



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

EDIÇÃO E FILTRAGEM DE DADOS SÍSMICOS DE
ALTA RESOLUÇÃO - ESTUDO DE CASO DA
DUTOVIA DA REGIÃO NOROESTE DA BAÍA DE
GUANABARA - RJ

DANILO SILVA LISBOA

SALVADOR – BAHIA

Novembro de 2014

Edição e filtragem de dados sísmicos de alta resolução - Estudo de caso da
dutovia da região noroeste da Baía de Guanabara - RJ

por

DANILO SILVA LISBOA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

_____ Dr. Marco Botelho (UFBA) - Orientador

_____ Dr. Milton Porsani (UFBA)

_____ Dr. Arno Brichta (UFBA)

Data da aprovação: 25/11/2014

Dedicado a
Pedro Correia Lisboa.

"Truth is stranger than fiction, but it is because fiction is obliged to stick to possibilities; Truth isn't. "

Mark Twain

RESUMO

Dados de sísmica de reflexão de alta resolução, amplamente empregados em diversos segmentos da indústria e da pesquisa, são normalmente interpretados sem a necessidade de processamento graças à boa qualidade das seções já em sua forma bruta. Entretanto, as poucas pesquisas dedicadas ao processamento de tais dados demonstraram um considerável progresso na qualidade das seções sísmicas submetidas a algumas etapas do processamento sísmico convencional. Nesta pesquisa, dados sísmicos de alta resolução da região interna da Baía de Guanabara-RJ, mais especificamente dados do sistema *Chirp*, levantados originalmente para a localização de dutos artificiais, foram submetidos a um fluxo de processamento básico. As particularidades dos dados de alta resolução foram levadas em consideração para a aplicação do fluxo de processamento, objetivando melhorias na definição dos refletores e no aspecto visual da seção. Em linhas gerais, o fluxo centrou seus objetivos em editar a geometria e qualidade dos traços, e atenuar os ruídos que se apresentam no domínio da frequência e da amplitude, buscando melhor identificar os eventos (hipérboles de difração) indicadores das tubulações que compõe a dutovia investigada. A constatação da eficiência das operações foi realizada a partir da comparação com os dados brutos e de análises dos espectros e histogramas de frequência e amplitude após a aplicação de cada etapa. Os perfis processados foram utilizados para localizar os dutos e verificar se estes encontram-se soterrados nos sedimentos inconsolidados, ou aflorantes ao nível do assoalho oceânico, representando, portanto, um risco socio-ambiental em potencial. O fluxograma proposto evidenciou uma considerável melhoria na qualidade do dado e na definição dos refletores de interesse, aprimorando, portanto, sua visualização e a interpretabilidade das seções finais.

ABSTRACT

Seismic reflection data, high-resolution, widely employed in various segments of industry and research are usually interpreted without the need for processing thanks to the good quality of the sections already in its raw form. However, little research is dedicated to the processing of such data demonstrated considerable progress in the quality of seismic sections subjected to few steps from the conventional seismic processing. In this research, high-resolution seismic data from the internal region of the Bay of Guanabara, Rio de Janeiro, more specifically data system textit Chirp, originally raised for locating artificial ducts underwent a basic workflow processing. The peculiarities of high-resolution data were taken into consideration for the purposes of processing flow, aiming to improve the definition of the reflectors and the visual aspect of the section. In general, the flow focused on edit the geometry and quality of traces, and attenuating noise that is present in the frequency domain and range, seeking to better identify events (hyperbole diffraction) indicators of the pipeline investigated. The efficiency of operations was performed from the comparison with the raw data and analysis of the spectra and histograms of frequency and amplitude after application of each step. The processed profiles were used to locate the pipes and verify if they are buried in unconsolidated sediment level or outcrop at the seafloor, thus representing a socio-environmental potential risk. The proposed workflow processing showed a considerable improvement in the quality of data and the definition of the reflectors of interest, thus enhancing its visualization and interpretability of the final sections.

ÍNDICE

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Apresentação da pesquisa	3
1.1 Área de estudo	5
1.2 Justificativa e objetivos	8
CAPÍTULO 2 Dados sísmicos	10
2.1 Teoria da sísmica de reflexão	10
2.2 Sísmica de alta resolução	13
2.3 Sistemas de aquisição sísmica marinha	14
2.4 Levantamento dos dados	17
CAPÍTULO 3 Fluxograma de processamento básico	22
3.1 Leitura do dado	23
3.2 Geometria	25
3.3 Análise espectral	29
3.4 Deconvolução	34
3.5 Aplicação do fluxograma	38
CAPÍTULO 4 Considerações finais	45
Agradecimentos	47
Referências Bibliográficas	48
APÊNDICE A Seções sísmicas processadas contendo as indicações dos dutos de interesse	50

