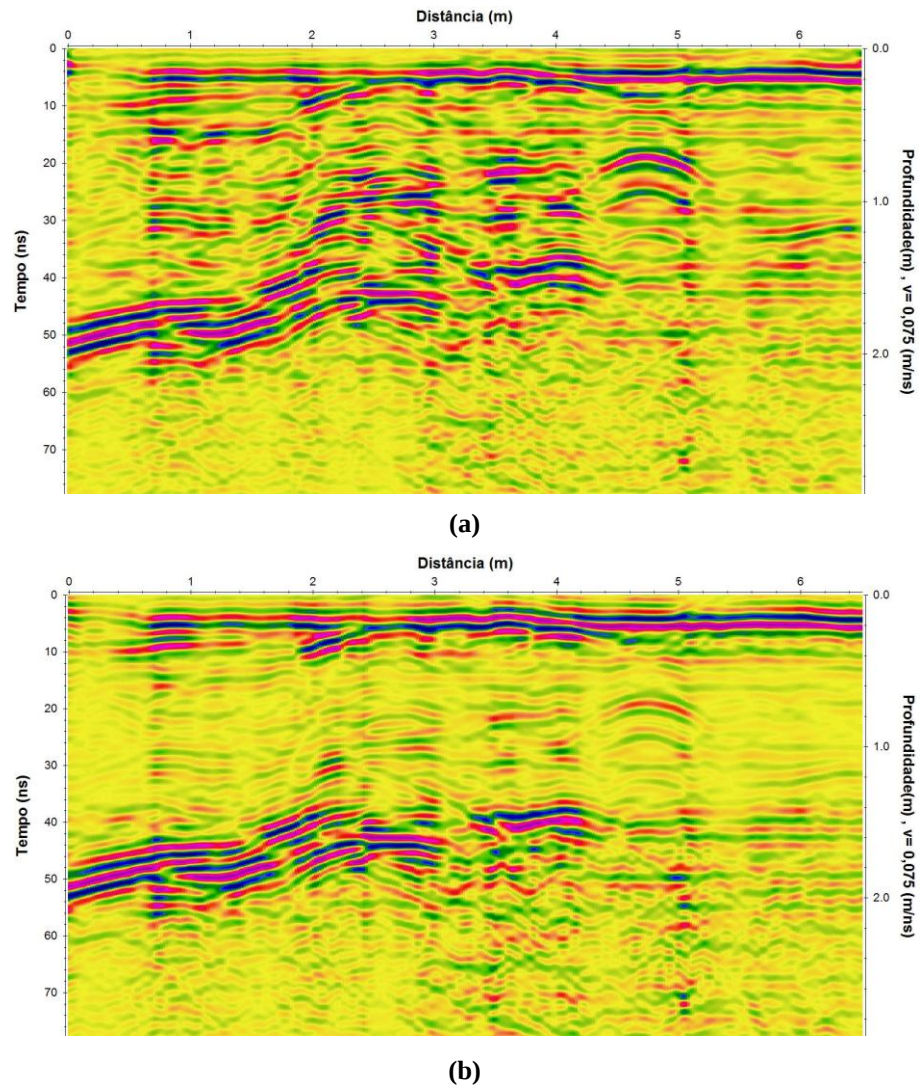


Figura 3.6 - Etapas do processamento do perfil 2 (Cariacica/ES): (a) *Background removal*, (b) *Gain Manual*.

4 MODELAGEM DE DADOS DE GPR

A modelagem de dados de GPR é uma valiosa ferramenta na corroboração da interpretação dos radargramas. A construção de um modelo busca simular as respostas dos dados reais, a fim de prever os possíveis resultados de um futuro levantamento ou na determinação dos parâmetros ótimos para a aquisição. Para tanto, torna-se necessário definir os parâmetros a serem utilizados e o tipo de modelagem a ser aplicado.

Neste trabalho, utilizaremos o módulo de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) do REFLEXW para realizarmos a modelagem 2D de dados de GPR, uma vez que, esse consiste no método ideal para modelar espalhamento provocado por heterogeneidades do meio (MERWE *et al.*, 2000).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MODELAGEM

Na modelagem de dados de GPR tentamos reproduzir o perfil 1 por apresentar estruturas bem definidas, tais como: refletor inclinado, refletor horizontal e refletor pontual, além de zona de atenuação.

Desse modo, construímos um modelo geológico no qual são representadas a estrutura geológica (granito), a estrutura pedológica (argila) e o ponto difrator (tubulação), tal como estes se apresentam nas seções de GPR processadas. O modelo esquemático constitui-se de duas camadas (meio e granito), uma concentração de argila e uma tubulação hidráulica. As geometrias escolhidas na representação dos componentes do modelo foram adotadas conforme sua similaridade em relação aos dados reais, em que o granito foi representado por linha inclinada, a argila por um retângulo e a tubulação por um círculo (Figura 4.1).

