

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCUS VINÍCIUS AZEVEDO DE OLIVEIRA PACHECO

**ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR DE UMA PORÇÃO DA
BARREIRA HOLOCÊNICA DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL
- BRASIL**

**Caçapava do Sul
2016**

MARCUS VINÍCIUS AZEVEDO DE OLIVEIRA PACHECO

**ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR DE UMA PORÇÃO DA
BARREIRA HOLOCÊNICA DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL
- BRASIL**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
em Geofísica pela Universidade Federal do
Pampa como requisito para obtenção do Título
de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Caron

**Caçapava do Sul
2016**

MARCUS VINÍCIUS AZEVEDO DE OLIVEIRA PACHECO

**ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR DE UMA PORÇÃO DA
BARREIRA HOLOCÊNICA DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL
- BRASIL**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
em Geofísica pela Universidade Federal do
Pampa como requisito para obtenção do Título
de Bacharel.

Área de concentração:

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: __ / __ / __
Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Caron
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
UNIPAMPA

Prof. Dr. Renato Pereira Lopes
UNIPAMPA

RESUMO

O método geofísico de Radar de Penetração no solo (GPR) usa a emissão de pulsos eletromagnéticos e o armazenamento da porção refletida do sinal para gerar imagens da subsuperfície. A produção destas imagens envolve a análise e o processamento dos dados armazenados. O principal propósito do processamento de dados de GPR é superar as limitações impostas pelos meios de aquisição fazendo uso de correções e análises, de forma que o produto final seja compreensível, confiável e adequado para extração de informações. Partindo deste princípio, o presente trabalho tem objetivo processar e analisar dados costeiros de GPR e fornecer uma rotina de processamento que melhor se ajuste ao conjunto de dados em questão. O conjunto de dados usado para este trabalho é composto por seis seções de GPR adquiridas na porção sul da barreira holocênica do município de Santa Vitória do Palmar – RS, Brasil, orientadas NW-SE (perpendiculares a barreira costeira) com cerca de 500 m de comprimento e espaçamento paralelo de 50 m. A antena utilizado para a aquisição foi a *Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) 200 MHz* com o arranjo *common offset*. Também foram utilizados dados de topografia referentes as linhas de GPR. Através do teste de diferentes técnicas de processamento, foi possível selecionar as mais eficientes para os dados costeiros em questão. Estas incluem: o filtro passa-banda, responsável por remover parte das frequências indesejadas presente nos dados; na aplicação do controle de ganho, que realçou as amplitudes do sinal que foi atenuado pelo espalhamento geométrico do sinal; e a correção topográfica, responsável por corrigir a posição dos refletores em relação às variações da superfície. Com a aplicação desta rotina, foi observado uma melhoria significativa na qualidade das imagens, possibilitando uma interpretação mais segura dos radargramas.

Palavras-chave: Radar de Penetração no Solo, análise de dados, Barreira Costeira

ABSTRACT

Ground Penetration Radar (GPR) is a geophysical method which uses electromagnetic energy transmission, reflection and reception to probe the subsurface. GPR data demands analysis and processing to create images. The main purpose of GPR data processing is to overcome the acquisition limitations using corrections and analyses to construct an understandable and reliable product. Accordingly, the present work aims at analyze and process GPR coastal data, and build a processing routine to improve image quality. The data set used for this work contains six GPR sections, which were acquired at the southern portion of the coastal barrier of Santa Vitória do Palmar – RS, Brazil, with NW-SE orientation (perpendicular to the coastal barrier). Those section have an average length of 500m and parallel spacing of 50m. During the acquisition was used the GSSI (geophysical Survey Systems, Inc.) 200MHz antenna for a common offset survey. In addition, topographic data were collected during the GPR survey. Different processing techniques were tested, and a selection was built based on the technique performance for the coastal data. A significant improvement was noticed when the following techniques were applied: band-pass filter, improving the signal to noise ratio; gain control, enhancing the signal amplitudes, which was attenuated by the geometrical spreading of the signal and topographic correction, responsible to correct reflectors' positions by moving traces vertically. In conclusion, the processing routine used for the data set has improved significantly image quality, allowing a reliable and better interpretation.

Keywords: Ground Penetration Radar. Data analyses. Coastal Barrier

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 –A: Localização da área de estudo. B: Localização da área de estudos em detalhe, a partir de uma imagem extraída do Google Earth, e em amarelo as seções de GPR utilizadas neste trabalho 12
- Figura 2 - Exemplo de barreira costeira e seus principais elementos geomorfológicos. 13
- Figura 3 - Diagrama ilustrando (A) a relação morfológica gradual entre lagoas, (B) estuário lagunar, (C) e vale de rio afogado (estuário). 16
- Figura 4 - Mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, destacado em vermelho a área de estudo. 17
- Figura 5 – (A) Mapa geológico, (B) perfil esquemático da PCRS com seus sistemas deposicionais e (C) suas respectivas idades relacionadas. 18
- Figura 6 - (A) Curvas do nível do mar no Holoceno para a costa leste do Brasil. Curva sólida de Corrêa (1990). Curva pontilhada após Martin *et al.* (1979). Curva tracejada após Angulo & Lessa (1997), (B) Curvas de variações do nível do mar para a costa brasileira durante o Holoceno ao norte de 28° S (linha sólida) e sul de 28° S (linha tracejada) de Angulo *et al.* 2006. A sigla AP refere-se a Antes do Presente. 19
- Figura 7 – Barreiras holocênicas e pleistocênica ao longo da costa sul do Brasil (Torres ao Chuí) ilustrando a geomorfologia para a barreira holocênica. (I) demonstra o setor mais ao norte enquanto II, III e IV os setores mais ao sul. Área de estudo destacada em vermelho. 20
- Figura 8 - Relações entre as etapas de aquisição, processamento e interpretação. 21
- Figura 9 – (A) Aquisição dos dados de GPR, perfil com refletores desenhados e as componentes do sistema. (B) Perfil de reflexão gerado pelos dados do radar destacado. 24
- Figura 10 - Principais tipos de aquisição geofísica de reflexão: (A) common offset, (B) common mid (or depth) point, (C) common source e, (D) common receiver. R, representa o receptor e T o transmissor. Fonte: Neal (2004). 25
- Figura 11 - Trajetória dos raios transmitidos e recebidos pela antena para a onda aérea, onda de superfície, onda lateral e onda refletida. 26
- Figura 12 - (a) Perfil não migrado e não filtrado adquirido com a frequência de 100 Mhz mostrando a interferência causada pelo sistema comunicador de rádio das aeronaves em Woodvale, Sefton, nordeste da Inglaterra, (b) remoção do ruído através do tratamento dos dados. 31
- Figura 13 - Diferentes sinais que podem ser recebidos pelo GPR durante aquisição, destacado em vermelho antena e a blindagem. 32

Figura 14 - Resolução vertical e lateral para o GPR.	33
Figura 15 - Diferentes maneiras de leitura de dados, em (A) existem poucos dados e facilmente eles são tratados. Em (B), devido à grande quantidade de dados, a tarefa torna-se mais difícil.	34
Figura 16 – Fluxograma preliminar utilizado para processar os dados de GPR.	35
Figura 17 – Exemplo de diferentes amostragens de sinais. Em (A) a amostragem é suficiente para gerar um sinal análogo ao real, já em (B) o intervalo de amostragem é insuficiente, e gera um sinal que diverge do sinal real.	36
Figura 18 - Cabeçalhos das linhas 16, 8 e 2, expondo a quantidade de amostras (samples) e janela de tempo (time).	37
Figura 19 – Alcance da Resolução Vertical versus Constante Dielétrica para valores comuns de Frequência usados para o GPR.	40
Figura 20 - Comportamento da amplitude em diferentes meios	42
Figura 21 - Parte do radargrama referente a linha 16: em (A) dado cru e em (B) dado com ganho. A direita do radargrama (B), exibição do ganho em função do tempo.	43
Figura 22 - Parte do radargrama referente a linha 16, destacado em laranja o ruído que se repete verticalmente ao longo do radargrama.	44
Figura 23 - A linha vermelha demarca a distribuição da densidade de frequência, enquanto o ponto azul demarca a frequência específica naquele ponto.	45
Figura 24 - Trapézio ilustrando o projeto de um filtro passa banda com os parâmetros (A), (B), (C) e (D).	45
Figura 25 - Espectro de densidade de frequências em vermelho, sinal permitido pelo filtro em azul, abaixo: valores dos limites do filtro em MHz.	46
Figura 26 - A) recorte do radargrama antes do filtro, B) recorte do radargrama depois do filtro, C) recorte do radargrama antes do filtro destacando em amarelo o ruído, D) recorte do radargrama depois do filtro, destacando em amarelo os ruídos que permaneceram e em azul os que foram removidos, F) recorte do radargrama antes do filtro destacando possível refletor de interesse e H) recorte do radargrama depois do filtro, destacando possível refletor de interesse.	47
Figura 27 - Relação dos refletores plano-paralelos (destacado em vermelho) da linha 14 com a sondagem S2 (barra amarela).	49
Figura 28 - Radargrama 14 após a conversão em profundidade, considerando 16 F/m de permissividade dielétrica. Destacado em amarelo a sondagem S2.	50

Figura 29 – Correção topográfica aplicada a linha 20. (A) recorte da linha antes da correção e (B) recorte da linha após a correção topográfica.	51
Figura 30 - Padrões básicos para a interpretação das secções de GPR, (A) terminação dos refletores, (B) geometria externa e (C) configuração dos refletores.	52
Figura 31 - Identificação das terminações para uma parcela do radargrama.	53
Figura 32 - Continuidade dos refletores para o recorte da linha 18.	53
Figura 33 – Padrões identificados através das radarfácies.	54
Figura 34 - (A) recorte interpretado do radargrama 18, (B) destaque da possível continuidade de refletores e (C) a provável propagação do ruído no radargrama.	55
Figura 35 - (A) parte do radargrama 18 não processado e (B) seu espectro de frequências....	55
Figura 36 - Fontes de emissão de ondas eletromagnéticas	56
Figura 37 - Algumas das rádios e suas respectivas frequências para o município de Santa Vitória do Palmar - RS.	56
Figura 38 - (I) Vista aérea das morfologias modernas e (II) recorte do radargrama 18 interpretado.	58
Figura 39 - padrões das radarfáceis repetindo-se nas linhas 12, 14, 18 e 24.	59
Figura 40 - Secção do radargrama 18, antes e depois do processamento.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	11
3 ÁREA DE ESTUDO.....	12
4 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	13
4.1 Barreiras Costeiras.....	13
4.1.1 Controle Geológico, Oceanográfico e Climático das Barreiras Costeiras.....	14
4.1.2 Nível do Mar.....	14
4.1.3 Declive de Substrato.....	14
4.1.4 Sedimentos.....	14
4.1.5 Ondas e Marés.....	15
4.1.6 Ventos.....	15
4.2 Barreiras Transgressivas.....	15
4.3 A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS).....	16
4.4 Nível do mar durante o Holoceno no sul do Brasil.....	18
4.5 Sistema Laguna Barreira IV.....	19
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
5.1 Base Cartográfica.....	21
5.2 Dados de Radar de Penetração no Solo (GPR).....	22
5.3 Dados de Sondagem.....	23
5.4 Interpretação dos Dados.....	23
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
6.1 O Radar de Penetração no Solo (GPR).....	23
6.2 Aquisição de Dados.....	24
6.3 Equações de Maxwell.....	26
6.4 A Interação da Onda Eletromagnética com o Meio.....	28
6.4.1 Propriedades Físicas do Meio e da Onda.....	28
6.4.2 Trajetória da Onda – Lei de Snell.....	28
6.4.3 Velocidade da Onda Eletromagnética.....	29
6.5 Sinal e Ruído.....	29
6.5.1 Atenuação do Sinal.....	30
6.5.2 Ruído.....	30
6.5.3 Blindagem.....	31
6.6 Resolução e Fidelidade.....	32

7. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	34
7.1 Controle de Qualidade.....	36
7.1.1 Taxa de Amostragem.....	36
7.1.2 Verificando a Resolução Vertical.....	39
7.2 Controle de Ganho	41
7.3 Filtros	44
7.3.1 Filtro de Frequências – Passa-Banda.....	44
7.4 Conversão em Profundidade	48
7.5 Correção Topográfica.....	50
8 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	51
8.1 Radarfáceis	51
8.2 Do Ruído Não Removido	54
9 RESULTADOS.....	57
9.1 Da Consistência do Controle de Qualidade.....	57
9.1.1 Quantitativa	57
9.1.2 Qualitativa	57
9.2 Do Processamento dos Dados	57
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica deposicional de sistemas laguna-barreira responde a variações na disponibilidade de sedimentos, orientação da linha de costa, oscilações de nível de base, bem como ação de ventos e ondas (Dillenburg e Hesp, 2009). Mudanças nestes fatores preservam registros em subsuperfície que podem ser imageados através do método de radar de penetração no solo (GPR) (Neal, 2004). O GPR é o método que usa ondas eletromagnéticas de alta frequência (10-1000 MHz) para examinar a subsuperfície de maneira indireta (Jol, 2009). Como demonstrado nos trabalhos de Davis e Annan (1989), Neal (2004), Manzoli (2011), Rosa (2012), Caron (2014), Barbosa et al. (2014).

Dados processados de GPR possibilitam uma visualização eficaz de estruturas e geometrias contidas em subsuperfície, que podem ser interpretadas com intuito de contribuir no entendimento da dinâmica que condicionou tais depósitos no passado.

Neste contexto, o presente trabalho pretende colaborar com rotinas de processamento de dados de GPR da barreira costeira holocênica do município de Santa Vitória do Palmar, priorizando a melhoria de imagens 2D para interpretações mais seguras.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Processar e interpretar dados de GPR adquiridos na barreira holocênica na região costeira do município de Santa Vitória do Palmar, RS.

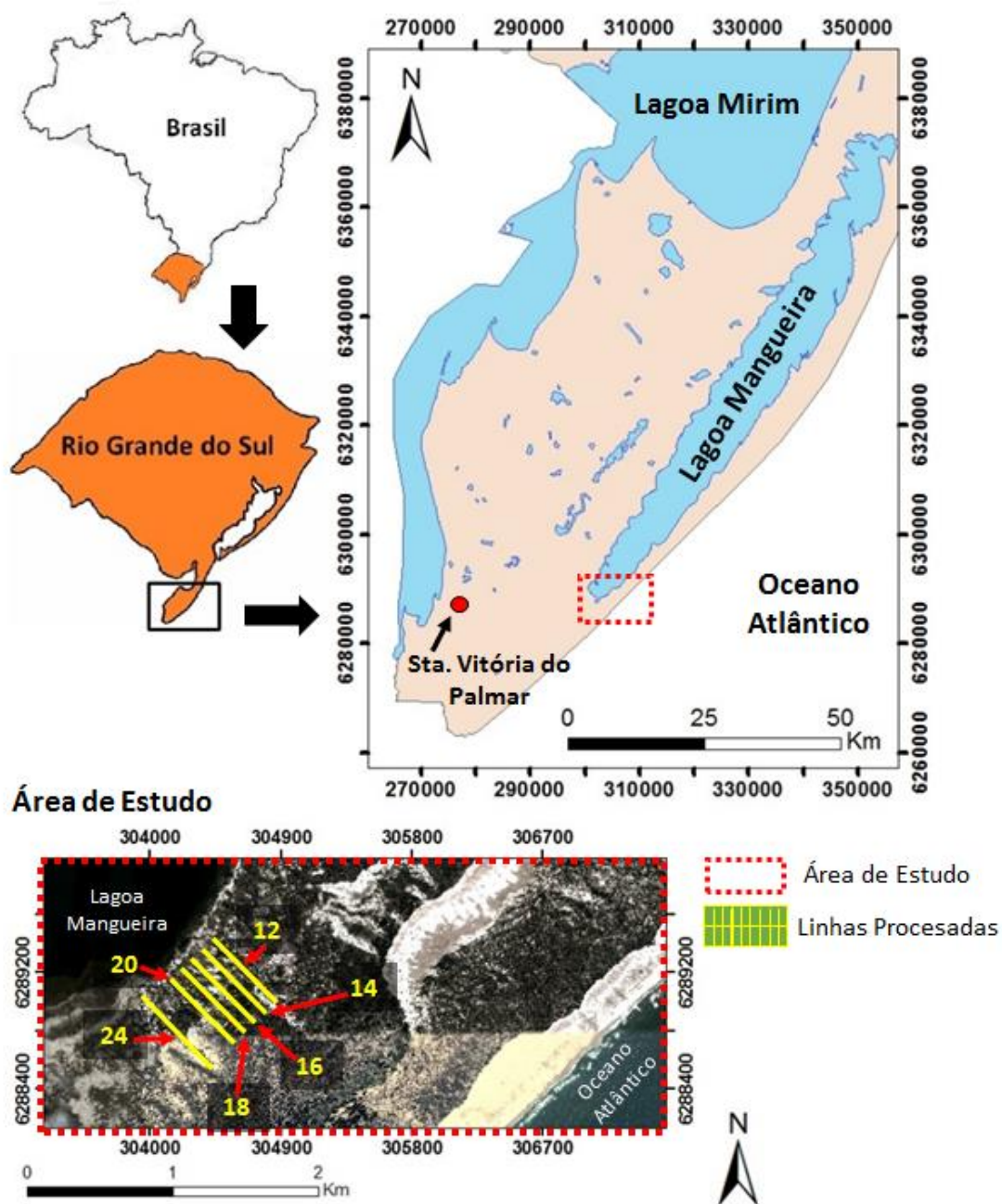
Objetivos específicos:

- Gerar rotinas de processamento para melhoria das imagens de GPR.
- Utilizar os conceitos de sismoestratigrafia com intuito de interpretar os dados em termos de geometrias relativas e superfícies dos sistemas deposicionais correlatos.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é a barreira costeira holocênica do município de Santa Vitória do Palmar, conhecida localmente como Praia dos Concheiros (figura 1). É limitada a SE pelo Oceano Atlântico e NW pela Lagoa Mangueira, a NE e a SW continuam depósitos associados a barreira holocênica.

Figura 1 –A: Localização da área de estudo. B: Localização da área de estudos em detalhe, a partir de uma imagem extraída do Google Earth, e em amarelo as seções de GPR utilizadas neste trabalho



Fonte: Modificado de Google Earth (2016).

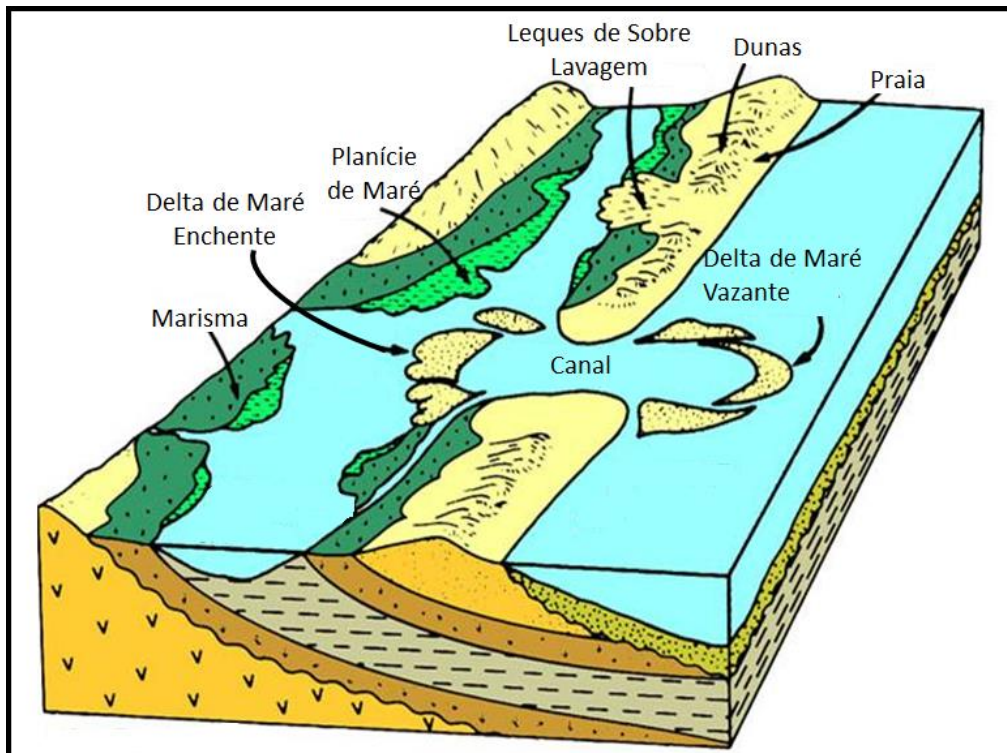
Destaca-se em vermelho a área de estudo, que é limitada a sudoeste pelo Oceano Atlântico e a noroeste pela Lagoa Mangueira. As linhas amarelas ilustram o posicionamento das linhas de GPR usadas para a etapa de processamento.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 Barreiras Costeiras

Tratando-se de costas dominadas por ondas de baixo gradiente, podemos caracterizar as barreiras costeiras como o elemento mais importante em termos de deposição e estruturas geomorfológicas. Elas ocorrem em todo o mundo, especialmente onde a topografia costeira é suave e o suprimento sedimentar tende a ser abundante. De acordo com Dillenburg (2009), podemos definir barreira costeira como uma estrutura costeira paralela, formada pelo acúmulo de areia, cascalho, conchas e pequenas quantidades de matéria orgânica devido à ação das ondas, marés e ventos. Possui porções subaéreas e subaquosas com a primeira condicionada a posição, sendo permanente ou parcialmente exposta acima do nível do mar durante as marés altas (figura 2). É possível caracterizar as barreiras costeiras de maneira estratigráfica em transgressivas e regressivas (Dillenburg e Hesp, 2009).