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Mapa do Brasil, à esquerda. Carta náutica 1501 da Baía de Guanabara - RJ, à direita. Em vermelho destaca-se a região onde foi desenvolvido o levantamento dos dados sísmicos sobre a dutovia	6
2.1	Exemplos de sistemas de aquisição sísmica marinha rasa com fontes ressonantes. a) Ecobatímetro modelo <i>Garmin Fishfinder Eco 200</i> ; fonte: http://continuouswave.com/ acessado em 29/09/2014; b) À esquerda, perfilador de subfundo modelo <i>Edge Tech SB-512i</i> do tipo <i>Chirp</i> ; à direita estrutura contendo os flutuadores, onde o transdutor é acoplado; fonte Souza (2006); c) Sonar de varredura lateral modelo <i>Towfish DE340</i> , e componentes necessários para a aquisição em campo; fonte http://www.hydrosurvey.cn/ , acessado em 29/09/2014.	15
2.2	Exemplos de sistemas de aquisição sísmica marinha rasa com fontes impulsivas. a) Fonte acústica do tipo <i>Boomer</i> , modelo AA 200 da <i>Applied Acoustic Engineering</i> acoplada à flutuadores a serem rebocados na popa da embarcação; b) Exemplos de placas de <i>Boomers</i> modelos ED-5 e ED-10; c) Fonte acústica do tipo <i>Sparker</i> , modelo ELC820 da SIG; d) <i>Sparker</i> modelo <i>Squid 500</i> da <i>Applied Acoustic</i> ; e) <i>Sparker</i> de pequeno porte pertencente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT fonte Souza (2006). . .	16
2.3	Diagrama ilustrativo dos espectros de frequência emitidos, das energias das fontes e das profundidades de investigação dos principais sistemas de aquisição sísmica marinha rasa. Fonte: modificado de Trabant (1984).	17
2.4	Esquema ilustrativo da perfilagem sísmica contínua; abaixo um exemplo de perfil sísmico obtido em tempo real. Fonte geostar-surveys.com/ . Acessado em 22/09/2014.	19
2.5	Imagem de satélite mostrando a localização, sentido de aquisição e comprimento das linhas sísmicas 1 a 9.	19
2.6	Imagem de satélite mostrando a localização, sentido de aquisição e comprimento das linhas sísmicas 10 a 18.	20
2.7	Imagem aérea evidenciando a região do levantamento dos dados.	20
2.8	Imagem do perfil bruto (linha 10) escolhido para ser submetido ao fluxograma de processamento. Em amarelo destacam-se as estruturas de interesse (dutos).	21
3.1	Fluxograma de processamento evidenciando as principais operações de cada etapa.	23

3.2	Perfil sísmico bruto importado para o módulo 2D-Data analysis. Em azul destacam-se os dutos, objeto de interesse durante a aquisição dos dados e da presente pesquisa.	25
3.3	Interface do módulo 2D-Data Analysis mostrando da esquerda para a direita a tabela de cabeçalho dos traços, e os Menus de edição dos cabeçalhos do perfil e dos traços.	26
3.4	Perfil 10 antes (esquerda) e depois (direita) da operação de corte de tempo em 20 ms.	27
3.5	Interface gráfica do programa <i>ReflexW</i> mostrando a seção antes (acima) e depois (abaixo) da remoção dos traços ruidosos, listados na janela do Edit-Trace/tracerange. A posição de dos traços removidos podem ser visualizadas pelos quadrados vermelhos dispostos acima do perfil superior.	28
3.6	Interface gráfica do programa <i>ReflexW</i> mostrando a seção antes (acima), com a área a ser limpa representada pelo polígono hachurado, e o resultado (abaixo) após a aplicação da função <i>muting</i> de silenciamento da coluna d'água.	29
3.7	Soma dos espectros de frequência de todos os traços sísmicos correlacionados com o tempo (ou profundidade) do perfil sísmico antes das operações de filtragem.	30
3.8	Histogramas de amplitude e frequência sobrepostos à seção sísmica antes das operações de filtragem.	31
3.9	Seções sísmicas antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação do balanceamento espectral. À direita encontra-se a janela onde pode ser visualizado o resultado da aplicação do filtro sobre traços individuais e sobre o espectro de frequência.	32
3.10	Perfis antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do filtro passa-banda. À direita se observa os histogramas de amplitude e frequência do perfil filtrado.	33
3.11	Soma dos espectros de frequência dos traços sísmicos correlacionados com o tempo da seção submetida às etapas de balanceamento espectral e filtro de frequências.	33
3.12	Perfis sísmicos referentes à linha 10 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação da deconvolução.	34
3.13	Histogramas de amplitude (acima) e frequências (abaixo) da seção processada.	35
3.14	Soma dos espectros de frequência correlacionados com o tempo (ou profundidade) do perfil processado.	36
3.15	Perfil bruto (esquerda) e processado (direita) referentes à linha 10, demonstrando uma considerável melhoria no aspecto visual da seção e na definição das estruturas de interesse.	37
3.16	Perfil sísmico 2 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	38