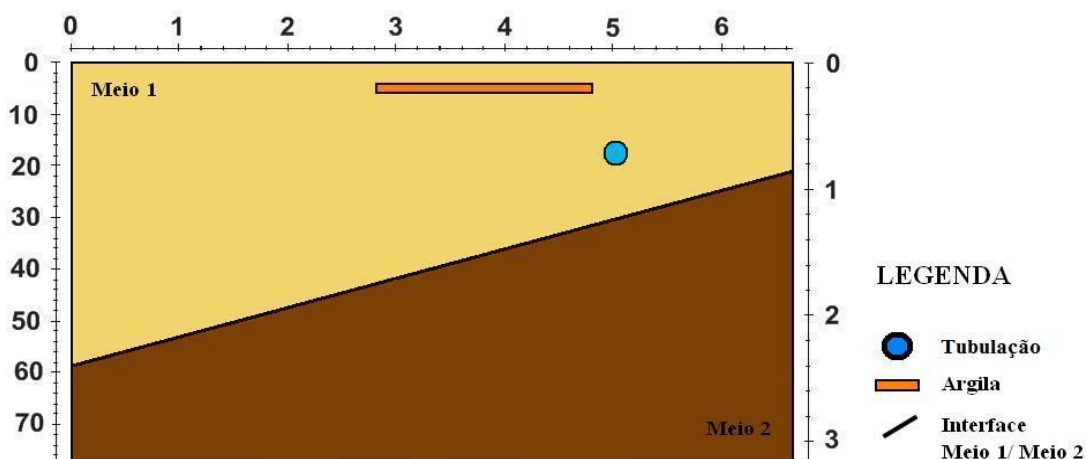


Figura 4.1 - Modelo geológico.

4.2 PARÂMETROS DA MODELAGEM

Nesta modelagem foram realizados dois experimentos adotando dois tipos de fontes de energia eletromagnética (onda plana e refletor explosivo). Os experimentos foram construídos com o tamanho de 6,66 m e janela temporal de 80 ns, correspondente a aproximadamente 3 m de profundidade, assumindo uma velocidade de 0,075 m/ns. E o tipo de onda adotada foi o eletromagnético.

Na construção dos experimentos foi realizada a inserção gradativa dos componentes do modelo no meio silte-arenoso, introduzindo suas propriedades físicas (Tabela 3), as quais foram estabelecidas a partir de uma média entre os valores encontrados na literatura. Nos experimentos, as feições geológicas foram dispostas horizontalmente em relação ao perfil, já o único ponto difrator foi disposto perpendicular ao mesmo.

Tabela 3 - Propriedades físicas dos alvos utilizados na construção dos modelos.

Componentes do modelo	Propriedades Físicas		
	ϵ_r	μ	σ_0 (S/m)
Solo silte-arenoso	4	1	0,00014
Granito	6	1	0,00001
Argila	5	1	1
Água doce	81	1	0,0005
Tubulação (PVC)	5	1	0

Fonte: Adaptada de Annan (1992); Porsani (1999); Prado (2000).

As posições do granito e da argila foram estabelecidas de acordo com análise do perfil processado. Já a posição e a profundidade do cano foi determinada de acordo com os dados disponibilizados pela GeoPesquisa, de modo que a dimensão da tubulação de 100 mm foi confirmada através de informações do contratante da empresa e a profundidade conferida a partir de observações diretas em campo (furo). Em que o cano está na posição de 5 m em relação ao eixo x e a 1,3 m de profundidade. A argila, por sua vez, foi representada com extensão de 1,5 m de comprimento e espessura de 0,1 m, na profundidade de 0,4 m.

As modelagens foram realizadas simulando um levantamento com a antena de 400 MHz e o espaçamento entre as medidas de 0,02 m. O arranjo da antena utilizado foi o sistema monoestático, em que as simulações das reflexões da onda eletromagnética foram realizadas no eixo EY-EY. No eixo EY-EY as antenas são posicionadas paralelamente entre si e perpendicularmente ao caminamento do perfil. Além disso, os tipos de fontes EM escolhidas

foram “onda plana” (experimento 1) e “refletor explosivo” (experimento 2).