Figura 2 - Exemplo de barreira costeira e seus principais elementos geomorfológicos.



4.1.1 Controle Geológico, Oceanográfico e Climático das Barreiras Costeiras

4.1.2 Nível do Mar

De acordo com Dillenburg e Hesp (2009), em costas dominadas por ondas, o comportamento do nível do mar é de extrema importância, principalmente se o mesmo variar rapidamente.

Sob tais condições, as barreiras irão apresentar morfologia transgressiva (retrogradante) ou regressiva (progradante), e características estratigráficas específicas. No entanto, se o nível do mar estiver subindo ou descendo vagarosamente, ou estiver estável, o suprimento sedimentar pode dominar a maneira da construção da barreira, modificando sua estrutura (Roy et al. 1994, apud Dillenburg e Hesp 2009).

4.1.3 Declive de Substrato

O substrato de uma barreira é a superfície sobre a qual os depósitos da barreira e da lagoa/estuário são formados, correspondente a antiga topografia que foi afogada pelo avanço do nível do mar (Dillenburg e Hesp, 2009). Desta forma variações na morfologia do substrato podem exercer influência na morfologia dos depósitos da barreira. Como, por exemplo, na energia das ondas ao longo da costa (Wright 1976, apud. Dillenburg e Hesp 2009).

De acordo com Roy et al (1994) e Cowell et al. (1992) apud. Dillenburg e Hesp (2009) barreiras costeiras preferencialmente se desenvolvem em valores restritos de declive de substrato ($0,05^\circ$ a $0,8^\circ$). Em declives muito baixos ($<0,01^\circ$), o atrito com o fundo reduz a energia das ondas incidentes, diminuindo o transporte de sedimento em direção ao continente, ao ponto que bancos submersos serão formados ao invés de barreiras costeiras. Já em substratos acima de $0,8^\circ$, a areia que construiria a barreira é acumulada na plataforma, produzindo bancos de areia, isto ocorre devido ao aumento de sedimento transportado em direção ao oceano.

4.1.4 Sedimentos

A disponibilidade de sedimentos (especialmente areias) é crucial para o desenvolvimento da barreira. Essas areias são oriundas da erosão da plataforma continental, do retrabalhamento de qualquer morfologia adjacente a costa e projeções, bem como sedimentos fluviais, e produção de carbonato in situ (Hesp e Short, 1992 apud. Dillenburg e Hesp 2009).

4.1.5 Ondas e Marés

A taxa de transporte sedimentar na costa é diretamente relacionada ao nível de energia das ondas, portanto, a ação das ondas é claramente importante para a formação da barreira, condicionando o suprimento sedimentar, e por consequência, o tipo da barreira (Hesp and Short 1999 apud. Dillenburg e Hesp 2009).

Marés não são essenciais no desenvolvimento de barreiras, no entanto, a zona de rebentação pode ser significativamente condicionada pela área de atuação das marés (Masselink and Short 1993; Anthony and Orford 2002, Apud. Dillenburg e Hesp 2009), e consequentemente mudando a configuração da barreira.

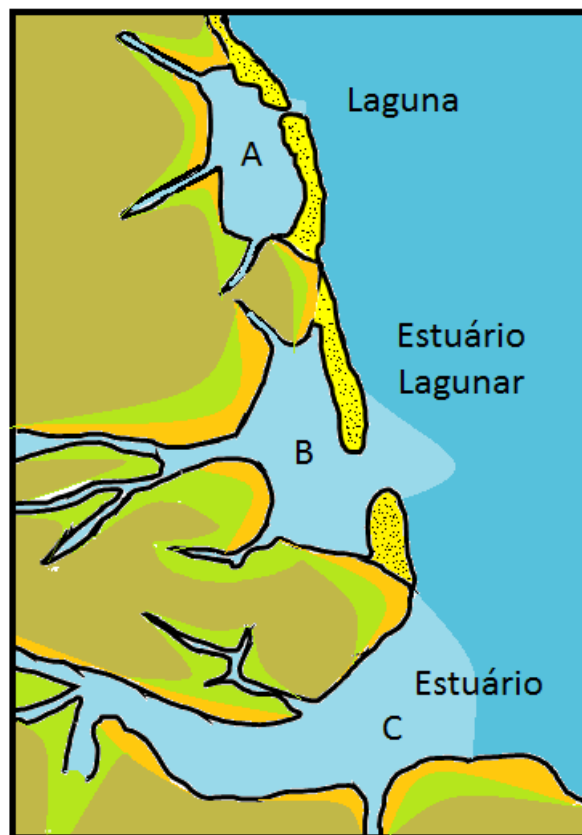
4.1.6 Ventos

Os regimes de ventos não exercem influência direta na formação da barreira, porém, em zonas costeiras dominadas por ondas, onde o nível do mar tem sido estável ou quase estável ($\sim \pm 1-3$ m) nos últimos 7-6 ka, onde há disponibilidade de sedimento e o vento sopra em direção ao continente com energia moderada a alta, é possível atribuir a formação das estruturas emersas e por vezes imersas da barreira ao vento (Dillenburg e Hesp 2009).

4.2 Barreiras Transgressivas

Podemos definir de maneira genérica barreiras transgressivas como um corpo de areia longo e estreito que separa sedimentos marinhos lamosos de sedimentos lagunares lamosos (Reinson, 1992). No entanto, a complexa interação da formação da barreira com a dinâmica costeira pode gerar diferentes padrões morfológicos e estruturais. Reinson (1992) subdividiu as barreiras transgressivas em 3 tipos principais (figura 3): A) ilhas barreiras, que protegem a lagoa com poucos rios fluindo; B) barreiras com lagoas mais extensas, com inúmeros rios com desembocadura afogada; C) vales de rios afogados (estuário) em forma de funil com poucas ou quase nenhuma barreira próxima a desembocadura.

Figura 3 - Diagrama ilustrando (A) a relação morfológica gradual entre lagoas, (B) estuário lagunar, (C) e vale de rio afogado (estuário).

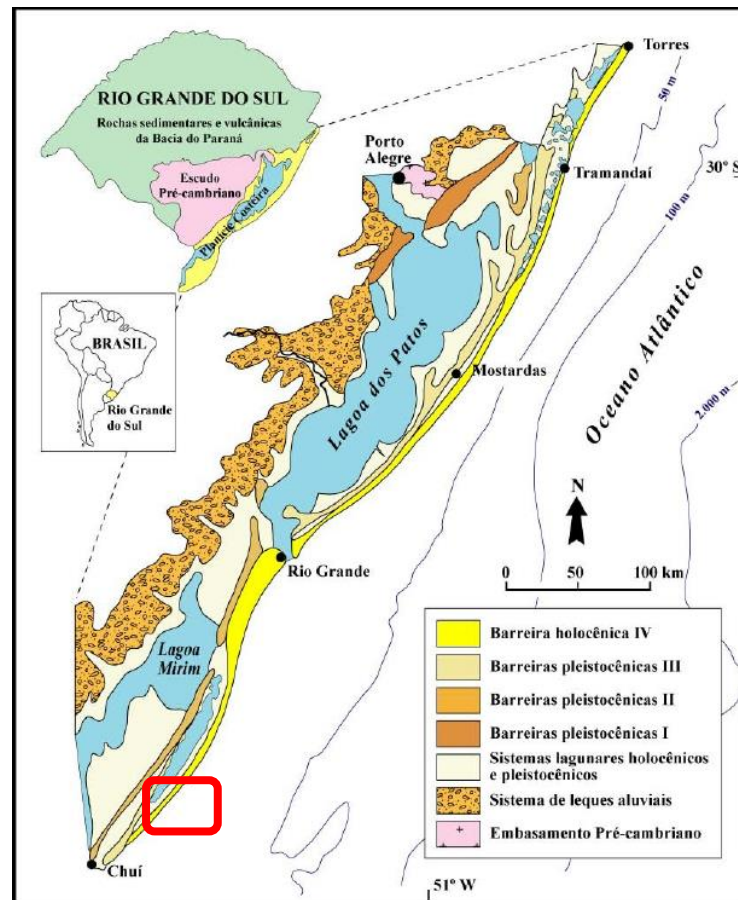


Fonte: Modificado de Reinson (1992).

4.3 A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS)

A planície costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) é composta por leques aluviais e pela justaposição de quatro sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, formados por sucessivas elevações e rebaixamentos do Nível Relativo do Mar (NRM) durante o Quaternário (Tomazelli, 2000). Neste modelo foram propostos os sistemas Laguna-Barreira I, II, III, pleistocênicos (estágios interglaciais 11, 9 e 5 respectivamente) e o sistema Laguna-Barreira IV holocênico, (estágio interglacial 1) (Figura 4).

Figura 4 - Mapa geológico simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, destacado em vermelho a área de estudo.

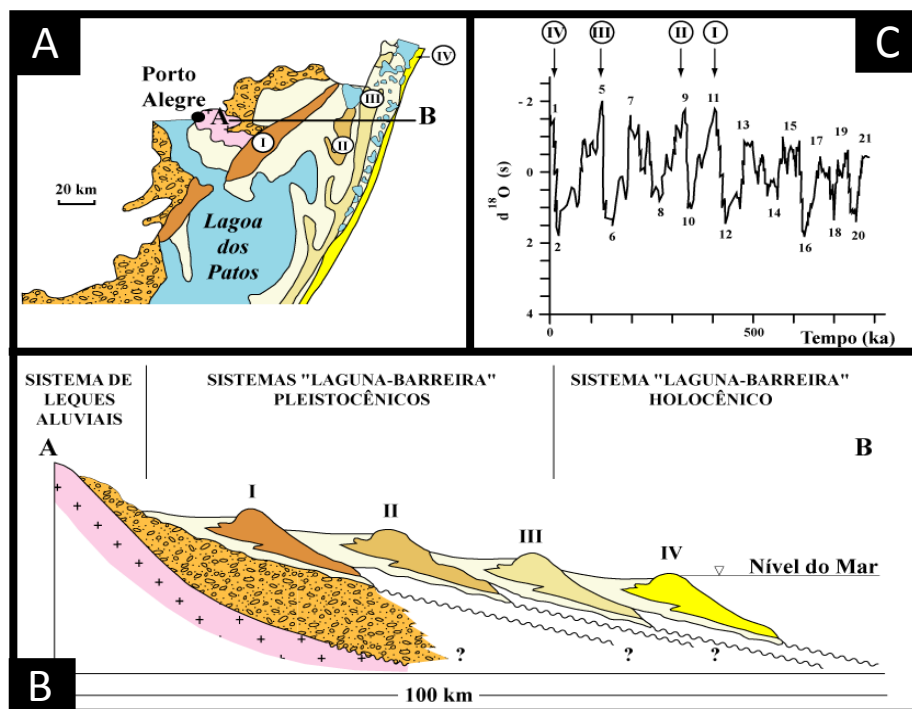


Fonte: Tomazelli e Villwock (2000).

As barreiras pleistocênicas também apresentam variabilidades nos padrões morfológicos, estratigráficos e contextos evolutivos (Tomazelly e Villwock, 2000) (Figura 5).

A mais moderna das barreiras, a barreira IV, iniciou sua formação há cerca de 7ka, com a migração de uma barreira transgressiva durante os estágios finais da Transgressão Marinha Pós-Glacial (Dillenburg *et al.*, 2000). A formação da barreira IV isolou grandes corpos lagunares, que foram segmentados durante o rebaixamento do nível do mar que se seguiu ao máximo transgressivo de 5ka A.P. (Tomazelli e Villwock, 2000).

Figura 5 – (A) Mapa geológico, (B) perfil esquemático da PCRS com seus sistemas deposicionais e (C) suas respectivas idades relacionadas.

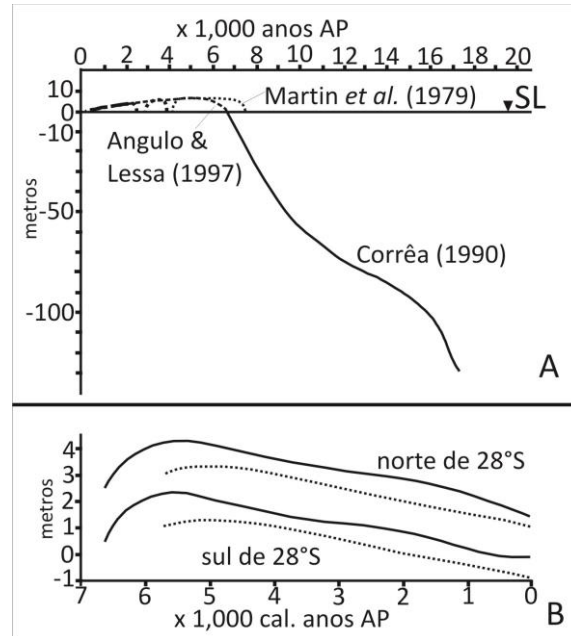


Fonte: Tomazelli *et al.* (2000).

4.4 Nível do mar durante o Holoceno no sul do Brasil

Embora existam divergências pontuais entre os diversos autores das curvas que sintetizam a variação do nível do mar durante o Holoceno médio e tardio, há concordância de que o nível atual foi ultrapassado em torno de 7 ka e que, entre 5 e 6 ka foi atingido um nível máximo situado alguns metros acima do nível atual (Caron, 2014). Martin *et al.* (1980) apresentam uma curva de variação do NRM durante Holoceno, no litoral de Santa Catarina, mostrando que nível relativo do mar alcança seu nível atual em torno de 7 ka AP. Após esse período o NRM teria subido acima do nível atual três vezes, em 5.1, 3.6, e 2.5 ka AP anos, com o nível do mar atingindo as cotas de 4, 2.5 e 2 m acima do nível atual respectivamente ($\pm 0,5m$ de erro). A partir de datações de vermitídeos, Angulo *et al.* (2006) propuseram uma curva de variação do NRM para o litoral sul de SC, em que o nível de mar alto ocorreu há 5.4 ka A.P., chegando a 2.1 ± 0.5 m acima do nível atual, correspondendo ao máximo da transgressão marinha pós-glacial, e declínio contínuo do NRM desde 3 ka A.P. até os dias atuais (taxas de 0,4 mm/ano) (figura 6).

Figura 6 - (A) Curvas do nível do mar no Holoceno para a costa leste do Brasil. Curva sólida de Corrêa (1990). Curva pontilhada após Martin *et al.* (1979). Curva tracejada após Angulo & Lessa (1997), (B) Curvas de variações do nível do mar para a costa brasileira durante o Holoceno ao norte de 28° S (linha sólida) e sul de 28° S (linha tracejada) de Angulo *et al.* 2006. A sigla AP refere-se a Antes do Presente.

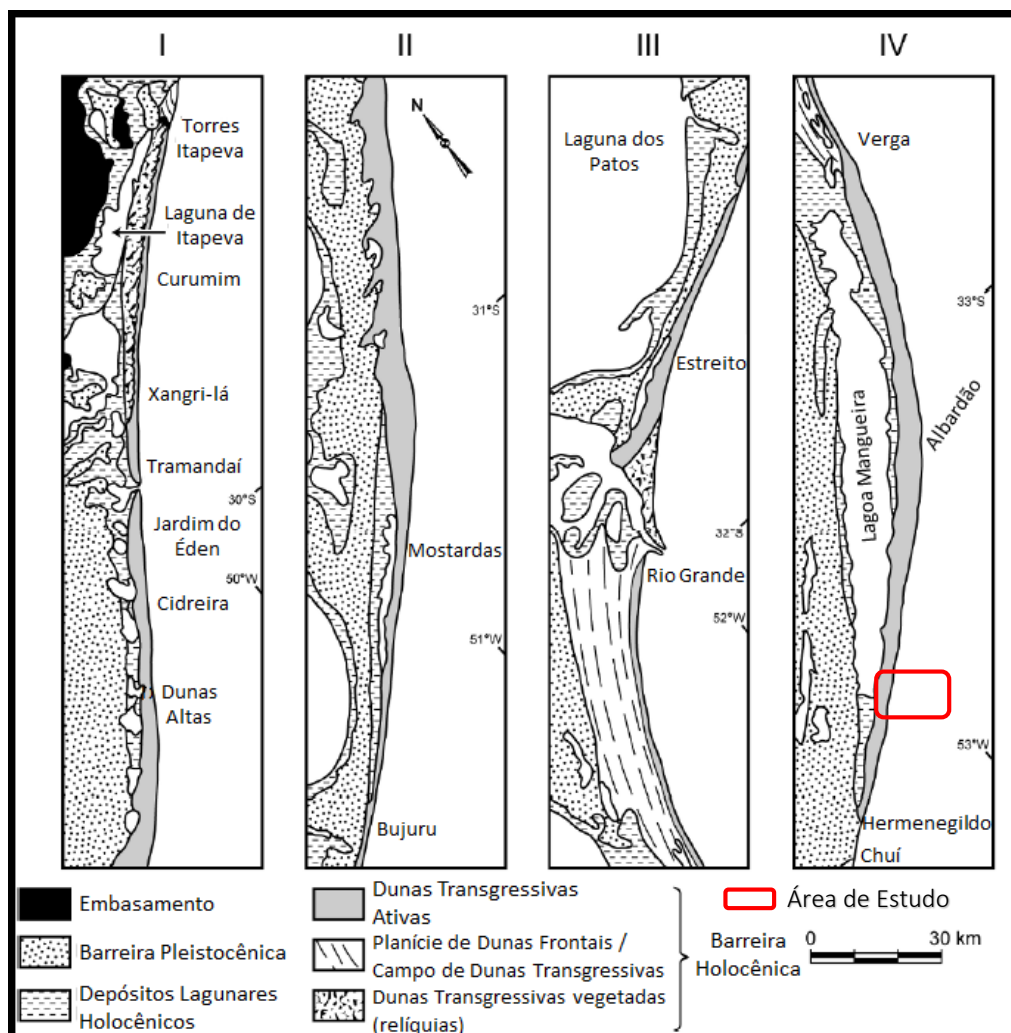


Fonte: modificada de Dillenburg *et al.* (2009).

4.5 Sistema Laguna Barreira IV

De acordo com Dillenburg e Hesp (2009), o sistema laguna-barreira IV se originou aproximadamente a 7 ka, antes do presente (AP) e continua ativo até os dias atuais (Barreira IV). Esta barreira holocênica não exhibe evolução uniforme durante o Holoceno médio e tardio. As reentrâncias costeiras possuem caráter regressivo. Onde há projeções na costa, ocorrem barreiras transgressivas. Tanto as barreiras transgressivas quanto regressivas são dominadas e cobertas por um campo de dunas transgressivas (figura 7). O contraste entre os tipos de barreira é resultado do gradiente na energia das ondas aplicado a longo prazo na costa, que por sua vez tem determinado a diferença no aporte sedimentar ao longo da costa. De Torres até Tramandaí, e de Estreito até Verga a barreira Holocênica possui padrão regressivo, demonstrando uma progradação máxima de 4.7 e 14 Km, respectivamente, que iniciou no estágio final da Transgressão Pós Glacial Marinha (~7 Ka) (Dillenburg e Hesp, 2009).

Figura 7 – Barreiras holocênicas e pleistocênica ao longo da costa sul do Brasil (Torres ao Chuí) ilustrando a geomorfologia para a barreira holocênica. (I) demonstra o setor mais ao norte enquanto II, III e IV os setores mais ao sul. Área de estudo destacada em vermelho.



Fonte: Modificado de Hesp et al. (2005) apud. Dillenburg e Hesp (2009).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

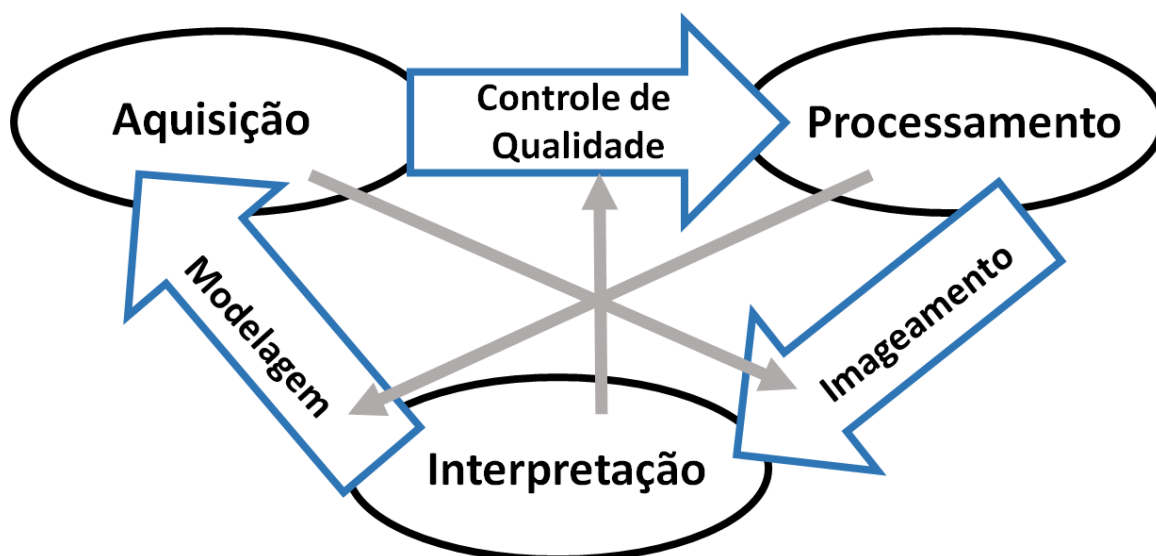
De forma sucinta, o presente trabalho pode ser subdividido em aquisição, processamento e interpretação dos dados. No entanto a relação entre estas etapas ocorre de forma complexa (figura 8):

I) Difícilmente as condições para aquisição de dados geofísicos são perfeitas, muitas vezes imposições naturais como relevo, regime de chuvas e ruídos presentes no ambiente impossibilitam uma aquisição de maior qualidade. Portanto, é realizado a etapa de controle de qualidade antes do processamento dos dados para verificar se o dado adquirido possui bom potencial.