3.17	Perfil sísmico 4 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	40
3.18	Perfil sísmico 7 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	40
3.19	Perfil sísmico 8 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	41
3.20	Perfil sísmico 9 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	41
3.21	Perfil sísmico 11 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	42
3.22	Perfil sísmico 12 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	42
3.23	Perfil sísmico 13 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	43
3.24	Perfil sísmico 14 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	43
3.25	Perfil sísmico 15 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	44
3.26	Perfil sísmico 17 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.	44
A.1	Perfil sísmico processado referente à linha 2. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	50
A.2	Perfil sísmico processado referente à linha 4. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	51
A.3	Perfil sísmico processado referente à linha 7. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	51
A.4	Perfil sísmico processado referente à linha 8. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	52
A.5	Perfil sísmico processado referente à linha 9. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	52
A.6	Perfil sísmico processado referente à linha 10. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	53
A.7	Perfil sísmico processado referente à linha 11. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	53
A.8	Perfil sísmico processado referente à linha 12. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	54
A.9	Perfil sísmico processado referente à linha 13. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	54

A.10 Perfil sísmico processado referente à linha 14. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	55
A.11 Perfil sísmico processado referente à linha 15. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	55
A.12 Perfil sísmico processado referente à linha 17. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).	56

INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos são aplicados na superfície da terra, com o objetivo de se obter modelos aproximados da geologia da subsuperfície. Existem técnicas de inversão e processamento que quando aplicadas aos dados geofísicos registrados na superfície fornecem estimativas das propriedades físicas das camadas geológicas e uma boa definição da geometria da distribuição destas propriedades em subsuperfície. Para realizar medições destas propriedades físicas, podem ser utilizados diversos métodos geofísicos, entre os quais os métodos sísmicos que medem os tempos de trânsito de ondas acústicas e/ou sísmicas; a gravimetria e a magnetometria medindo o campo gravitacional e magnético respectivamente, entre outros. As distribuições espaciais destes parâmetros podem ser analisadas individualmente ou de maneira conjunta, sendo suas variabilidades lateral e vertical utilizadas para fornecer importantes informações acerca das características geológicas da região investigada.

Entre estes métodos geofísicos, destaca-se a sísmica de reflexão cuja utilização, amplamente disseminada graças ao alto investimento oriundo da indústria do petróleo, abrange alvos localizados nas mais diversas profundidades. No ambiente marinho, os métodos que utilizem a propagação de ondas acústicas para a investigação do subfundo representam poderosas ferramentas, visto que os métodos de sensoriamento remoto por radar são amplamente prejudicados devido a alta atenuação das ondas eletromagnéticas pela água do mar. O sensoriamento remoto acústico representa, portanto, o principal meio de investigação da subsuperfície marinha (Souza, 1988), e é comumente empregado em investigações relacionadas à temas como a exploração mineral e energética, oceanografia, aspectos ambientais, estratigrafia, engenharia costeira e geotecnia.

A utilização do método sísmico para estudos mais rasos começou a se desenvolver a partir da década de 70, com o aparecimento da eletrônica digital, da microinformática e consequentemente, dos primeiros sismógrafos digitais e sistemas de processamento em microcomputadores (Trabant, 1984). O considerável progresso tecnológico obtido desde então culminou no desenvolvimento de técnicas e equipamentos agrupados pelo termo “Sísmica de alta resolução”. Este termo surgiu com o objetivo de diferenciar a sísmica convencional (2 - 80 Hz), amplamente utilizada na indústria do petróleo, da sísmica de alta resolução, ou alta frequência ($10^2 - 10^4$ Hz), utilizada para alvos menores localizados em pequenas profundidades.

Por outro lado, durante esse mesmo período (desde a década de 1970 ao presente) o Brasil sofreu uma forte intensificação no processo de urbanização e industrialização, associada ao

crescimento populacional e econômico. Grande parte das atividades antrópicas relacionadas a este crescimento se concentra nas áreas plataformais rasas adjacentes às grandes cidades litorâneas. Podem ser citadas as atividades relacionadas ao lazer, turismo, pesca, implantação de hidrovias, portos, pontes, marinas, dutos, emissários, à exploração mineral de recursos plataformais rasos e ao descarte de resíduos. Para a implementação segura de algumas destas atividades e estruturas, tornou-se imperativo o conhecimento detalhado destes ambientes, muitas vezes desenvolvido a partir da aplicação de métodos da sísmica de reflexão rasa.