A fonte “onda plana” possibilita a simulação de uma seção *zero-offset*, a qual é válida apenas para os refletores horizontais, visto que as características de reflexão são equivalentes. Para realizar a modelagem usando esta fonte muitas das vezes é necessário estender lateralmente o tamanho do modelo adotado, simetricamente, no valor de uma ou mais vezes o tamanho. Através desse procedimento busca-se eliminar o efeito de borda característico dessa fonte.

A fonte “refletor explosivo” utilizada no experimento 1 permite simular um perfil GPR 2D *zero –offset*, em que as ondas são geradas simultaneamente a partir do refletor em direção a superfície, etapa equivalente a migração dos dados. Este tipo de fonte apresenta as seguintes vantagens: colapsa a energia da onda difratada para o ápice da hipérbole e não gera efeito de borda no experimento simulado (YILMAZ, 1987; SANDMEIER, 2008).

Adotamos ainda a absorção linear como a condição de fronteira e o tipo de sinal GPR sendo Kuepper.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Experimentos

- Experimento 1

A fonte de energia aplicada no primeiro experimento foi a “onda plana”. O dado sintético obtido a partir desta fonte exibiu o refletor bastante suavizado, ao contrário da lente de argila, a qual foi melhor delimitada. Notamos ainda que houve um aumento na “abertura” da hipérbóle do cano e que esta mostra-se claramente suavizada (Figura 4.2).

As difrações de borda, comumente, geradas com essa fonte mostraram-se suaves no modelo, uma vez que, foram aplicados procedimentos durante a modelagem afim de evitá-los, como descrito na seção 4.2.

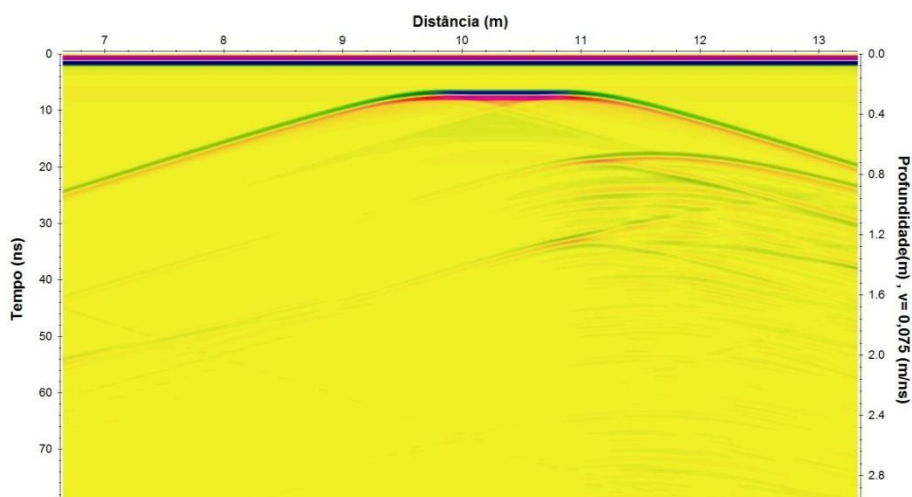


Figura 4.2 - Dado sintético 1 não processado

Devido à forte atenuação do refletor inclinado efetuamos um breve processamento da seção. Entretanto, os resultados obtidos não apresentaram mudanças significativas. Notamos apenas uma pequena redução do ruído e da reverberação do cano. Em contrapartida, o refletor inclinado permaneceu tênue (Figura 4.3).

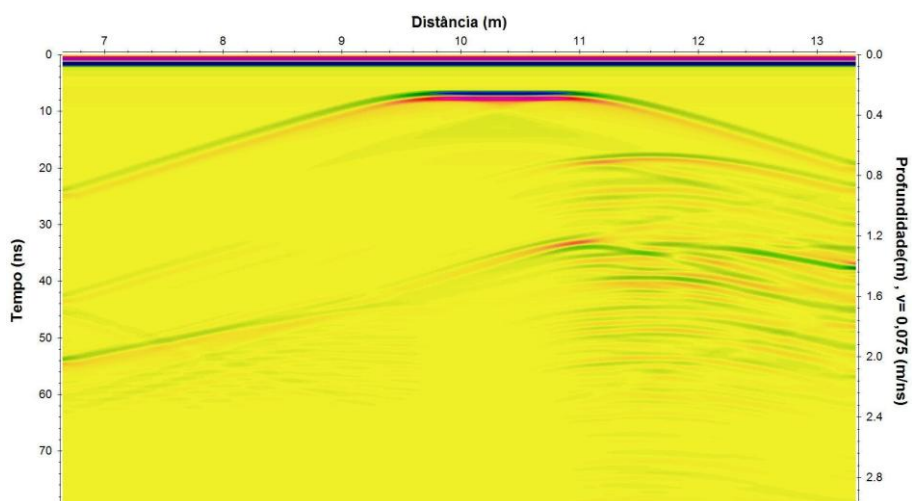


Figura 4.3 - Dado sintético 1 processado

- Experimento 2

No experimento 2 a fonte de energia EM empregada foi o “refletor explosivo”. Como resultado da modelagem, utilizando esta fonte, obtivemos um dado sintético com as características similares ao perfil original. Nele podemos observar que a argila provocou uma forte atenuação na reflexão que representa o corpo granítico, o qual mostrou-se bastante evidente ao longo de todo perfil. A hipérbole do cano revelou-se forte e com reverberação. O