II) A etapa de processamento de dados é responsável por fornecer correções e tratamento analítico aos dados. Ao fim do processamento dos dados, é esperado um produto passível de extração de informações de interesse, geralmente este produto final é apresentado em forma de imagem. E o conjunto de processos responsáveis por transformar dados em imagens é chamado de imageamento.

III) Com os dados em forma de imagem, é possível interpreta-los, produzir inferências e possivelmente gerar um modelo. Esta etapa retorna ao ponto da aquisição, haja vista que os parâmetros de aquisição, informações sobre o ambiente em questão, bem como a correlação com outros métodos de aquisição de informações podem auxiliar na criação de modelos.

Figura 8 - Relações entre as etapas de aquisição, processamento e interpretação.



Fonte: adaptado de Zhou (2013)

Durante a execução do trabalho, estas etapas se comunicam de forma interativa com intuito de traçar estratégias ou gerar questionamentos pertinentes aos dados. Neste trabalho, por exemplo, as linhas de GPR foram adquiridas ortogonalmente à barreira costeira, apesar de que na etapa de aquisição ainda não se sabe o resultado em forma de imagem, espera-se uma melhor visualização das feições e variações laterais desta maneira. Tornando evidente a ligação entre a aquisição e a etapa de imageamento, mesmo antes da etapa de processamento dos dados.

5.1 Base Cartográfica

A base cartográfica foi usada como alicerce para a análise das feições superficiais da área e também para a referência do local das linhas de aquisição de dados de GPR. Estes

dados foram processados no *software* QGIS. O banco de dados cartográfico deste trabalho incluiu (tabela 1):

Tabela 1: Componentes da base cartográfica e seus respectivos produtos:

Componentes da Base Cartográfica	Produtos
Mosaico construído com imagens do Google Earth (2016)	Mapa de alta resolução georreferenciado.
Dados de DGPS (<i>Diferencial Global Position System</i>), adquiridos em conjunto com as linhas de GPR	Correção topográfica dos dados de GPR.
Mapa geológico	Informações geológicas

5.2 Dados de Radar de Penetração no Solo (GPR)

Os dados de GPR que foram utilizados neste trabalho fazem parte do banco de dados adquiridos no trabalho de Caron (2014). O banco de dados contém aproximadamente 20 linhas de GPR com as seguintes características:

- Orientação NW-SE, perpendicular a barreira costeira.
- As linhas possuem cerca de 500 m de comprimento, separadas por 50 m cada.
- A antena usada para a aquisição foi a *Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) 200 MHz*.
- O arranjo utilizado foi o *common offset*.

Um dos grandes focos deste trabalho é o processamento e análise dos dados. Desta forma, técnicas clássicas para o processamento de dados de GPR foram testadas e aplicadas com intuito de julgar quais técnicas são mais apropriadas para o estudo em questão e quais apresentam melhores resultados respeitando o limite de fidelidade dos dados. Estes dados foram processados usando o *software* Prism 2.5 em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

5.3 Dados de Sondagem

Para fins de controle de qualidade, é aconselhável que o dado geofísico seja correlacionado com algum tipo de dado físico (amostrado diretamente). Para tal, os dados de GPR deste trabalho foram processados e correlacionados com dados de sondagem de Caron (2014). Segundo o mesmo, o critério para localização das sondagens foi condicionado pela disposição dos ambientes deposicionais identificados na superfície da barreira, bem como com posicionamento das linhas de GPR. A altimetria das sondagens foi estabelecida através de cotas obtidas pelo sistema de DGPS.

5.4 Interpretação dos Dados

Os dados processados de GPR, associados aos dados de topografia, foram interpretados com finalidade de gerar um modelo geológico-geofísico. Para efetuar a interpretação, foi seguido as seguintes etapas de acordo com os conceitos de sismoestratigrafia:

- Identificar terminações de refletores;
- Traçar horizontes;
- Inferir geometrias internas e externas;
- Determinar superfícies;
- Descrever a arquitetura deposicional;
- Gerar seções geológicas/geofísicas interpretadas;

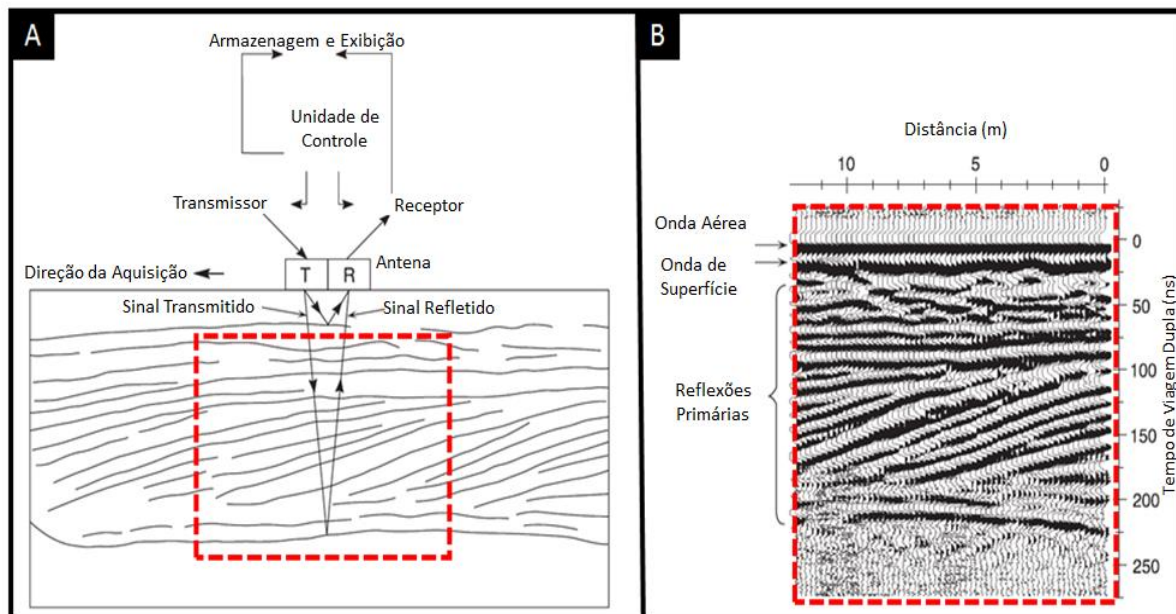
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1 O Radar de Penetração no Solo (GPR)

A aplicação do Radar de Penetração no Solo é o método que usa ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 - 1000 MHz) para examinar a subsuperfície. A forma mais comum de sua aplicação consiste em efetuar medidas posicionando um transmissor e um receptor com uma geometria fixa, que serão movidos ao longo de uma superfície. O pulso eletromagnético é enviado por uma antena transmissora se propagando pelo subsolo até encontrar um horizonte com contraste nas propriedades dielétricas (constante dielétrica). Desta maneira, parte da energia é refletida para a superfície e parte é transmitida, se propagando em subsuperfície. A

onda refletida é recebida pela antena receptora, amplificada, digitalizada, e armazenada na memória da unidade controladora (Jol, 2009) (figura 9).

Figura 9 – (A) Aquisição dos dados de GPR, perfil com refletores desenhados e as componentes do sistema. (B) Perfil de reflexão gerado pelos dados do radar destacado.



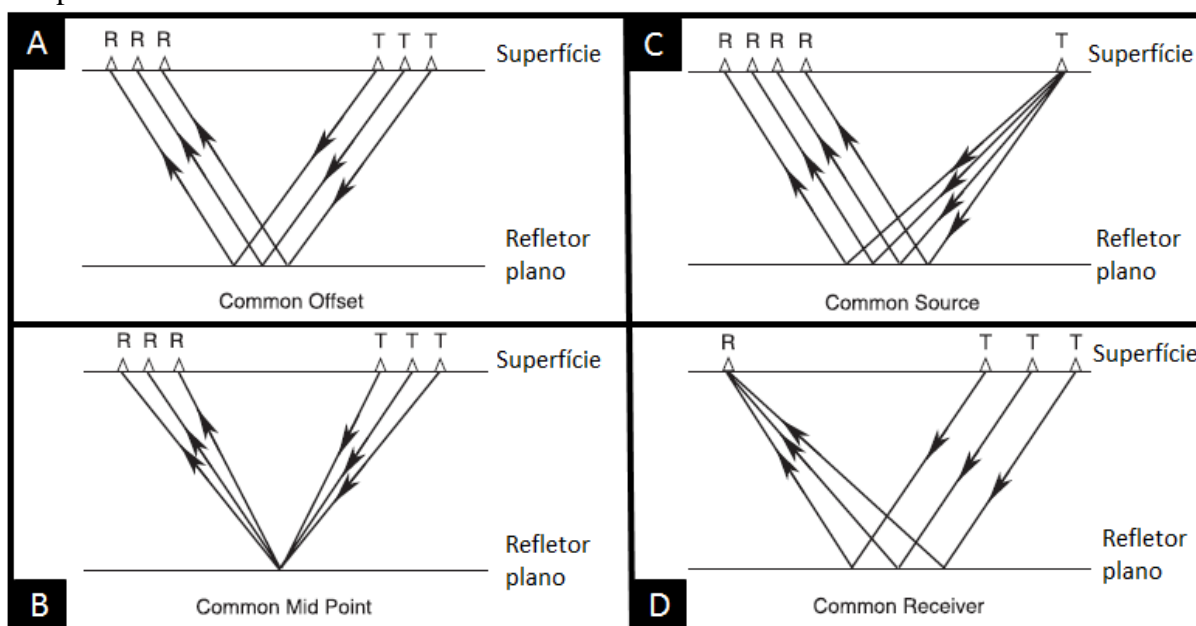
Fonte: Neal (2004).

O contraste das constantes dielétricas do meio, combinado com o amplo espectro de frequência do radar, resulta em uma ampla área de aplicação, tais como: estruturas geológicas, estruturas de concreto, madeira, depósitos glaciais, entre outros.

6.2 Aquisição de Dados

De forma clássica, a aquisição geofísica de reflexão pode ser subdividida em quatro tipos principais (figura 10): (A) *common offset*, (B) *common mid (or depth) point*, (C) *common source* e (D) *common receiver*.

Figura 10 - Principais tipos de aquisição geofísica de reflexão: (A) *common offset*, (B) *common mid (or depth) point*, (C) *common source* e, (D) *common receiver*. R, representa o receptor e T o transmissor.



Fonte: Neal (2004).

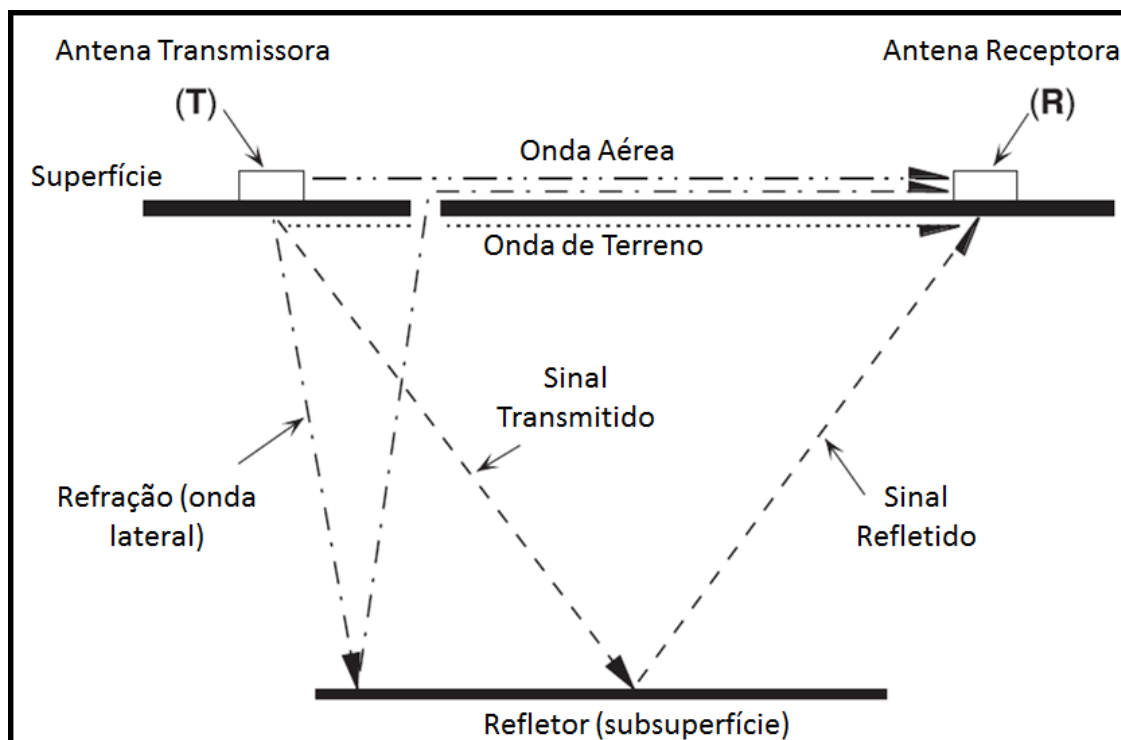
À medida em que os dados são coletados durante a aquisição, uma sequência de traços de reflexão organizados horizontalmente cria o radargrama. Cada traço criado é resultado da interação do sinal gerado pelo GPR com o meio. Em geral, este pulso de energia eletromagnética estará na faixa de MHz. A medida que a onda se propaga e atinge diferentes interface com diferentes propriedades elétricas da matéria, ocorre mudança na sua velocidade (Neal, 2004).

Com o comprimento de onda (dominante) apropriado e uma mudança abrupta na velocidade, parte da energia será refletida de volta a superfície. Assim, o sinal refletido será detectado pelo receptor (antena). O tempo decorrido entre a transmissão do sinal, sua reflexão e a captação é referido como tempo duplo de percurso (*two-way travel time - TWT*). Uma importante variável para o levantamento geofísico de reflexão. No caso do GPR, este tempo é medido em nanosegundos (10^{-9} s) (Neal, 2004). O TWT varia de acordo com a profundidade percorrida pelo sinal, com espaçamento das antenas (em caso de aquisição com mais de uma antena) e com velocidade média da onda no meio.

As reflexões registradas da subsuperfície não é o único tipo de sinal captado no traço do radar, o primeiro pulso a ser registrado pela antena será a onda aérea (*airwave*) (figura 11), que viaja da antena transmissora para receptora na velocidade da luz ($0,2998 \text{ m ns}^{-1}$); a segunda onda a chegar é a onda de superfície (*ground wave*) (figura 11), que viaja diretamente pela

superfície do transmissor ao receptor. Como pode ser notado na figura 11, a *air wave* e *ground wave* mascaram as reflexões mais rasas (próximas a superfície).

Figura 11 - Trajetória dos raios transmitidos e recebidos pela antena para a onda aérea, onda de superfície, onda lateral e onda refletida.



Fonte: Fisher et al. (1996); apud. Neal (2004).

Ondas laterais (*lateral waves*) também podem estar presentes, por consequência de reflexões rasas que se aproximam da superfície com o ângulo crítico apropriado, e são subsequentemente refratadas ao longo da interface ar-superfície (Clough, 1976; apud. Neal, 2004).

6.3 Equações de Maxwell

As Equações de Maxwell são responsáveis por descrever matematicamente o comportamento dos campos eletromagnéticos (EM). Muitas das equações que aparecerão ao decorrer deste trabalho são oriundas da combinação destas equações com as teorias clássicas de circuitos elétricos, propagação de ondas eletromagnéticas e indução.

Em termos matemáticos, os campos eletromagnéticos e suas relações em forma diferencial podem ser descritas de acordo com:

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

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

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4)$$

• **Equação (1):** Lei de Faraday-Neumann-Lenz, ou lei da indução eletromagnética, onde:

\bar{E} é o vetor intensidade do campo elétrico (V/m);

\bar{B} é o vetor de densidade de fluxo magnético (T);

t é o tempo (s).

Responsável por descrever a variação temporal de campos magnéticos atravessando circuitos elétricos com o aparecimento de forças eletromotrizes nesses circuitos.

• **Equação (2):** Lei de Ampère, onde:

\bar{H} é a intensidade do campo magnético (A/m);

\bar{J} é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m²);

$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$ é a corrente de deslocamento.

Esta lei nos permite calcular o campo magnético a partir de uma distribuição de densidade de corrente elétrica J .

• **Equação (3):** Lei de Gauss, onde:

\bar{D} é o vetor de deslocamento da corrente (C/m²);

q é a carga elétrica.

Relaciona o campo elétrico com a distribuição espacial de cargas.

• **Equação (4):** Lei de Gauss para o Eletromagnetismo, onde:

\vec{B} é o vetor do fluxo de densidade magnética

Como não há carga magnética, o resultado do cálculo do fluxo magnético em uma dada superfície ou volume é zero.

6.4 A Interação da Onda Eletromagnética com o Meio

6.4.1 Propriedades Físicas do Meio e da Onda

As propriedades-chaves da matéria que regem o comportamento da propagação da energia eletromagnética em um meio são: a permissividade dielétrica (ϵ), condutividade elétrica (σ) e permissividade magnética (μ).

Quando um campo elétrico alternado é aplicado a um material, as cargas elétricas incapazes de mover-se livremente (ligadas), respondem ao campo aplicado com uma pequena parcela de movimento. Quando o campo resultante interno se iguala ao campo elétrico externo as cargas cessam o movimento (Olhoeft, 1998; apud Neal 2004). Essa separação entre as cargas é chamada de polarização e pode ser de vários tipos (Powers, 1997; apud Neal 2004). A polarização é a forma como o sinal emitido pelo GPR interage com a matéria, diferentes interações geram diferentes respostas, que por sua vez podem ser processadas e distinguidas.

6.4.2 Trajetória da Onda – Lei de Snell

O GPR opera com a detecção do sinal refletido por interfaces, sendo o sinal emitido uma onda eletromagnética, é esperado que o sinal obedeça às teorias clássicas do eletromagnetismo e da ondulatória. Deste modo, é possível descrever matematicamente a trajetória do sinal com a Lei de Snell:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \quad (5)$$

Sendo: θ_1 e θ_2 respectivamente os ângulos de incidência e reflexão;

v_1 e v_2 respectivamente as velocidades de incidência e reflexão;

Desde que haja contraste nas propriedades dielétricas entre duas interfaces, é esperado que ocorra reflexão. Apesar de simples, este evento é primordial para o método de GPR.

6.4.3 Velocidade da Onda Eletromagnética

A velocidade (v) de uma onda eletromagnética pode ser escrita em função da sua frequência (f), velocidade da onda eletromagnética no vácuo (c), e da média relativa da constante dielétrica do meio (ϵ_r), da permeabilidade magnética relativa (μ_r) e condutividade elétrica (σ):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2}}{2}}} \quad (6)$$

Sendo:

$\sigma/\omega\epsilon$: fator atenuante.

$\omega = 2\pi f$, é a frequência angular (rad s^{-1})

Para matérias de fator atenuante baixo, como areia limpa e cascalho a influência da condutividade elétrica (σ) sobre o leque de frequência do GPR é mínima. Assim, podemos assumir $\sigma/\omega\epsilon = 0$ (Davis and Annan, 1989; Reynolds, 1997; apud Neal 2004). E como pouco se sabe sobre a influência da permeabilidade magnética relativa (μ_r) no sinal, é atribuído $\mu_r = 1$, desta forma podemos escrever a equação (6) de maneira simplificada:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

6.5 Sinal e Ruído

Conforme Zhou (2013), o conceito de sinal é bastante subjetivo e varia de acordo com o objetivo do tratamento dos dados. Para este trabalho foi assumido que sinal é todo dado que foi adquirido e possui bom potencial para ser processado e transformado em imagens e

resultados quantitativos. E ao ruído foi atribuído o caráter dos dados que foram adquiridos e não poderão ser processados em informações úteis.

Para uma boa produção de imagens, é desejável que haja muito mais sinal do que ruído. Uma maneira quantitativa de analisar a relação sinal-ruído, é produzindo a razão entre o somatório de suas amplitudes.

6.5.1 Atenuação do Sinal

A medida que a onda se propaga através de um meio, ocorre espalhamento geométrico e transformação de energia. Esta atenuação ocorre de maneira exponencial, e podemos expressá-la matematicamente relacionando a amplitude final (A), a amplitude inicial (A_0) e a distância percorrida (z):

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (8)$$

Onde α é a constante de atenuação. Essa constante independe da frequência do ponto de vista de materiais de fator de atenuante baixo, portanto:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (9)$$

Assim, é possível notar que a condutividade elétrica (σ) é diretamente proporcional a constante de atenuação (α) do meio.

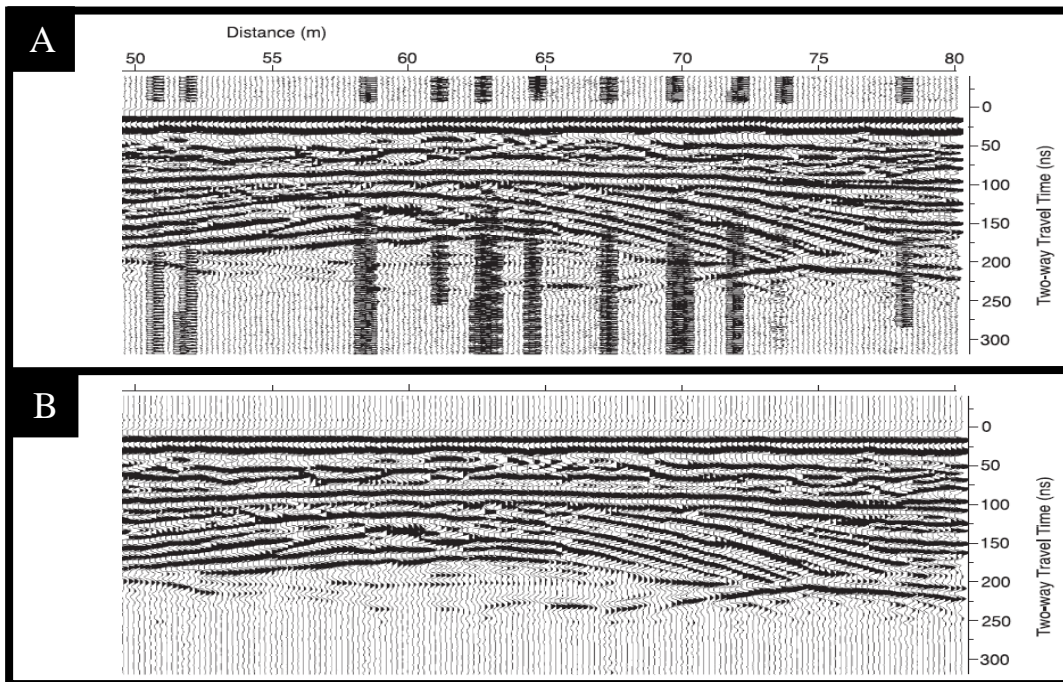
Baseado nas definições das equações (6) e (8), uma série de postulações podem ser inferidas, tais como: a água salgada, que possui uma condutividade elétrica alta, terá um fator de atenuação alto.

6.5.2 Ruído

Como mencionado anteriormente, todo dado não pertinente ao objetivo de processamento é considerado ruído. O dado indesejável armazenado pode ter diversas origens, desde a reflexão do sinal em uma árvore próxima a linha de aquisição, fontes antropogênicas, tais como: antenas emissoras de sinal de TV e rádio, telefones celulares, entre outros aparelhos eletrônicos.

Neal (2004) ilustrou a interferência causada nos dados durante uma aquisição localizada próximo a uma base aérea (figura 12). Foi notado que a interferência era mais intensa durante a decolagem e aterrissagem das aeronaves, o que levou os operadores a inferir que tal interferência estaria sendo causada pela comunicação a rádio entre a base e as aeronaves.

Figura 12 - (a) Perfil não migrado e não filtrado adquirido com a frequência de 100 Mhz mostrando a interferência causada pelo sistema comunicador de rádio das aeronaves em Woodvale, Sefton, nordeste da Inglaterra, (b) remoção do ruído através do tratamento dos dados.



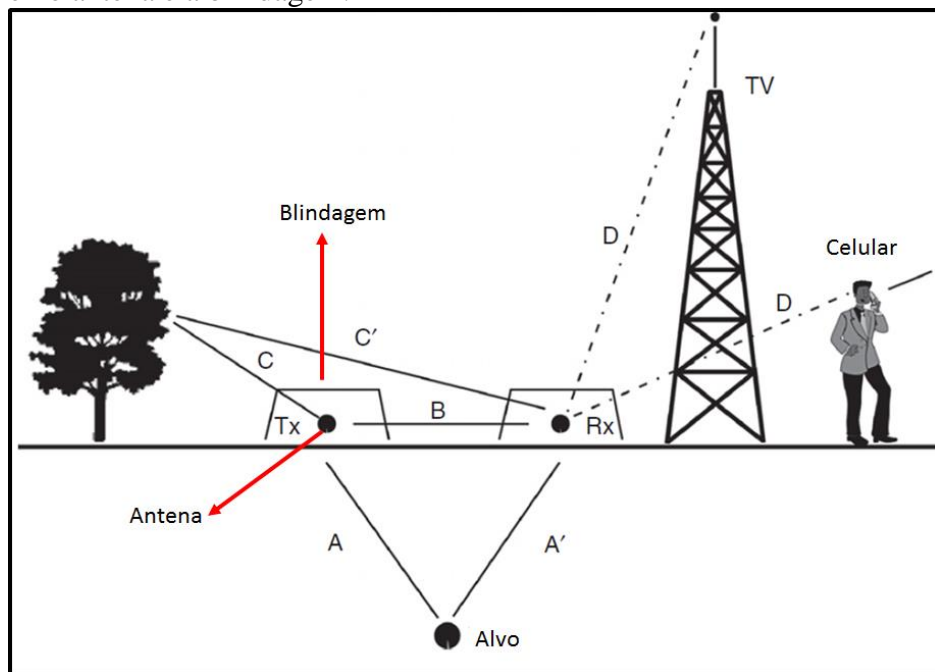
Fonte: Neal (2004).

6.5.3 Blindagem

De acordo com o conceito de Zona de Fresnel, um sinal emitido por uma antena viajará por diferentes trajetórias até o seu receptor. Para atenuar sinais indesejáveis na aquisição de dados de GPR, uma blindagem é posicionada em volta a antena, com abertura apenas para a interface entre o ar e a superfície (figura 13).

De acordo com Jol (2009), a blindagem exerce papel importante na melhora da razão sinal-ruído. Na figura 13, a blindagem é responsável por atenuar o sinal refletido pela árvore (C-C'), a onda transmitida diretamente de uma antena para outra (B) e sinais de TV e celular (D), concentrando o sinal recebido pela antena na trajetória (A-A'), que neste caso, seria o sinal de interesse.

Figura 13 - Diferentes sinais que podem ser recebidos pelo GPR durante aquisição, destacado em vermelho antenna e a blindagem.



Fonte: Jol (2009).

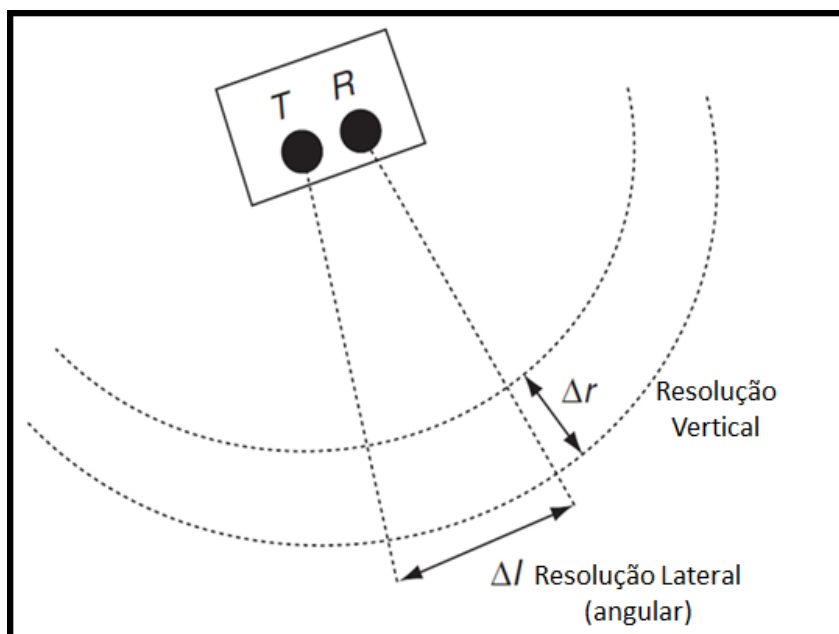
No entanto, existem desvantagem no uso da blindagem. A própria blindagem da antena possui uma resposta eletromagnética, e o sinal transmitido pela antena é refletido de maneira interna pela própria blindagem, que por sua vez pode causar reverberação, gerando *ringing* no conjunto de dados (Jol, 2009).

6.6 Resolução e Fidelidade

Resolução define o grau de precisão sobre a posição e geometria de um alvo (tamanho, forma, espessura), apesar de que resolução poder ser quantificada, o seu limite qualitativo é determinado por observações (Neal, 2004).

A resolução do GPR pode ser subdividia em dois componentes principais: resolução vertical (profundidade) e resolução horizontal (lateral) (figura 14).

Figura 14 - Resolução vertical e lateral para o GPR.



Fonte: Jol (2009).

De acordo com Zhou (2013), o conceito de fidelidade consiste na veracidade do resultado obtido através do processamento dos dados. Em outras palavras, fidelidade estima o quanto o dado processado se assemelha a real posição e forma do alvo. Deste modo, é possível traçar a dependência da fidelidade à resolução vertical e ao posicionamento espacial e temporal do alvo.

Existem diversas maneiras de quantificar resolução para os métodos de processamento de reflexão. No entanto, a quantificação de fidelidade nem sempre é tão direta, haja vista que a real forma e posicionamento do alvo nem sempre é conhecida. Zhou (2013) sugeriu algumas técnicas que podem ser aplicadas para checar a fidelidade do resultado gerado:

- Comparar o resultado processado com a geologia já conhecida, com intuito de conferir se o modelo final faz sentido geologicamente.
- Comparar resultados gerados de maneiras diferentes e principalmente produzidos com diferentes bases de dados.
- Conduzir testes de amostragem por meio da divisão da base de dados em setores, aplicando o mesmo fluxo de processamento para os diferentes setores, e por fim, checando a consistência dos resultados gerados individualmente.

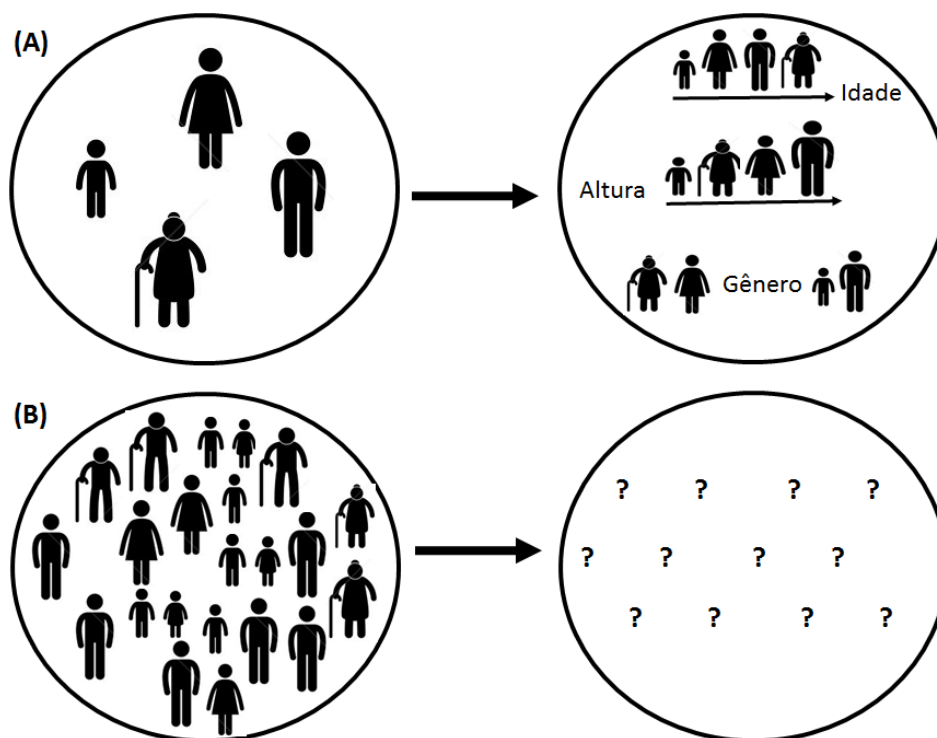
- Quantificar o impacto de erros associados através do processamento de dados sintéticos.
- Integração de métodos (quando plausível).
- Uso de dados físicos (adquiridos diretamente).

7. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

O processamento de dados geofísicos faz o uso de computadores para análise de dados da Terra (Claerbout, 1985). Estes são adquiridos de forma indireta, quando a amostragem direta se torna impraticável por motivos tecnológicos, financeiros ou demanda de tempo.

Devido às limitações dos meios de aquisição e a grande quantidade de dados que são adquiridos, é necessário a aplicação de correções e análises, de modo que o produto final seja compreensível, confiável e possibilite a extração de informações de interesse. A figura 15 abaixo ajuda a ilustrar esse pensamento:

Figura 15 - Diferentes maneiras de leitura de dados, em (A) existem poucos dados e facilmente eles são tratados. Em (B), devido à grande quantidade de dados, a tarefa torna-se mais difícil.



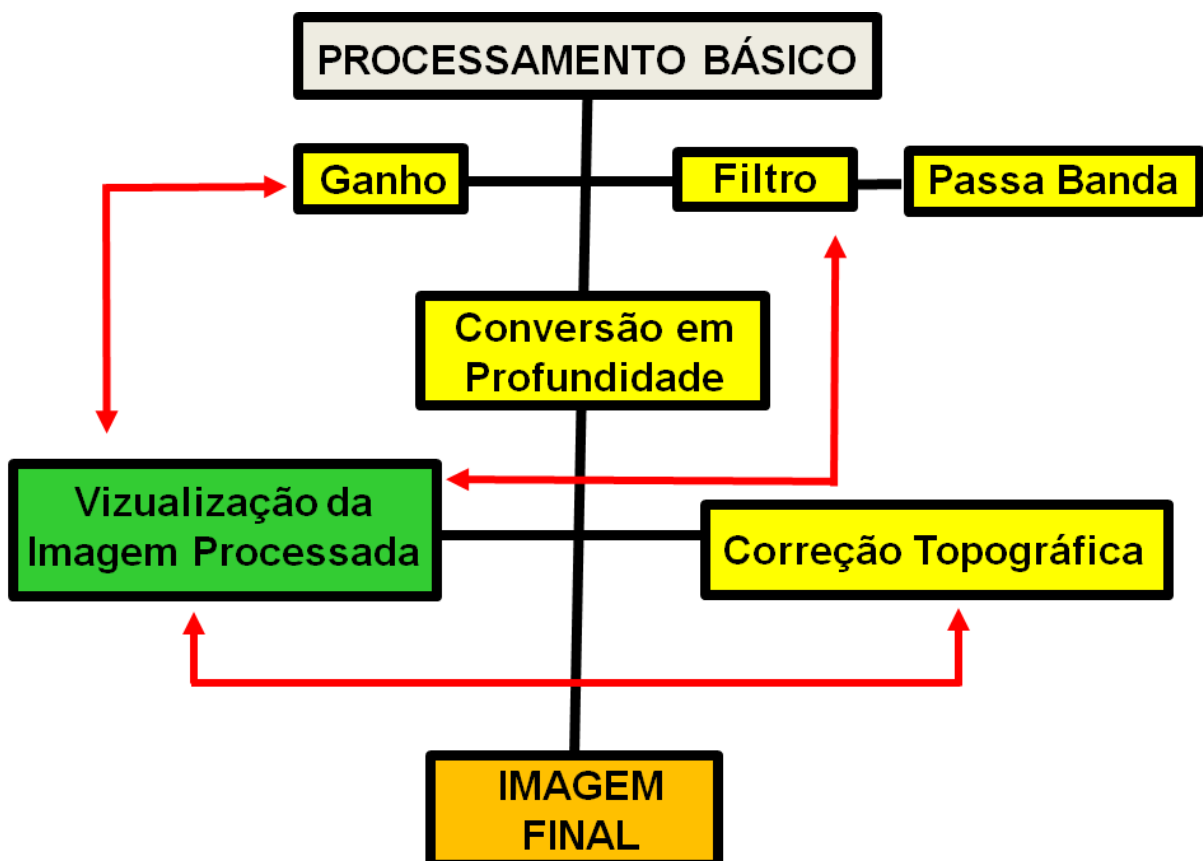
Na figura 15 (A), é possível reconhecer facilmente as distinções entre os indivíduos e separá-los por grupos (idade, altura, gênero, outros), tornando a extração de informações rápida

e fácil. No entanto em (B), devido à grande quantidade de indivíduos, a distinção entre eles já não é tão óbvia e rápida. Neste caso um tratamento estatístico e analítico teria boa aplicabilidade.

Os dados geofísicos se enquadram melhor no exemplo (B) do que no (A), pois os dados são coletados em grandes quantidades e carecem de correções, análises e tratamento estatístico. Em Claerbout (1985), foi relatado que uma aquisição sísmica marinha chega a coletar um trilhão (10^{12}) bits de informações em um mês, e levando em conta o gigantesco avanço tecnológico entre 1985 e os dias atuais, é possível inferir que esse número tenha crescido significativamente.

Para este trabalho, os dados em questão são de GPR, o fluxograma abaixo (figura 16) ilustra as técnicas que foram aplicadas e outras que ainda serão aplicadas para o processamento destes dados.

Figura 16 – Fluxograma preliminar utilizado para processar os dados de GPR.



7.1 Controle de Qualidade

O controle de qualidade é essencial para assegurar que os dados processados possuem bom potencial para extração de informações, bem como para inibir a propagação de erros ou ruídos produzidos pelas etapas de aquisição e/ou processamento.

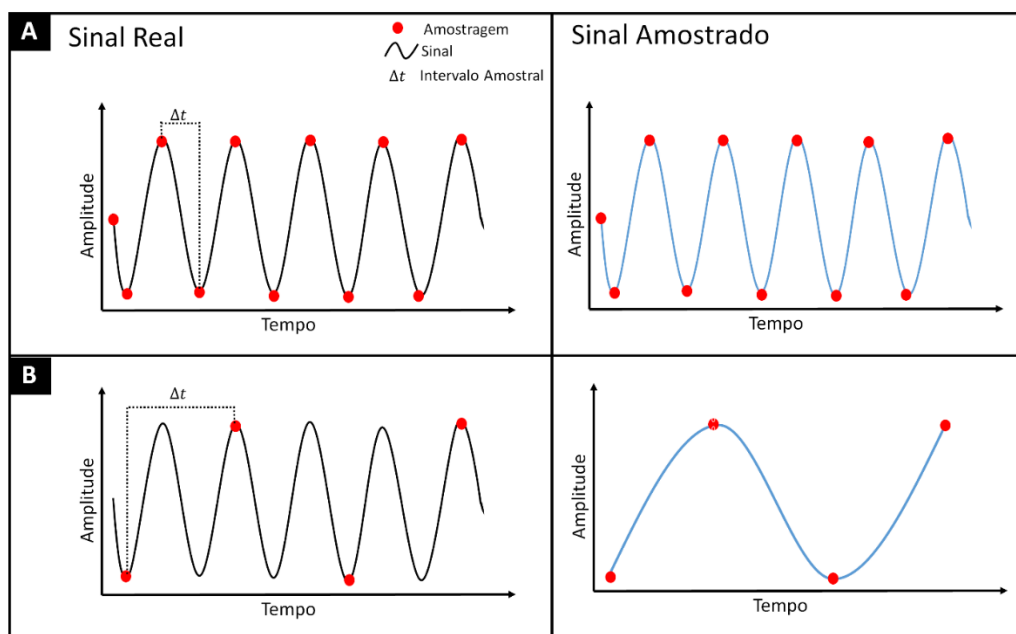
Devido à necessidade do produto final para algumas etapas de controle de qualidade, esta etapa será explorada novamente no tópico de resultados.

7.1.1 Taxa de Amostragem

Taxa de amostragem é o processo contínuo de adquirir amostras em função do tempo (Zhou, 2013). Caso a taxa de amostragem seja insuficiente, o resultado amostrado pode apresentar distorção em relação ao sinal verdadeiro. De acordo com Zhou (2013), a distorção no sinal real causada por subamostragem é chamada de falseamento. Aparição de artefatos nos dados devido ao falseamento prejudica a interpretação do sinal.

A figura 17 ilustra um sinal hipotético, que é amostrado de duas maneiras diferentes, em (A) o sinal é amostrado de forma eficiente, mantendo um intervalo amostral suficiente para gerar um resultado representativo. Entretanto, no caso (B) o intervalo amostral é insuficiente, e como pode ser visto no quadro ao lado, o sinal amostrado difere do sinal real.

Figura 17 – Exemplo de diferentes amostragens de sinais. Em (A) a amostragem é suficiente para gerar um sinal análogo ao real, já em (B) o intervalo de amostragem é insuficiente, e gera um sinal que diverge do sinal real.