dado sintético apresentou pouca incidência de difrações de borda, além de difrações resultantes dos cantos da forma escolhida para representar a argila no modelo (Figura 4.4).

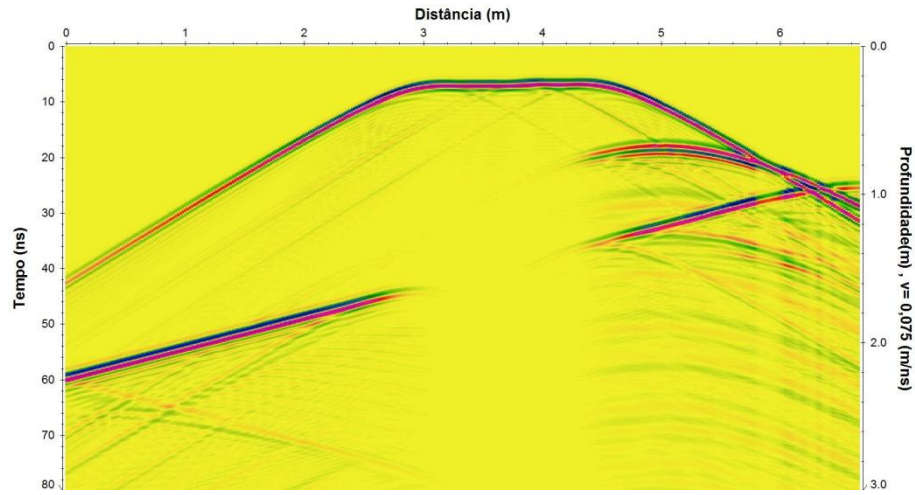


Figura 4.4 - Dado sintético 2 não processado

Apesar de haver poucas reverberações no modelo, realizamos o processamento do perfil a fim de torná-lo mais nítido (Figura 4.5). Como resultado, os refletores e o ponto difrator foram enfatizados. Houve também uma diminuição das reverberações e uma suavização no ruído.

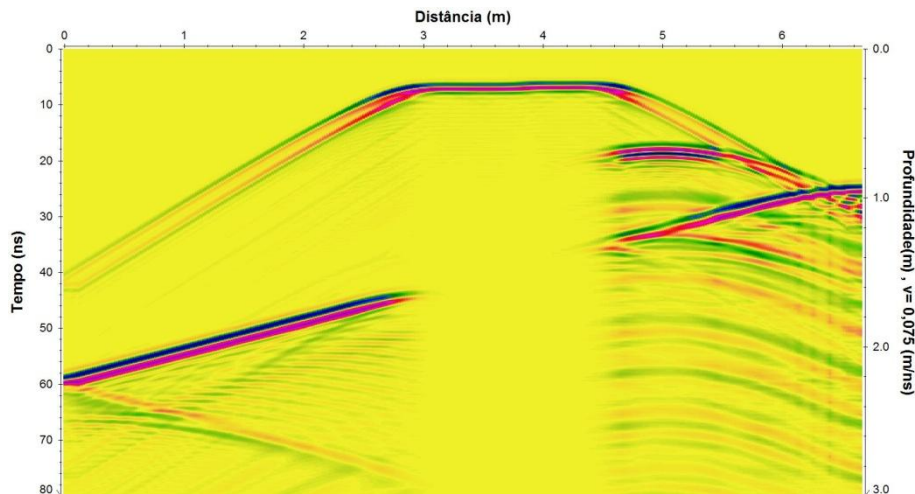


Figura 4.5 - Dado sintético 2 processado

5 CONCLUSÕES

A modelagem dos dados muitas das vezes faz-se necessária em virtude das limitações apresentadas pelo método de GPR, seja no auxílio na interpretação, na determinação de parâmetros ou na previsão de resultados de futuros levantamentos.