Para evitar subamostragem, foi proposto por Nyquist que o intervalo amostral (Δt) seja menor ou igual ao inverso de duas vezes o valor da frequência (f):

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad (10)$$

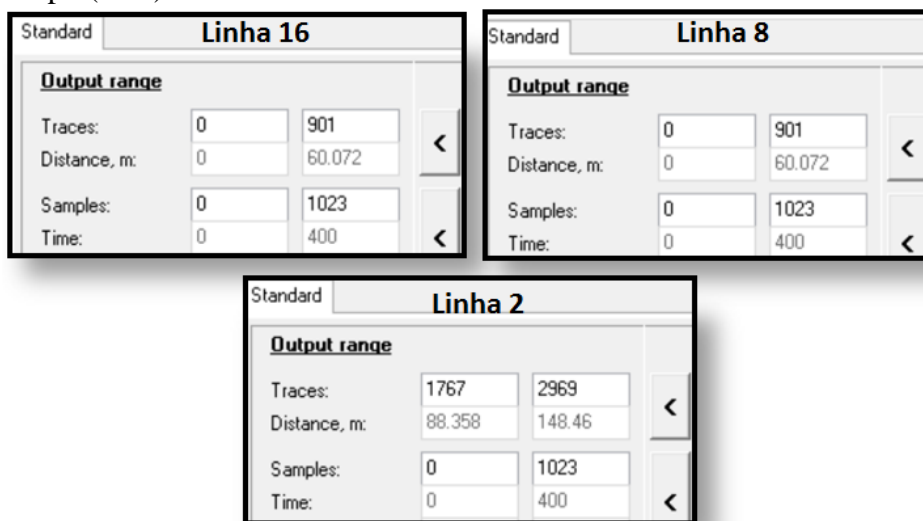
De acordo com Jol (2009), para satisfazer o critério de amostragem de Nyquist para sinais transientes de GPR com a largura da banda concentrada na frequência central, podemos usar:

$$\Delta t \leq \frac{1}{3f} \quad (11)$$

Para fins de controle de qualidade, o critério de amostragem de Nyquist foi aplicado para verificar se houve subamostragem durante a aquisição dos dados.

De acordo com as informações do cabeçalho, as linhas de GPR deste trabalho apresentam 1023 amostras (*samples*) e 400 ns de janela (*time*). Está exemplificado na figura 18 os cabeçalhos das linhas 16, 8 e 2.

Figura 18 - Cabeçalhos das linhas 16, 8 e 2, expondo a quantidade de amostras (*samples*) e janela de tempo (*time*).



Como os mesmos parâmetros foram usados para todas as linhas contidas no banco de dados, é possível efetuar uma única operação para verificar se a amostragem foi suficiente. Podemos definir Δt pela razão entre o Tempo de Janela e o Número de Amostras:

$$\Delta t = \frac{\text{Tempo de Janela}}{\text{Número de Amostras}} \quad (12)$$

Substituindo as informações fornecidas pelo cabeçalho:

$$\Delta t = \frac{400 \times 10^{-9}}{1023}$$

Portanto:

$$\Delta t = 0,391 \times 10^{-9} \text{s} \quad \text{ou} \quad \Delta t = 3,91 \times 10^{-10} \text{s}$$

Substituindo Δt para satisfazer o critério de Nyquist:

$$3,91 \times 10^{-10} \leq \frac{1}{3f}$$

Sendo f , a frequência utilizada para aquisição de 200 MHz:

$$3,91 \times 10^{-10} \leq \frac{1}{3 \times 200 \times 10^6}$$

$$3,91 \times 10^{-10} \leq 0,0017 \times 10^{-6}$$

$$3,91 \times 10^{-10} \text{s} \leq 1,7 \times 10^{-9} \text{s}$$

Como $3,91 \times 10^{-10} \text{s} \leq 1,7 \times 10^{-9} \text{s}$, é possível afirmar que o critério de amostragem de Nyquist foi satisfeito, e a amostragem foi suficiente.

7.1.2 Verificando a Resolução Vertical

A resolução vertical (R_v) pode ser expressa como aproximadamente um quarto do comprimento de onda (λ) do sinal emitido pelo radar:

$$R_v = \frac{\lambda}{4} \quad (13)$$

E o comprimento de onda (λ) pode ser expresso em função da frequência (f) da antena e da velocidade (v) do sinal do GPR (Reynolds, 1997; apud. Jol 2009).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (14)$$

Usando a tabela sugerida por Jol (2009) (tabela 2), é possível inferir um valor aproximado para a resolução vertical dos dados deste trabalho.

Tabela 2: Resolução teórica para areia saturada, úmida e seca para diferentes frequências centrais de antena.

Frequência Central da Antena (MHz)	Resolução Teórica para Areia Saturada (0,06 m ns ⁻¹)	Resolução Teórica para Areia Úmida (0,1 m ns ⁻¹)	Resolução Teórica para Areia Seca (0,15 m ns ⁻¹)
50	0,3 m	0,5 m	0,75 m
100	0,15 m	0,25 m	0,375 m
200	0,075 m	0,125 m	0,1875 m
499	0,0375 m	0,0625	0,09475 m

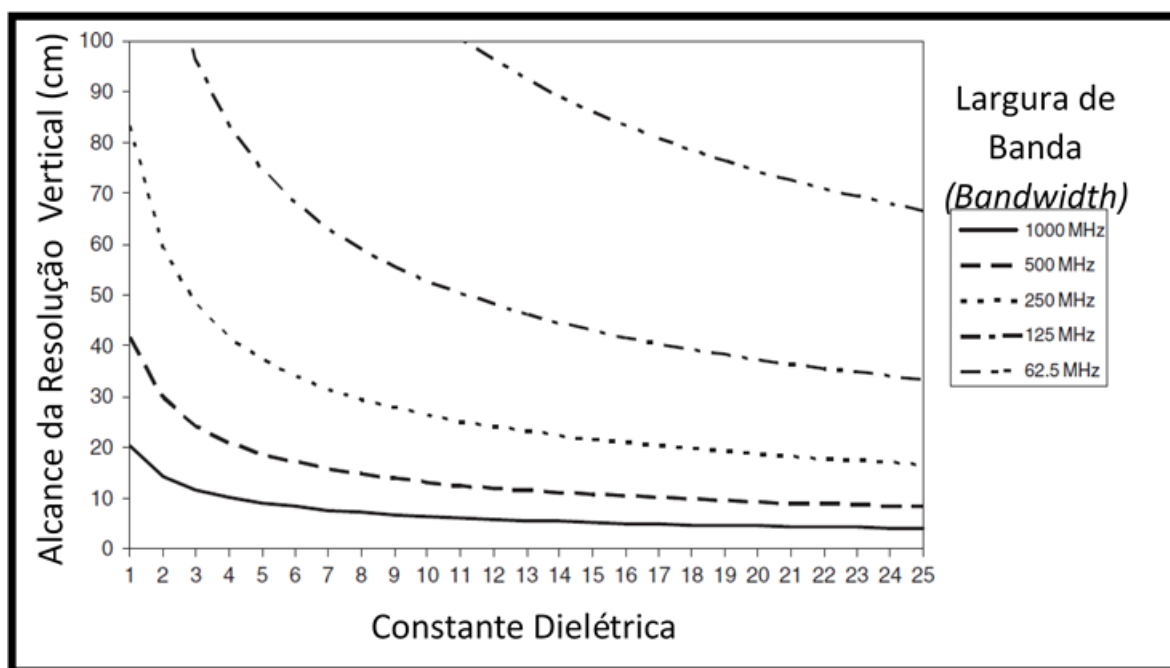
Fonte: Jol (2009).

Como a antena usada para a aquisição dos dados deste trabalho foi a de 200 Mhz, e o ambiente em questão pode ser considerado entre areia úmida e areia seca, é esperado observar uma resolução aproximada entre 0,125 m e 0,1875 m.

Esta resolução satisfaz os objetivos deste trabalho em termos de imagem, haja vista que as estruturas e morfologias que são alvo deste trabalho podem ser resolvidas por estes limites de resolução.

Outro ponto importante a ser considerado, é o alcance da resolução em relação a profundidade. Como mencionado anteriormente, um determinado sinal que viaja através de camadas terá a amplitude do seu sinal atenuada exponencialmente em função da profundidade do fator de atenuação do meio, que por sua vez é proporcional a constante dielétrica do meio. A figura 19, proposta por Jol (2009), ilustra a relação entre o alcance da resolução vertical, constante dielétrica e a largura da banda.

Figura 19 – Alcance da Resolução Vertical versus Constante Dielétrica para valores comuns de Frequência usados para o GPR.



Fonte: Jol (2009).

No eixo vertical é expresso o alcance da resolução vertical em profundidade. É possível notar que quanto menor é a frequência, maior a profundidade alcançada.

Já no eixo horizontal, a variável constante dielétrica é apresentada, quanto maior este valor menor a profundidade alcançada pelo sinal. É possível notar também que para constantes dielétricas muito altas os diferentes valores de frequência passam a exercer menor influência na profundidade alcançada.

Davis e Annam (1989) propuseram os seguintes valores para constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ), velocidade (v), e fator de atenuação (α) para matérias geológicas comuns usando antena de 100 MHz (tabela 3):

O ambiente onde os dados foram adquiridos é constituído basicamente de areia seca e saturada. Deste modo, usando os valores das constantes dielétricas associadas a areia seca (3 –

5) e areia saturada (20 – 30), associados às larguras de banda entre 125 MHz e 250 MHz no gráfico da figura 19, é possível estimar uma boa resolução vertical até a profundidade de 30 metros.

Tabela 3: Valores de constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ), velocidade (v), e fator de atenuação (α) para matérias geológicas comuns usando antena de 100 MHz, destacados em amarelo e laranja os valores referentes a areia seca e saturada, respectivamente.

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água salgada	80	3×10^4	0,01	10^3
Areia seca	3 – 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1,0	0,06	0,03 – 0,3
Calcário	4 – 8	0,5 – 2	0,12	0,4 – 1
Xisto	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
Silte	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
Argila	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granito	4 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 - 1
Sal seco	5 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 - 1
Gelo	3 – 4	0,01	0,16	0,01

Fonte: adaptado de Davis e Annam (1989).

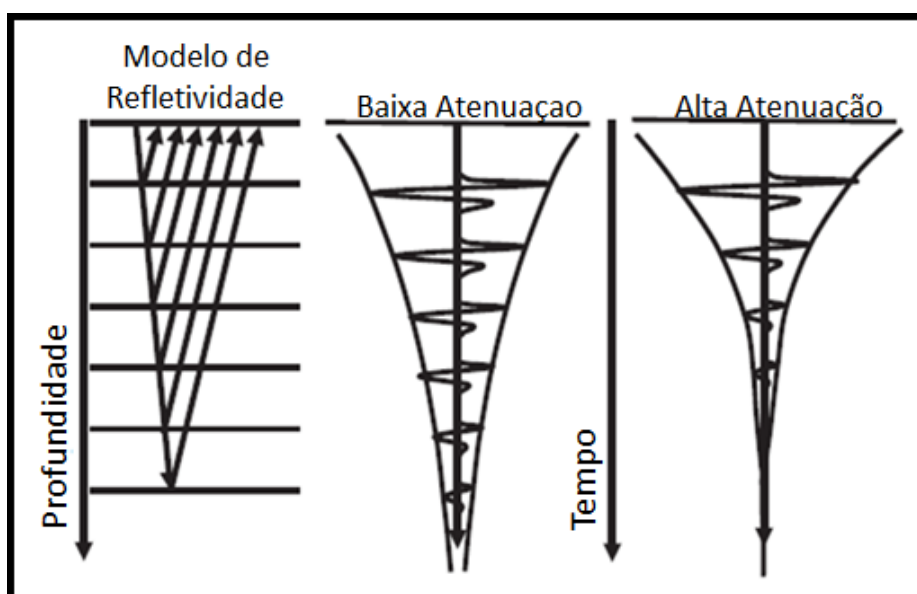
Apesar destes valores serem suficientes para estimar o alcance da resolução vertical, é importante ressaltar a variabilidade destes valores devido a heterogeneidade dos ambientes arenosos.

7.2 Controle de Ganho

A amplitude do sinal é uma importante característica, tendo em vista que esta descreve a distribuição de energia das ondas em função de sua propagação, tempo decorrido e frequência. Os processos responsáveis por alterar sinteticamente a amplitude do sinal são chamados de ganho (Zhou, 2013).

Como explicado previamente, a subsuperfície é um atenuador natural de sinal, e o valor da amplitude do sinal irá decair exponencialmente com o aumento da profundidade. De acordo com essa tendência, é mais fácil visualizar o sinal em baixa profundidade do que em alta profundidade. Outro fator importante a ser considerado em termos de atenuação do sinal é sua forte relação com as propriedades físicas da matéria. Um ambiente de baixa atenuação pode permitir um alcance de dezenas de metros, enquanto um ambiente com alta atenuação pode impor condições onde a penetração do sinal não alcançará mais do que um metro (figura 20) (Jol, 2009).

Figura 20 - Comportamento da amplitude em diferentes meios



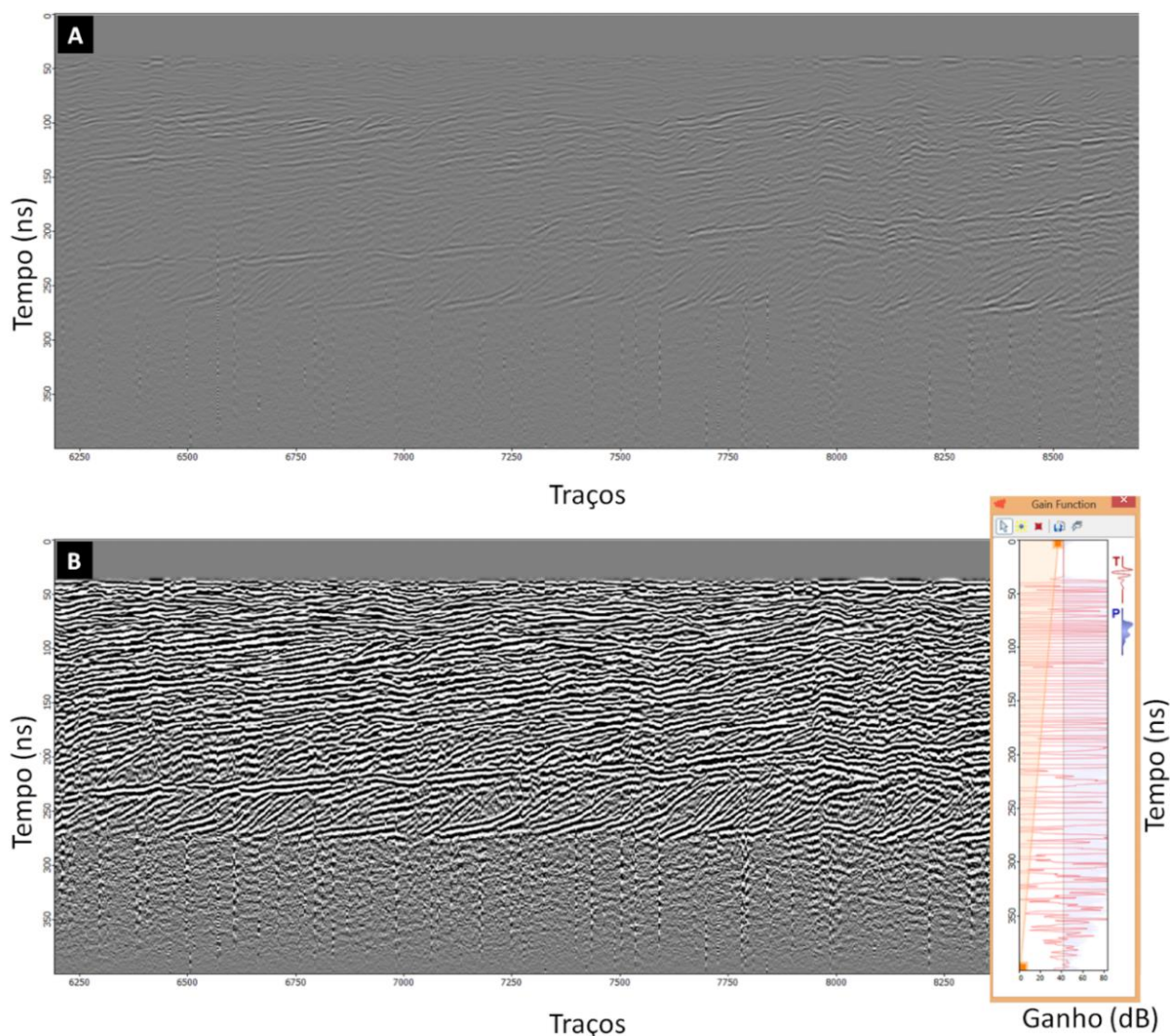
Fonte: Jol (2009).

Para compensar essa perda de sinal, uma função ganho pode ser aplicada, esta função irá alterar a amplitude do sinal para uma melhor visualização do operador. Em geral realçando as baixas amplitudes que não permitirão ao usuário visualizar os refletores mais profundos.

A função ganho deve ser aplicada com muita cautela e critério, uma vez que o modelo gerado pela função irá ressaltar as amplitudes dos dados incluindo ruídos. É importante ressaltar que a aplicação de ganho é uma operação não linear, portanto filtrar dados antes ou depois do ganho criará resultados diferentes (Jol, 2009).

No caso deste trabalho foi aplicado ganho (figura 21) apenas para fins de visualização e posteriormente, este ganho foi removido.

Figura 21 - Parte do radargrama referente a linha 16: em (A) dado cru e em (B) dado com ganho. A direita do radargrama (B), exibição do ganho em função do tempo.



Em (A) temos o dado bruto, onde apenas as reflexões mais fortes podem ser identificadas, já em (B) vários refletores são realçados. Ao lado do radargrama (B) é exibido o ganho que foi aplicado em função do tempo.

Foi decidido restringir a aplicação de ganho na parte mais funda da secção. Pois pouco pôde ser entendido em termos de geometrias e estruturas nesta parte. De acordo com os dados de sondagem, a parte mais funda do radargrama apresenta depósitos de lama, o que justifica a baixa penetração do sinal de radar neste local aliado ao fator profundidade.

Como mencionado previamente, a aplicação do ganho exige cautela. Comparando (A) e (B), é possível notar que a função ganho também realçou o ruído que se apresenta verticalmente (cortando os refletores ortogonalmente) ao longo da secção.

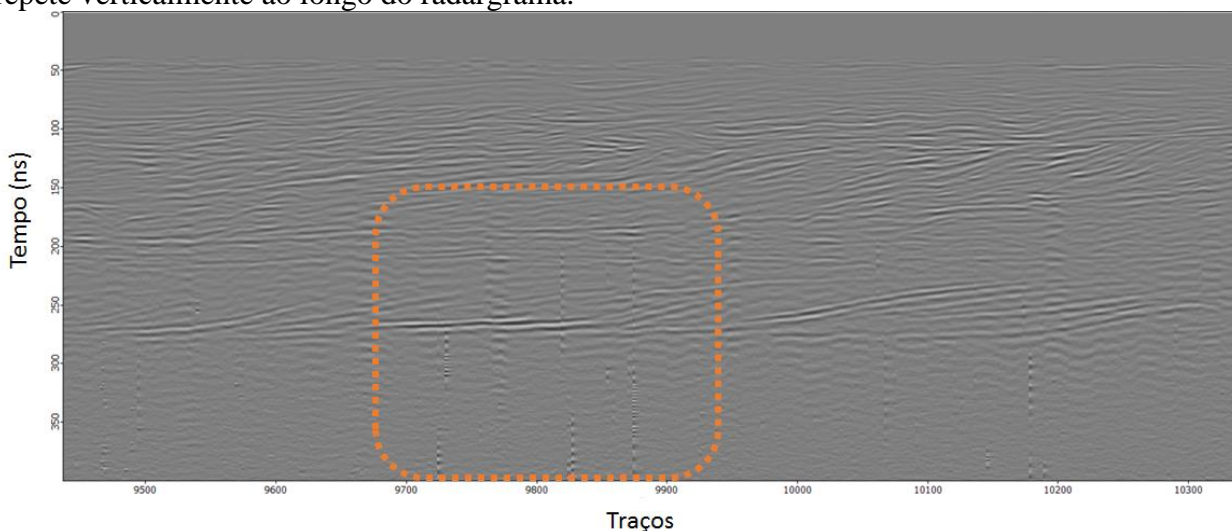
7.3 Filtros

Do ponto de vista de processamento de sinais, a função de um filtro é remover partes indesejadas do sinal, como por exemplo ruídos aleatórios, ou extrair parte importante do sinal que corresponde a um determinado conjunto de frequências (Zhou, 2013). De uma maneira simples, em uma contagem de 1 a 10, um filtro poderia eliminar os números ímpares, primos, divisíveis por 2, ou maiores que 5, de acordo com a necessidade. Em termos de processamento geofísico, filtros são responsáveis pela eliminação de dados indesejáveis que dificultam a visualização ou entendimento de um determinado objetivo.