A identificação das estruturas, a partir dos padrões de reflexão nas seções de GPR e posterior construção dos dois experimentos, utilizando dois tipos de fontes de energia eletromagnética, realizadas neste trabalho permitiram efetuar um estudo comparativo dos resultados da modelagem. Em que os resultados obtidos proporcionaram um bom imageamento para a maioria dos alvos, notadamente aqueles com maior contraste dielétrico.

Comparando os dados sintéticos obtidos de acordo com os parâmetros descritos na seção 4.2, observamos que o experimento 1 produziu a melhor resposta. Uma vez que, conseguiu simular de forma satisfatória a resposta obtida em campo, enfatizando tanto o refletor horizontal como o inclinado e as reflexões do cano. O experimento 2, por sua vez, apresentou resultado inferior ao experimento 1. Em que este exibiu uma forte atenuação do refletor inclinado e da reflexão do cano.

Através da modelagem realizada neste trabalho, o uso da fonte refletor explosivo mostrou-se mais adequado quando se deseja enfatizar refletores inclinados, já o uso da fonte onda plana é mais apropriado no estudo de refletores horizontais.

De um modo geral, os objetivos propostos neste trabalho foram desenvolvidos de forma eficaz, de modo que os resultados esperados foram alcançados. Assim, futuramente, este trabalho pode contribuir como uma base para trabalhos aplicados na modelagem de dados de GPR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente**: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. 2007. 260f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MØLLER, I. Ground Penetrating Radar. In: KIRSCH, R.; RUMPEL, H.-M.; SCHEER, W., WIEDERHOLD, H. (Eds.) **Groundwater resources in buried valleys** - a challenge for geosciences. Hannover: Leibniz Institute for Applied Geosciences, 2006. p. 99-106.

DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar**. 2nd ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 761 p.

DANIELS, J. J. **Ground Penetrating radar Fundamentals**. Department of Geological Sciences. (Prepared as an appendix to a report to the U.S.EPA, Region V). Columbus: The Ohio State University, November, 25, 2000.

DAVIS J.L.; ANNAN A.P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, Vol.37: 531-551, 1989.

DOURADO, Tiago C. **Aplicação de Técnicas Clássicas do Processamento Sísmico de Reflexão em Dados de Radar (GPR) para Detecção de Hidrocarbonetos em Sedimentos Arenosos**. 2004. 132f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica, Salvador, 2004.

DUARTE, O. O. **Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia**. São Paulo: SBGf, 1997. 352 p.

HAENI, F.P. Evaluation of the continuous seismic-reflection method for determining the thickness and lithology of stratified drift in the glaciated northeast, In: RANDALL, A.D.; JOHNSON, A.I. (Eds.) **Regional aquifer systems of the United States** – the northeast glacial aquifers. [S.l.] American Water Resources Association, 1988. (Monograph, 11)

KNIGHT, R. Ground penetrating radar for environmental applications. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 29, p. 22-255. 2001.

LIMA, R. S. **Otimização De Perfis De Reflexão GPR Sobre Manilhas De Concreto E Tubulações De PVC Instaladas No Sítio Controlado De Geofísica Rasa Do Iag/Usf**. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MERWE, A., V., D; GUPTA, I., J. A Novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, Shallow Land mines. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 38, n. 6, nov. 2000.

OLHOEFT, G. R. Application of ground penetrating radar. In: INT'L., CONF. ON GROUND PENETRATING RADAR GPR'96, 6th Sendai, 1996. **Proceedings**. Sendai, Sept 30- Oct 3, 1996. p. 1-4.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR):** proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado- SP. 1999. 145f. Tese (Doutorado em Geofísica) – UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campos de Rio Claro-SP, 1999.

REYNOLDS, J.M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Willey & Sons, 1997. 806 p.

SANDMEIER, K.J. REFLEXW Version 4.5 for Windows 9x/2000/NT/XP. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. **Manual do Software**. Karlsruhe, 2008.

SOUZA, D. M. **Uso do radar para avaliação geofísica da Contaminação dos postos de combustíveis Bráz de Aguiar (Belém/PA) e São Paulo (Abaetetuba/PA)**. 2008. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) - Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

TELFORD, W. M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 1990. 770 p.

WARD, S. H.; HOHMANN, G. W. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: NABIGHIAN, M. N. (ed.) **Electromagnetic methods in applied geophysics: theory**. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1987. Chapter 4, 130-311 p.

XAVIER NETO, P. **Processamento e Interpretação de dados 2D e 3D de GPR:** Aplicações no Imageamento de Feições Kársticas e Estruturas de Dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda Belém- CE. 2006. 192f. Tese (Doutorado em Geofísica)-Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

YILMAZ, O. *Seismic Data Processing*. Tulsa: Society of Exploration. Geophysics Press, 1987, 526 p.