7.3.1 Filtro de Frequências – Passa-Banda

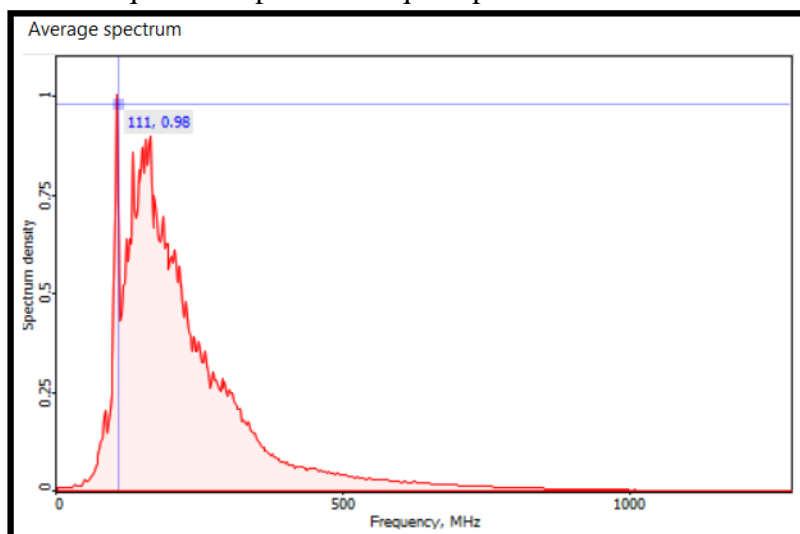
O filtro passa-banda é uma opção conveniente para evitar um determinado leque de baixas e altas frequências, e permitir a passagem apenas um conjunto desejável de frequências. Analisando o radargrama referente a linha 16 (figura 22), é possível identificar visualmente a presença de ruído que se repete verticalmente ao longo do radargrama (destacado em laranja).

Figura 22 - Parte do radargrama referente a linha 16, destacado em laranja o ruído que se repete verticalmente ao longo do radargrama.



Uma abordagem eficiente para descobrir qual frequência está gerando o ruído e eliminá-la é através da análise do espectro de densidade de frequência (figura 23).

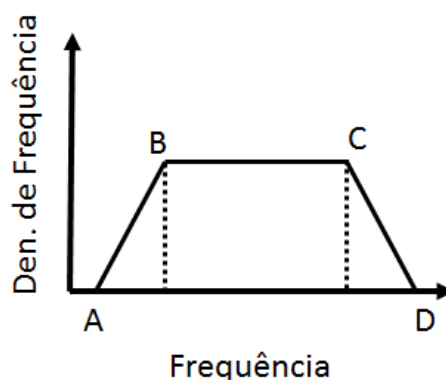
Figura 23 - A linha vermelha demarca a distribuição da densidade de frequência, enquanto o ponto azul demarca a frequência específica naquele ponto.



É esperado uma distribuição gaussiana das frequências no espectro, desta forma, as frequências encontradas nas extremidades são fortes candidatas para a razão do ruído nos dados. E considerando o espectro da figura 23 aproximadamente uma distribuição gaussiana. O pico evidenciado pelo ponto azul (≈ 111 MHz) na figura é a provável razão do ruído apresentado na imagem 23.

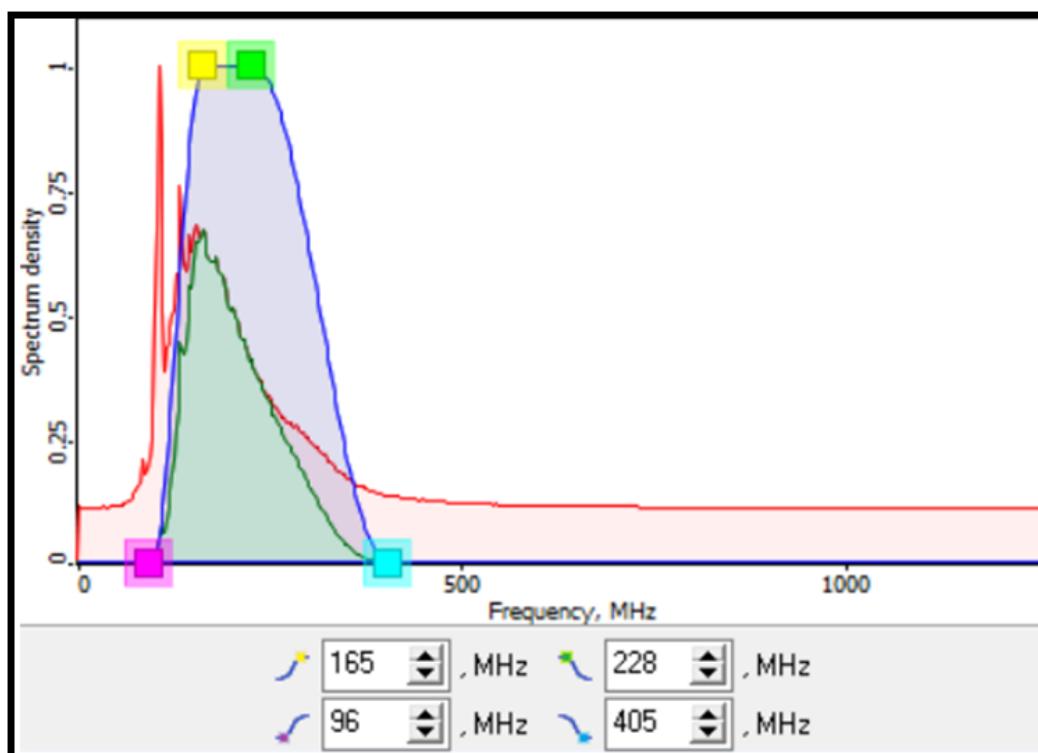
Um trapézio pode ser usado para ilustrar o projeto de um filtro passa banda (figura 24), antes de (A) nenhuma frequência é admitida, de (A) até (B) assim como de (C) até (D) as frequências são admitidas parcialmente, entre (B) e (C) as frequências são admitidas totalmente, e por fim nenhuma frequência é admitida além do ponto D.

Figura 24 - Trapézio ilustrando o projeto de um filtro passa banda com os parâmetros (A), (B), (C) e (D).



No caso deste trabalho, os valores de A, B, C e D foram adquiridos com base na análise do espectro de densidade de frequências (figura 25) e de inúmeros testes anteriores.

Figura 25 - Espectro de densidade de frequências em vermelho, sinal permitido pelo filtro em azul, abaixo: valores dos limites do filtro em MHz.

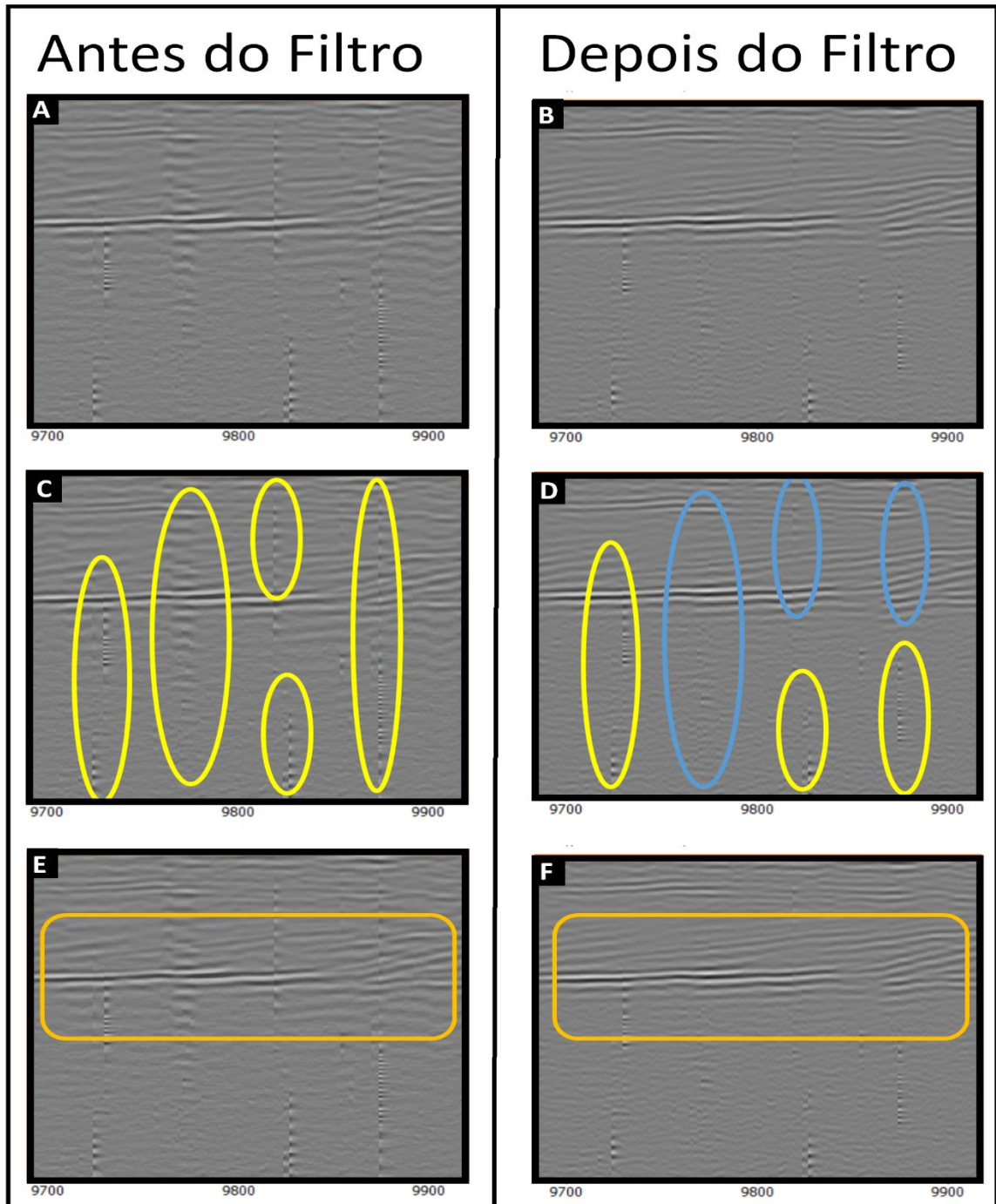


A linha vermelha demarca o espectro de densidade de frequência dos dados, enquanto a linha azul demarca as frequências que serão permitidas para a próxima imagem, portanto as frequências fora do limite da linha azul serão desconsideradas. Abaixo da figura encontram-se os valores referentes aos limites do filtro passa-banda. De forma análoga ao exemplo do trapézio mencionado anteriormente: A = 96 MHz, B = 165 MHz, C = 228 MHz e D = 405 MHz.

Observando a figura 26, em (A) e (B), podemos comparar os efeitos do filtro no radargrama, em (C) e (D) destaca-se em amarelo os ruídos identificados e que não foram removidos pelo filtro, já em azul, destaca-se o ruído que foi removido de maneira eficiente pelo filtro passa-banda.

É crucial durante a filtragem que os dados de interesse sejam conservados, em (E) e (F) destaca-se um possível refletor de interesse, que aparentemente não foi afetado pela aplicação do filtro.

Figura 26 - A) recorte do radargrama antes do filtro, B) recorte do radargrama depois do filtro, C) recorte do radargrama antes do filtro destacando em amarelo o ruído, D) recorte do radargrama depois do filtro, destacando em amarelo os ruídos que permaneceram e em azul os que foram removidos, F) recorte do radargrama antes do filtro destacando possível refletor de interesse e H) recorte do radargrama depois do filtro, destacando possível refletor de interesse.



7.4 Conversão em Profundidade

De forma sucinta, para converter o eixo vertical dos radargramas para profundidade (S) são necessários os valores de tempo duplo de viagem (t) e a velocidade com que o sinal se propagou neste meio (v):

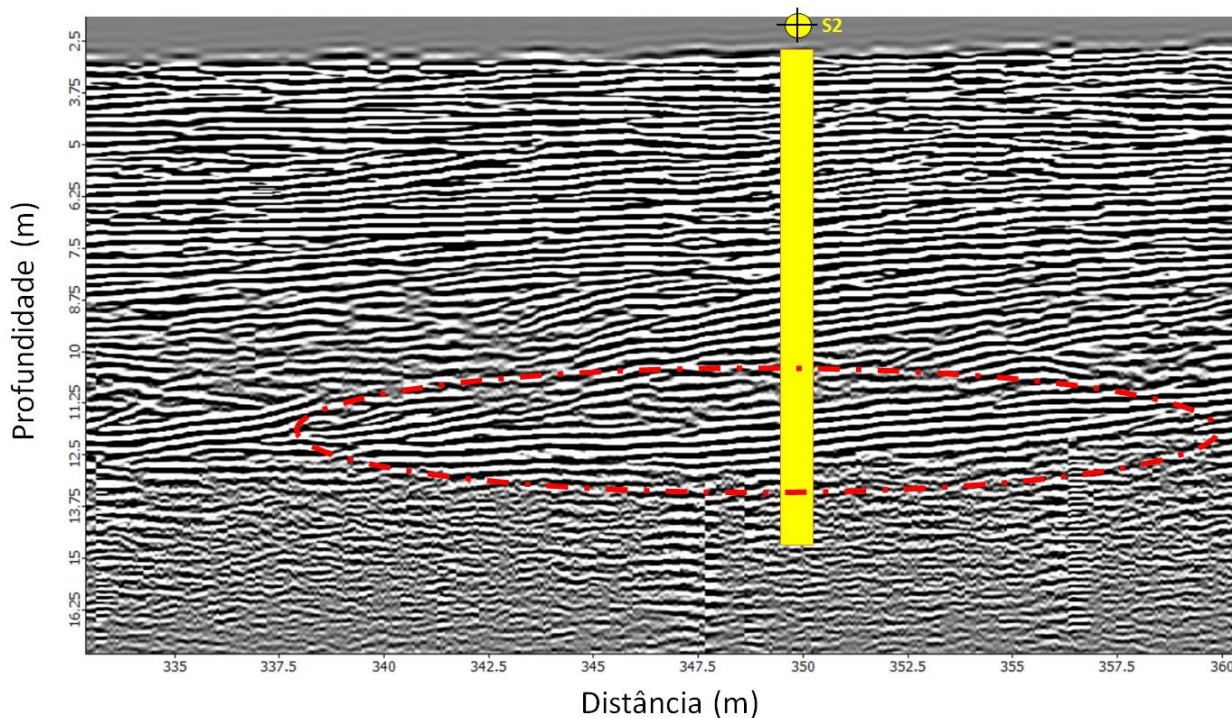
$$S = v \cdot t \quad (15)$$

Como mencionado na equação (7), o valor de v depende da permissividade dielétrica do meio (ϵ) e o valor de t foi armazenado pelo equipamento levando em conta o tempo em que o sinal foi emitido, refletido e armazenado. Neste caso, para determinar a profundidade em questão é necessário saber o valor ou valores de ϵ do meio. É possível observar na tabela 3 que os valores de permissividade dielétrica propostos por Davis e Annam (1989) possuem alta variabilidade (3 a 5 para areia seca e 20 a 30 para areia saturada), isto ocorre devido a heterogeneidade dos meios arenosos.

Portanto, almejando adquirir um valor que melhor represente a permissividade dielétrica do meio em que os dados deste trabalho foram adquiridos, foram usados dados de sondagem S2 do trabalho de Caron (2014). A mesma foi posicionada próxima da linha 14 a cerca de 350 m do seu início. Nesta sondagem foi interpretado a presença de depósitos de fundo lagunar a cerca de 8 metros de profundidade.

Analisando o radargrama referente a linha 14 é possível notar a presença de refletores plano-paralelos contínuo (figura 27). Nota-se, que para visualizar a imagem em escala 1x1, o *software* sugere uma permissividade dielétrica (ϵ) de ajuste, no entanto este valor de ϵ pode não posicionar corretamente os refletores em profundidade.

Figura 27 - Relação dos refletores plano-paralelos (destacado em vermelho) da linha 14 com a sondagem S2 (barra amarela).

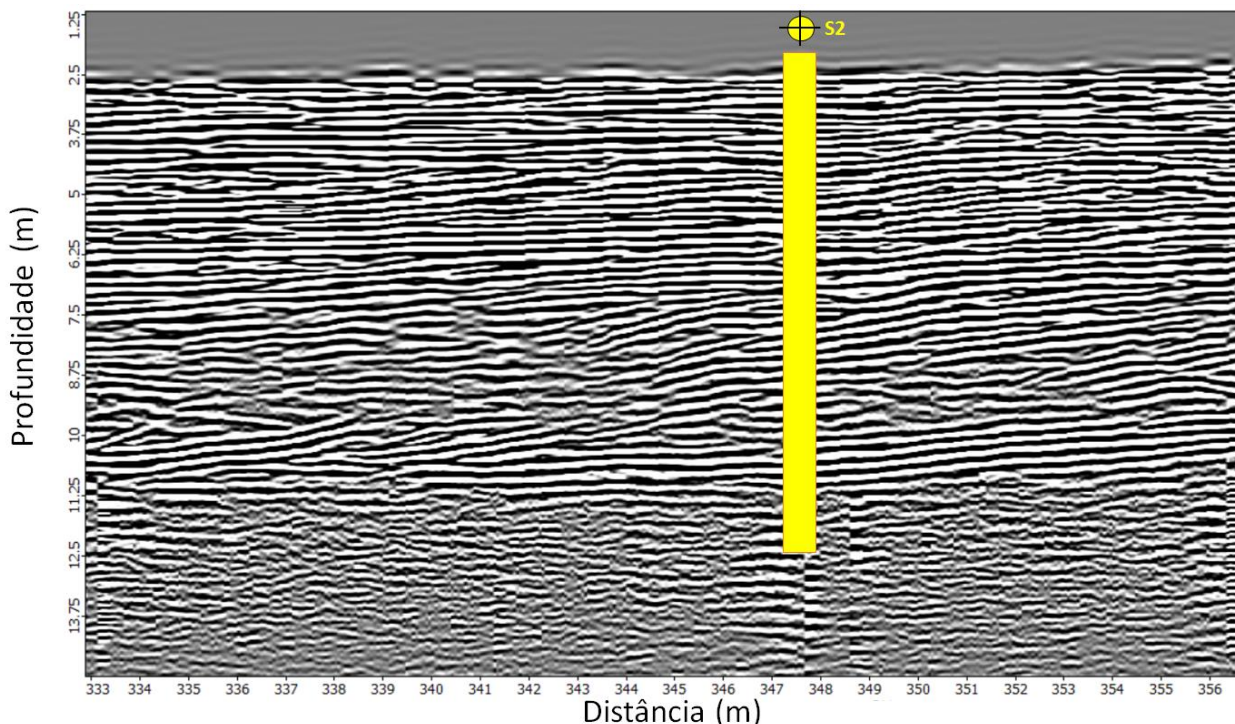


De acordo com Bohacs (2010), referindo-se a ambientes sedimentares lacustres, refletores plano-paralelos contínuos podem ser interpretados como depósitos tabulares de granulometria fina referentes a porção profunda do lago.

Desta maneira é possível inferir a relação entre estes refletores da linha 14 e a interpretação de depósito de fundo lagunar da sondagem S2. Assumindo que ambos devam estar a mesma profundidade da superfície (cerca de 8 metros), é possível testar diferentes valores de permissividade dielétrica com intuito de identificar o valor que melhor ajusta o radargrama em relação a profundidade.

O valor de ϵ que melhor ajustou o radargrama aos dados de sondagem foi o de 16 F/m (Faraday por metro), figura 28. Dada a continuidade deste refletor ao longo da linha, e a presença de refletores análogos em geometria e profundidade nas outras linhas, foi usado o mesmo valor para o ajuste de profundidade dos demais radargramas processados.

Figura 28 - Radargrama 14 após a conversão em profundidade, considerando 16 F/m de permissividade dielétrica. Destacado em amarelo a sondagem S2.



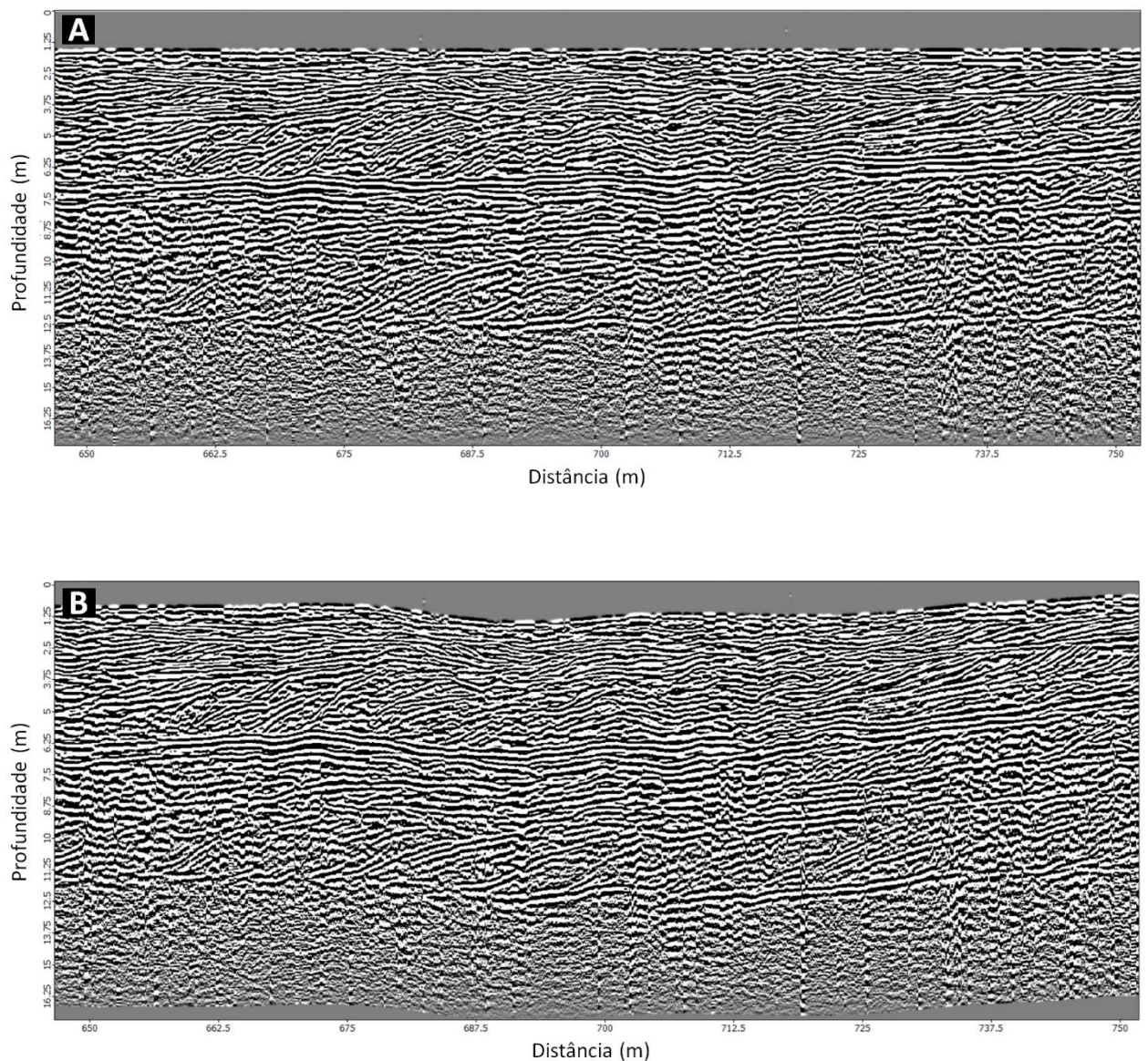
7.5 Correção Topográfica

Durante a aquisição, o radar de penetração no solo não considera a variação topográfica, sendo necessário a aplicação da correção topográfica caso haja variação na topografia. Esta correção é responsável por trazer os refletores para a sua real posição, isso é feito movendo traços para cima ou para baixo de acordo com o tempo duplo de viagem do sinal em relação a um datum (Neal, 2004). É necessário também um levantamento topográfico de resolução análoga a aquisição de dados de GPR.

Os dados deste trabalho foram adquiridos em ambiente costeiro, onde a topografia é irregular. Deste modo, durante a aquisição dos dados de GPR também foram adquiridos dados topográficos com auxílio de um DGPS (Diferencial Global Position System). Estes dados foram usados para a correção topográfica das secções de radar (figura 29).

A figura 29 (A) e (B) são recortes da linha 20, onde pode-se observar o efeito da correção topográfica nos dados. Comparando A e B é possível notar que em B foi incluído a topografia local. Também é possível observar o ajuste vertical do posicionamento de alguns refletores.

Figura 29 – Correção topográfica aplicada a linha 20. (A) recorte da linha antes da correção e (B) recorte da linha após a correção topográfica.

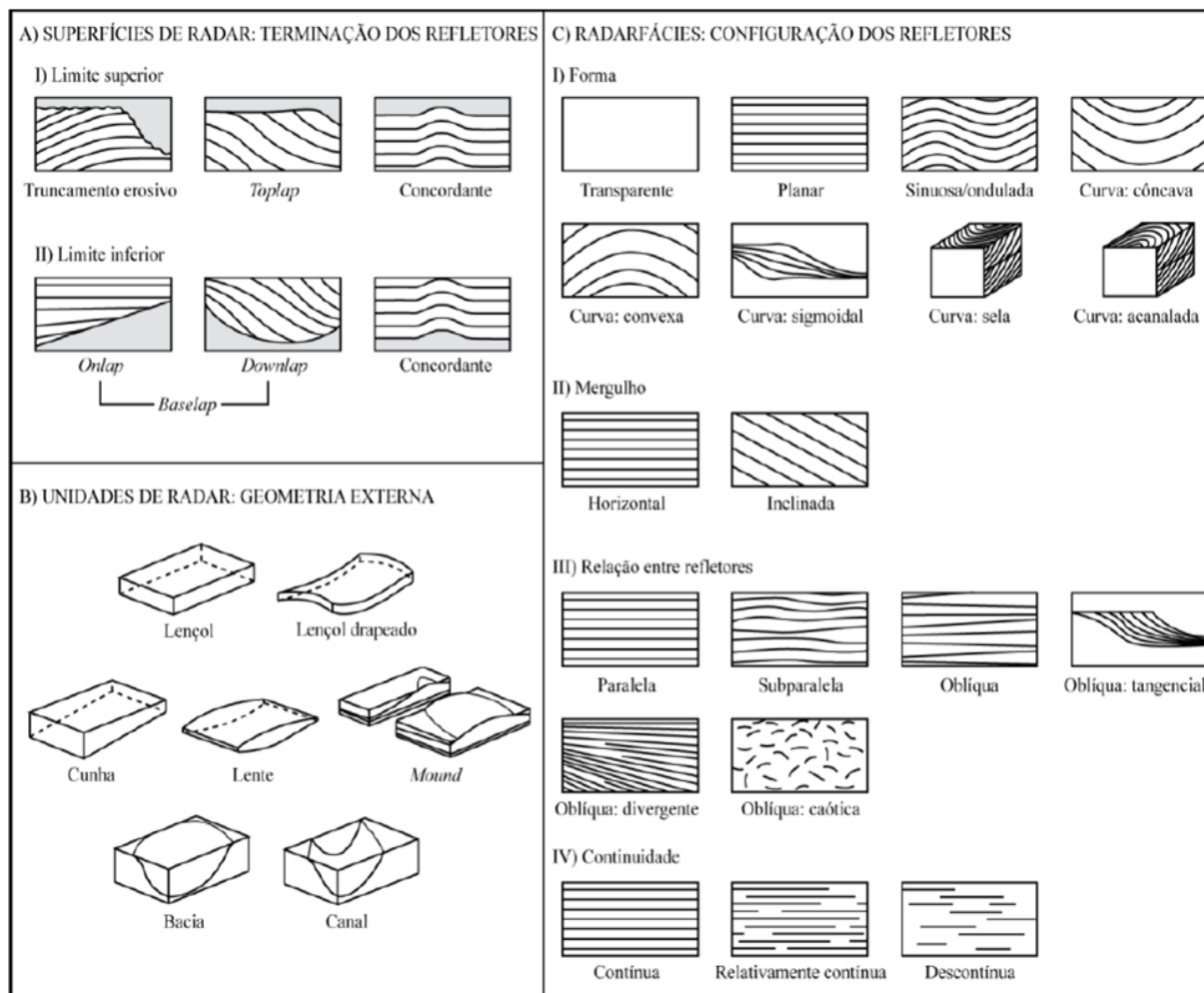


8 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

8.1 Radarfáceis

Segundo Jol e Bristow (2003), radarfáceis podem ser definidas como uma estrutura sedimentar tridimensional mapeável, composta por reflexões de GPR cujos parâmetros diferem das estruturas adjacentes (definição modificada de Mitchum, 1977). O método aplicado para a interpretação dos dados deste trabalho segue a metodologia proposta por Mitchum (1977) para interpretação sísmica (figura 30).

Figura 30 - Padrões básicos para a interpretação das secções de GPR, (A) terminação dos refletores, (B) geometria externa e (C) configuração dos refletores.

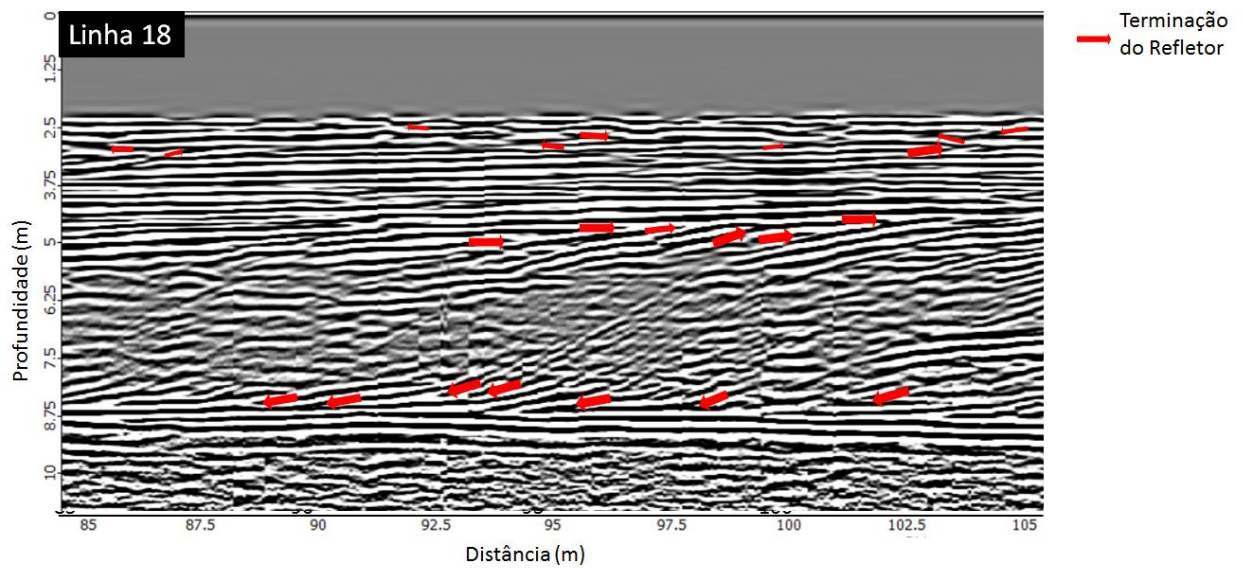


Fonte: Neal (2004)

Apesar da diferença significativa na resolução que compõe radargramas e sismogramas (10s de cm ao em vez de 10s de m) a estratigrafia interpretada através de radargramas é semelhante a estratigrafia interpretadas em sismogramas (sismoestratigrafia) (Jol, 2009).

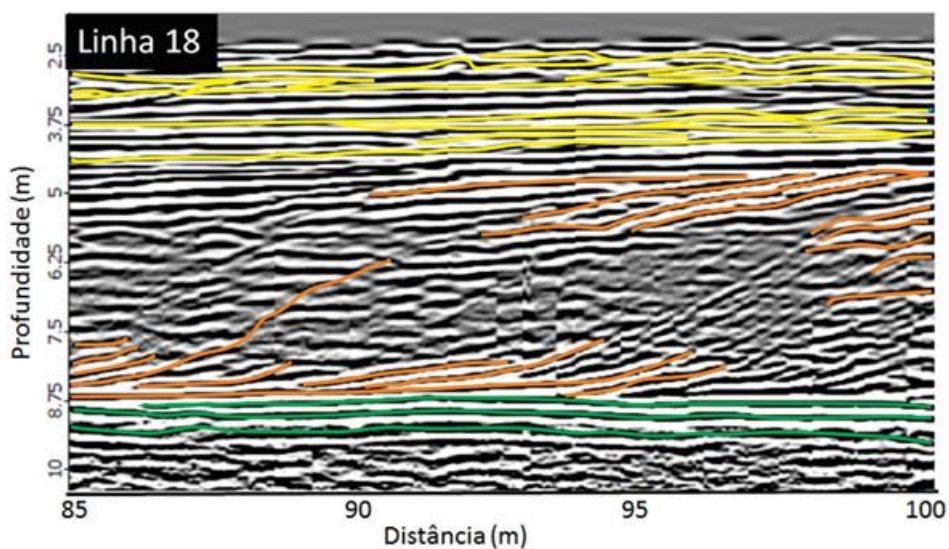
O primeiro passo foi a identificação de terminações (figura 31) no recorte do radargrama 18.

Figura 31 - Identificação das terminações para uma parcela do radargrama.



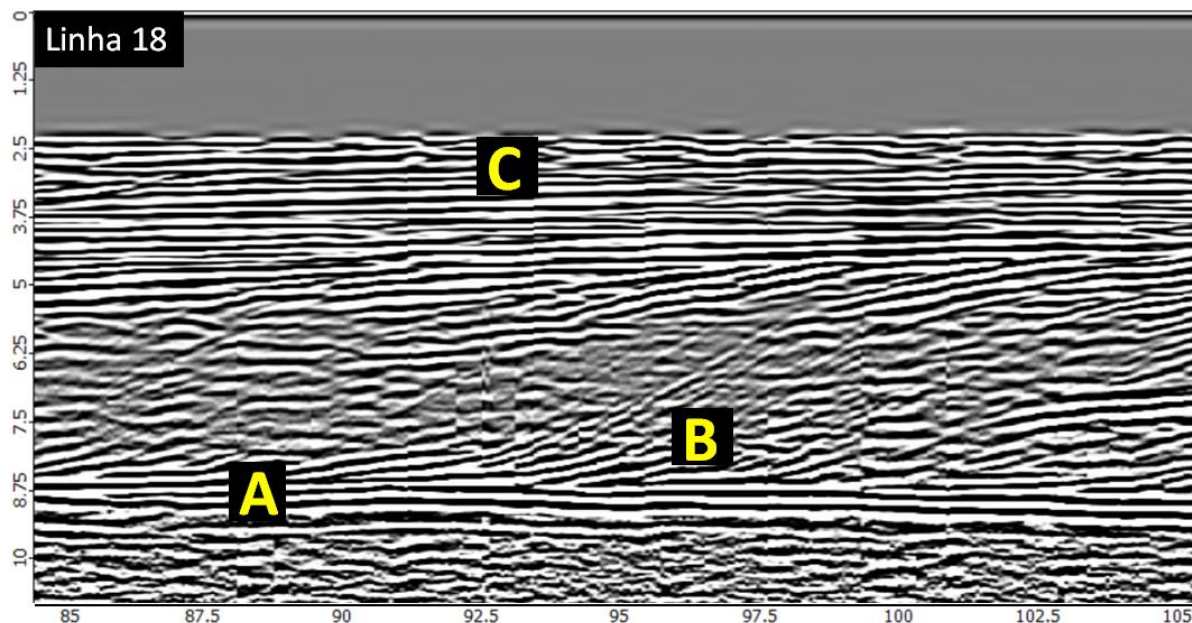
Em Seguida foi rastreado a continuidade dos refletores destacados pelas terminações (figura 32). De acordo com Vail et al. (1977), refletores contínuos implicam em superfícies isócronas e terminações podem ser consideradas quebras no tempo.

Figura 32 - Continuidade dos refletores para o recorte da linha 18.



O terceiro paço consistiu na identificação de padrões deposicionais através da análise das radarfácies e da comparação destas com trabalhos anteriores como o de Caron (2014) e Bohacs (2010) (figura 33).

Figura 33 – Padrões identificados através das radarfácies.



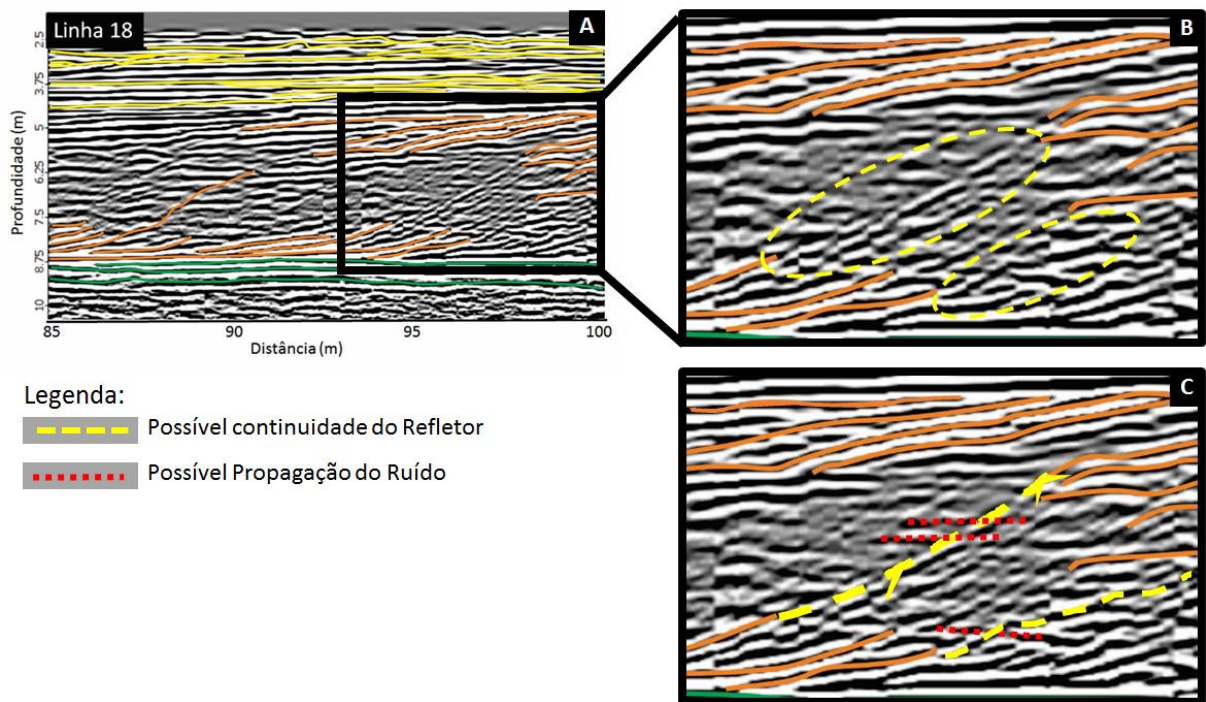
Radarfácies	Cor do Traço	Descrição	Interpretação
C		Refletores ondulado a pouco ondulado, descontínuo, sub-paralelo, por vezes cruzados com inversão de direções.	Éolico
B		Refletores com médio ângulo de mergulho sigmóides-obliquos com terminações em downlap.	Margem Lacustre
A		Refletores horizontais contínuo plano-paralelo, uniformemente espaçados.	Fundo lacustre

8.2 Do Ruído Não Removido

Apesar do filtro passa-banda ter demonstrado eficiência em remover grande parte do ruído nos dados, é possível identificar uma parcela que não foi removida e que pode ser confundida como refletores de interesse.

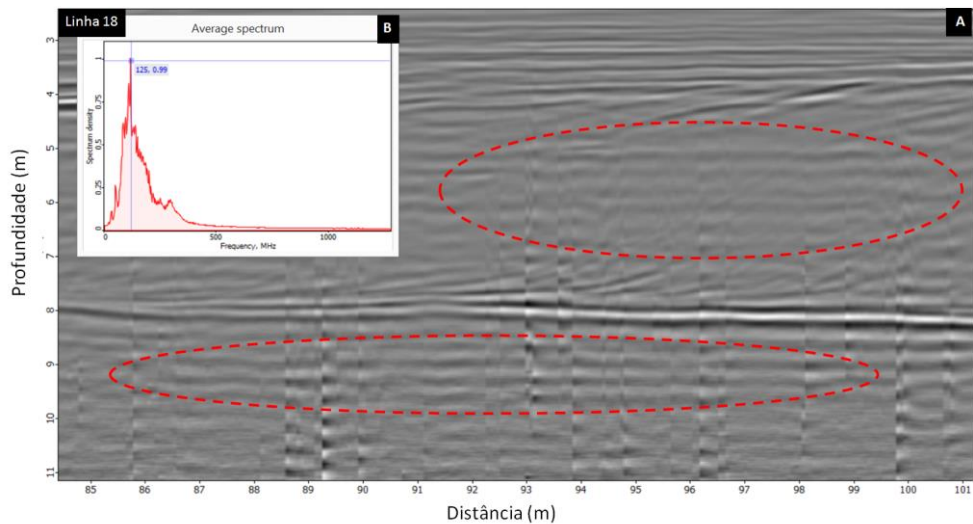
Observando a figura 34 abaixo, em (A) e (B) é possível estabelecer uma provável continuidade para os refletores circulado pelo tracejado amarelo. No entanto, alguns refletores cruzam essa possível continuidade (destacado em vermelho em (C)). Como esse tipo de cruzamento não faz sentido geológico, possivelmente os refletores destacados em vermelho foram produzidos por ruídos remanescentes no radargrama.

Figura 34 - (A) recorte interpretado do radargrama 18, (B) destaque da possível continuidade de refletores e (C) a provável propagação do ruído no radargrama.



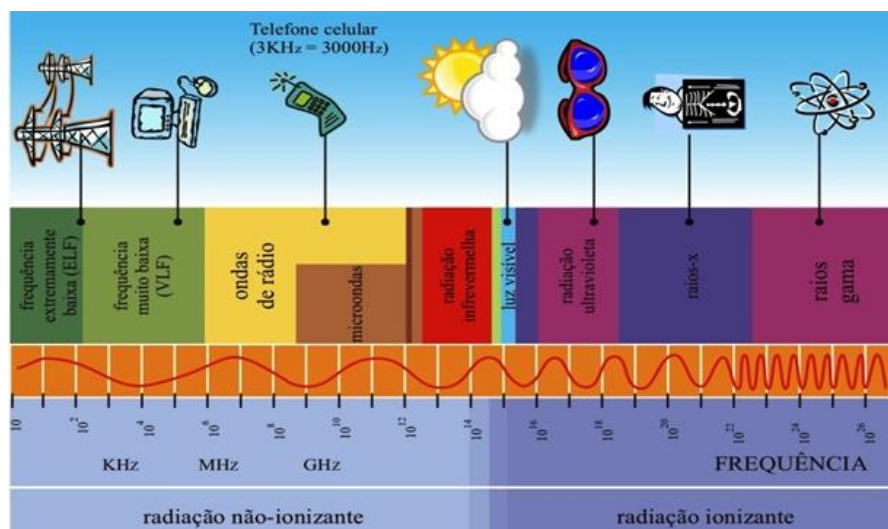
Analisando o radargrama 18 e seu respectivo espectro de frequências antes do processamento (figura 35), é possível notar a presença do ruído em questão se propagando durante toda a secção verticalmente (destacado na figura em vermelho). Analisando o espectro de frequência para o recorte do radargrama 18, destaca-se um pico por volta de 125 MHz de frequência.

Figura 35 - (A) parte do radargrama 18 não processado e (B) seu espectro de frequências.



Como parte deste ruído não pôde ser removido dos dados processados, foi investigado a sua causa. Avaliando as fontes antropogênicas de emissão de ondas eletromagnéticas (figura 36), é possível notar que as estações de rádio transmitem seus sinais entre 1 MHz e 10^6 MHz

Figura 36 - Fontes de emissão de ondas eletromagnéticas



Fonte: web.fe.up.pt

E segundo o website ouvir.frequency-radio.com, há diversas rádios no município de Santa Vitória do Palmar que transmitem na faixa de 100 MHz a 1000 Mhz (figura 37). O que possivelmente explica a presença do ruído na faixa de 100 Mhz nos radargramas.

Figura 37 - Algumas das rádios e suas respectivas frequências para o município de Santa Vitória do Palmar - RS.

Rádio	Frequência	Município	Distrito
Rádio - Santa Vitória do Palmar	100.7	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	1010	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	102	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	104	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	104	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	104.1	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	1420	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	87.9	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	89	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	96	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	97	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio - Santa Vitória do Palmar	98	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio A Voz - Santa Vitória do Palmar	87.5	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio Abaúna - Santa Vitória do Palmar	105.9	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio ABC - Santa Vitória do Palmar	900	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio Acesa - Santa Vitória do Palmar	104.9	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio Acústica - Santa Vitória do Palmar	97.7	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul
Rádio Águas Claras - Santa Vitória do Palmar	1250	Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul

Fonte: ouvir.frequency-radio.com

9 RESULTADOS

9.1 Da Consistência do Controle de Qualidade

O controle de qualidade aplicado aos dados mostrou-se eficiente de maneira qualitativa e quantitativa, oferecendo segurança às etapas de processamento, análise e interpretação dos dados.

9.1.1 Quantitativa

I) A taxa de amostragem usada para a aquisição dos dados satisfaz o critério de Nyquist, evitando falseamento.

II) Foi demonstrado que a resolução vertical referente a aquisição foi suficiente para imagear as estruturas e formas que foram alvo deste trabalho.

9.1.2 Qualitativa

I) Foi possível correlacionar os radargramas processados as interpretações dos dados de sondagens do trabalho de Caron (2014).

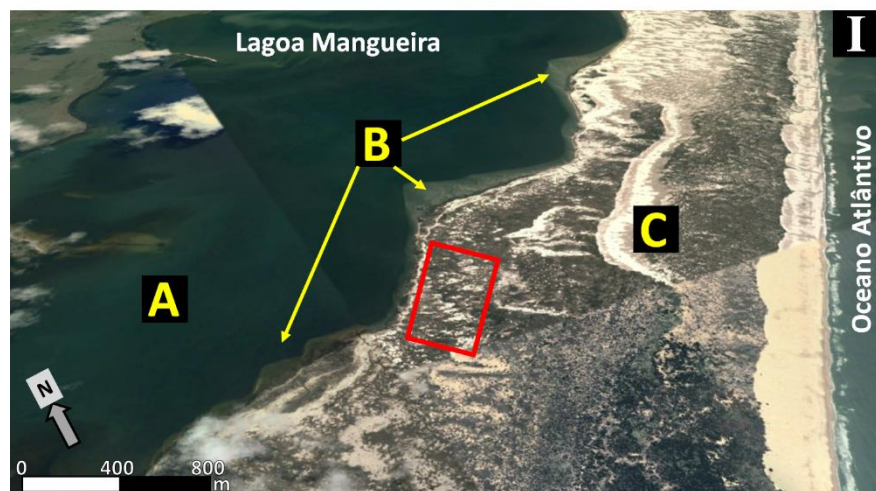
II) As geometrias imageadas e interpretadas através da análise dos radargramas fazem sentido geológico e podem ser observadas de maneira análoga nas morfologias modernas (figura 38).

III) As radarfáceis identificadas possuem continuidade horizontal e podem ser rastreadas nas demais linhas adjacentes (figura 39).

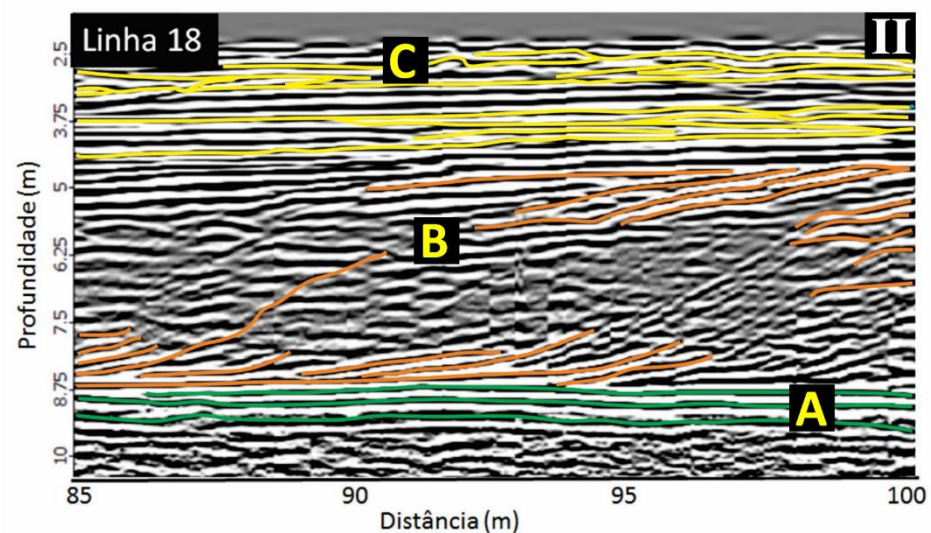
9.2 Do Processamento dos Dados

Como demonstrado anteriormente no tópico Processamento e Análise dos Dados, a rotina de processamento efetuada gerou melhorias significativas para a visualização e interpretação das imagens. A figura 40, ilustra a comparação entre um recorte da linha 18 antes e depois do processamento.

Figura 38 - (I) Vista aérea das morfologias modernas e (II) recorte do radargrama 18 interpretado.



Fonte: modificado de Google Earth 2016



Radarfácies	Cor do Traço	Descrição	Interpretação
C		Refletores ondulados a pouco ondulados, descontinuos, sub-paralelos, por vezes cruzados com inversão de direções.	Éolico
B		Refletores com médio ângulo de mergulho sigmóides-obliquos com terminações em downlap.	Margem Lacustre
A		Refletores horizontais contínuos plano-paralelos, uniformemente espaçados.	Fundo lacustre

Área de Estudo

Figura 39 - padrões das radarfáceis repetindo-se nas linhas 12, 14, 18 e 24.

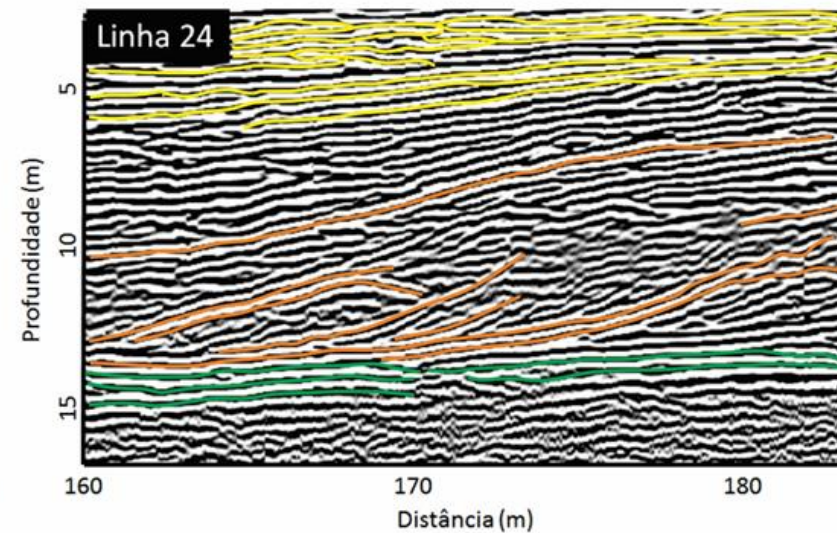
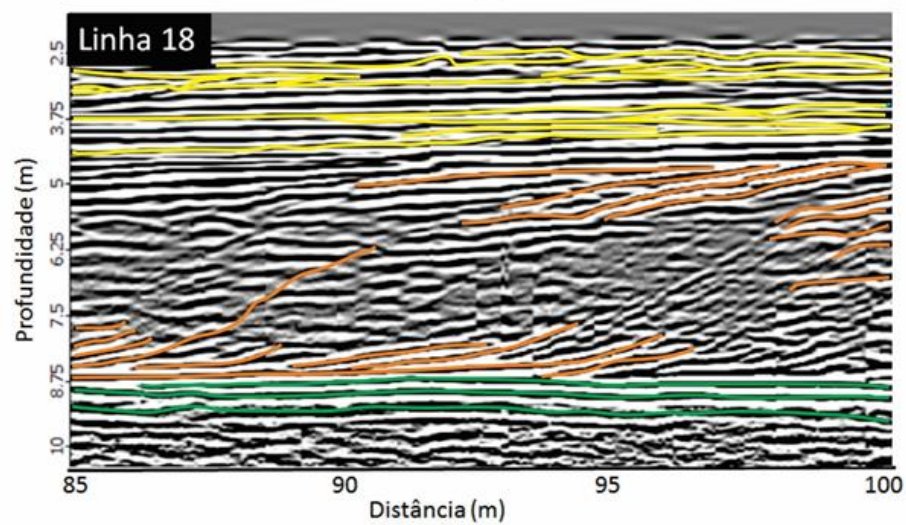
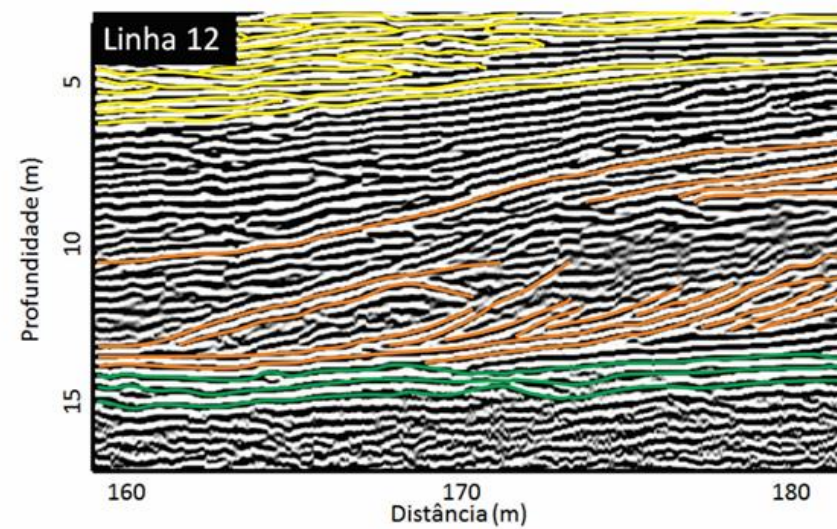
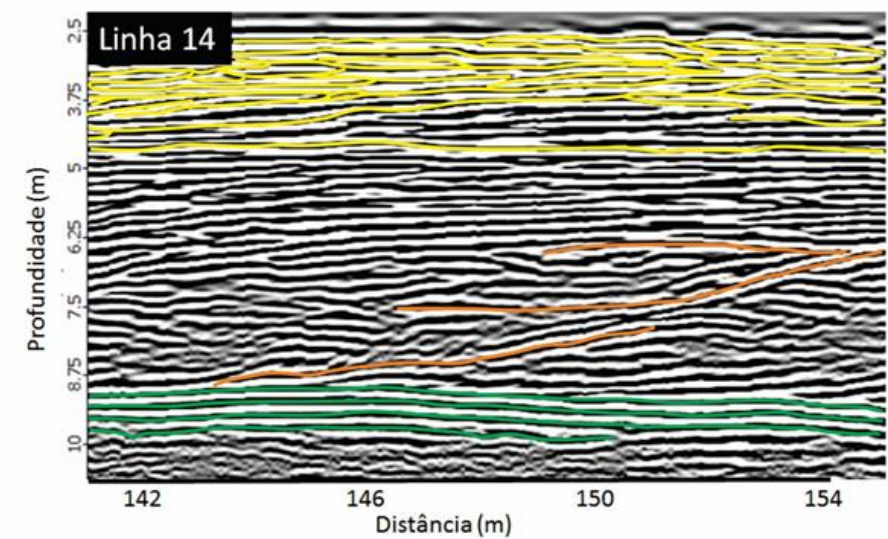
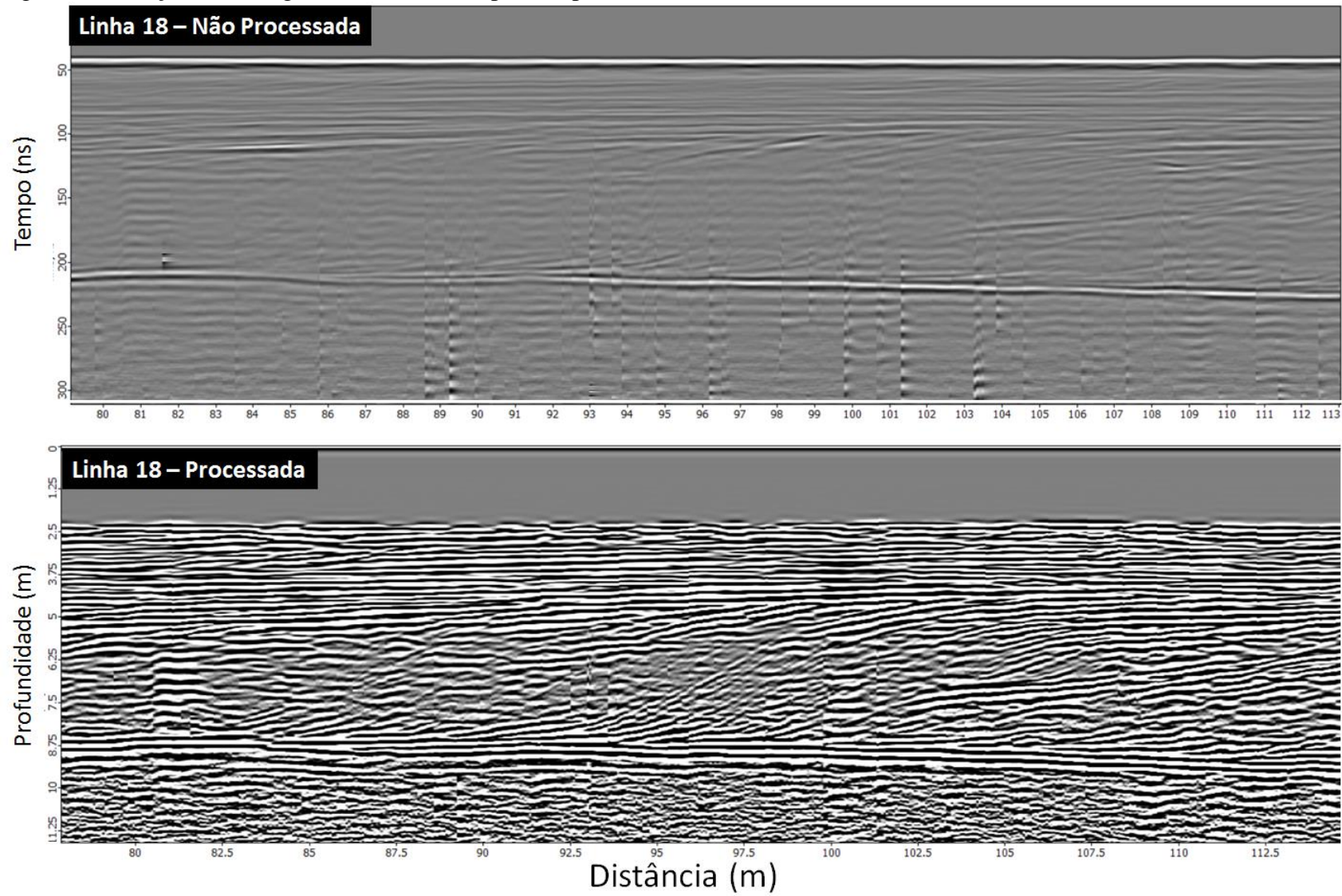


Figura 40 - Secção do radargrama 18, antes e depois do processamento.



10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A etapa de controle de qualidade comprovou a fidelidade dos dados de maneira quantitativa ao demonstrar que a taxa de amostragem utilizada durante aquisição foi suficiente para evitar falseamento. E também ao demonstrar que a resolução obtida para a investigação foi satisfatória para identificar estruturas de interesse. De maneira qualitativa foi possível comprovar a fidelidade dos dados, uma vez que as estruturas detalhadas neste trabalho fazem sentido geológico, possuem continuidade ao longo das secções, são observadas nas demais secções adjacentes e puderam ser associadas a morfologias modernas do local de maneira análoga.

Apoiada na confiabilidade oferecida pela etapa de controle de qualidade, a rotina adotada para o processamento dos dados costeiros de GPR ofereceu melhorias significativas para a visualização das imagens, permitindo assim uma interpretação mais segura dos radargramas. Entre as técnicas aplicadas, foi observado uma maior eficiência no: controle de ganho, filtro passa-banda trapezoidal, conversão em profundidade e correção topográfica.

As imagens processadas viabilizaram a interpretação dos dados em termos de geometrias relativas e superfícies dos sistemas deposicionais correlatos. Deste modo foi evidenciado três diferentes padrões de refletores que foram interpretados como ambiente: de fundo lacustre, margem lacustre e eólico. Através desta etapa, foi possível examinar novamente a consistência do processamento e distinguir parte do ruído que permaneceu nos dados.

REFERÊNCIAS

- ANNAN, J. L. (1989). **Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy**. *Geophysical Prospecting*, 531 - 551.
- BARBOSA, E. G., & Correa, M. L. (2014). **Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emerça da Bacia de Pelotas**. *Revista Brasileira de geofísica*.
- BOHACS, K. M. (2010). **Sequence Stratigraphy in Lacustrine Systems**. Em V. Abreu , J. E. Neal , K. M. Bohacs , & J. L. Kalbas , *Sequence Stratigraphy of Siliciclastic Systems - The ExxonMobil Methodology: Atlas of Exercises* (p. 226). Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- CARON, F. (2014). **Estratigrafia e Evolução Da Barreira Holocênica Na Região Costeira De Santa Vitória do Palmar, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. Porto Alegre .
- CLAERBOUT, J. F. (1985). *Fundamentals of Geophysical Data Processing - with application to Petroleum Prospecting* . Oxford : Blackwell Scientific Publications.
- DILLENBURG, S. e Hesp. (2009). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin: Springer.
- fe up*. (15 de Novembro de 2016). web.fe.up.pt/~ee96007/Extras3.htm.
- DAVIS, L. e Annan, A. P. (1989). **Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. *Geophysical Prospecting*, 531-551.
- JOL, H.M. and Bristow, C.S., 2003, **GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide**, in Bristow, C.S. and Jol, H.M. (eds), *Ground Penetrating Radar in Sediments*, Geological Society, London, Special Publication 211, pp. 9–27.
- JOL, H. M. (2009). *Ground Penetration Radas: Theory and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science.
- MANZOLI, R. P. (2011). **Geomorfologia do Complexo de Cordões Litorâneos Lagunares do Pontal da Feitoria - Margem Oeste-Sul da Laguna dos Patos**.
- MITCHUM, R.M. Jr., Vail. P.R., and Thompson, S. III., 1977, **Seismic stratigraphy and global changes in sea level, Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis**. In Payton, C.E., (ed.) *Seismic Stratigraphy – applications to*

hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, pp. 53–62.

NEAL, A. (2004). **Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress.** *Earth-Science Reviews* , 261-330.

Ouvir Freqüência-radio. (15 de Novembro de 2016). Fonte: <http://ouvir.frequencia-radio.com/frequenciasradio-santa-vit%C3%B3ria-do-palmar.html>

REINSON, G. E. (1992). **Transgressive Barrier Island and Estuarine Systems** . Em R. G. James, *Facies Models - Response to Sea Level Change* (p. 409). S. Johns: Geological Association of Canada.

ROSA, M. L. C. (2012). **Geomorfologia, Estratigrafia de Sequências e Potencial de Preservação dos Sistemas Laguna-barreira do Quaternário Costeiro do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre

TOMAZELLI, L. (2000). **Late Quaternary Geological History of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil.** *Revista Brasileira de Geociências* , 472-474.

TOMAZELLI, L., e Villwock , J. (2000). *Geologia do Rio Grande do Sul.* Porto Alegre: CECO / UFRGS.

VAIL, P.R., Todd, R.G. and Sangree, J.B., 1977, **Seismic stratigraphy and global changes in sea level, part 5: Chronostratigraphic significance of seismic reflections,** in Payton, C.E. (ed.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration* AAPG Memoir 26, pp. 99–116.

ZHOU, H.-w. (2013). *Practical Seismic Data Analysis.* Houston : University of Houston.