A presente pesquisa representa, portanto, mais uma tentativa de coletar dados úteis à manutenção de uma dutovia situada em um ambiente marinho raso das adjacências de uma metrópole litorânea brasileira. Dados de sísmica de alta resolução da região a noroeste da Baía de Guanabara - RJ, entre a ilha do Governador e o estuário do rio Sarapuí, foram utilizados para verificar se os dutos presentes estão enterrados, ou não, no leito da Baía de Guanabara. Para melhorar a interpretabilidade as seções sísmicas foram submetidas a um fluxo de processamento básico contendo algumas etapas do processamento sísmico convencional adaptadas aos dados de alta resolução. Este fluxo de processamento buscou o aprimoramento na visualização dos perfis sísmicos finais, permitindo, desta forma, identificar os eventos de maneira mais clara que nos dados brutos.

Diante do exposto, ressalta-se a motivação desta pesquisas que se propõe a localizar dutos enterrados, ou aflorantes, no leito da Baía de Guanabara, a partir de seções sísmicas de alta resolução registradas por um equipamento do tipo *Chirp* (3,5 KHz).

Esta pesquisa, apresentada como trabalho final de graduação em Geofísica, foi estruturada da seguinte maneira: no Capítulo 1 a pesquisa é apresentada, são feitas algumas considerações a respeito da região de estudo, da justificativa e dos objetivos da pesquisa. No Capítulo 2 a teoria da sísmica de reflexão é explanada sucintamente, assim como algumas particularidades e aplicações da sísmica de alta resolução. Além disso, são apresentadas as características do levantamento dos dados. No Capítulo 3 são expostos os resultados do fluxo de processamento a partir da exposição do perfil sísmico antes e depois de cada etapa. Ainda neste capítulo, a aplicabilidade do fluxo proposto é testada em três outros perfis expostos em suas formas bruta e processada. Por fim, no Capítulo 4 são feitas algumas considerações finais e conclusões da pesquisa. No apêndice A encontram-se as seções sísmicas submetidas ao fluxo e utilizadas para a identificação das estruturas de interesse.

CAPÍTULO 1

Apresentação da pesquisa

Entre as técnicas geofísicas de prospecção que obtiveram considerável progresso nas últimas décadas, graças a sua ampla gama de utilização, destacam-se as relacionadas à sísmica de reflexão de alta resolução, as quais constituem poderosas ferramentas, capazes de fornecer resoluções espaciais na ordem dos centímetros. Para alvos em pequenas profundidades, normalmente ligados a temas como a oceanografia, a engenharia costeira, a neotectônica, a geotecnia, ou a exploração de recursos plataformais rasos, é comum a utilização da sísmica de alta resolução (Panda et al., 1994). Este método consiste na utilização dos mesmos princípios da reflexão sísmica convencional, entretanto, apresenta espectros de alta frequência e, por consequência, alto poder de resolução e menores profundidades de investigação (Quinn et al., 1998). Para isso, os vários tipos de métodos sísmicos rasos contam com sistemas de aquisição dos dados, fontes e receptores, distintos dos empregados na sísmica de reflexão convencional.

Entre as pesquisas dedicadas ao processamento de dados sísmicos rasos destaca-se a desenvolvida por Quinn et al. (1998), objetivando demonstrar a aplicabilidade de alguns algoritmos de processamento da sísmica convencional aos dados de alta resolução. Em tal pesquisa, os autores enfatizam a importância de uma assinatura da fonte bem conhecida através da aplicação de algumas etapas como autocorrelação, filtragem de frequências, cálculo de amplitudes, aplicação de ganhos, deconvolução e migração, sendo estas divididas em duas fases principais: fase 1 - Correlação e Deconvolução; e fase 2 - Filtragem. Dados de *Chirp* (ver seção 2.2), com intervalo de amostragem de $40 \mu s$ e assinatura da fonte com frequências no intervalo de 2 - 8 KHz, foram obtidos em East Solent, U.K., em ambientes rasos (7,5 metros em média), com intervalo entre os traços de 0,6 metros. Estes dados foram submetidos a um fluxo de processamento ótimo, demonstrando melhorias na razão sinal/ruído e na continuidade lateral dos refletores. Segundo os autores, a interpretabilidade da seção final foi consideravelmente aprimorada através da aplicação das sucessivas etapas propostas no fluxo, sendo a eficiência delas beneficiada pela repetitividade da fonte.

Outra pesquisa com dados de *Chirp* obtidos em East Solent (U. K.) refere-se a desenvolvida por Bull et al. (1998b). Neste trabalho demonstra-se a possibilidade da utilização dos dados sísmicos de alta resolução para o cálculo de coeficientes de reflexão, usando informações de amplitude e polaridade derivadas de traços individuais e média entre traços. Dados de *Chirp*

com características similares aos de Quinn et al. (1998) (intervalo de frequência de 2-8 KHz e intervalo de amostragem de 40 μ s), combinados à dados de sonar de varedura lateral, foram utilizados para demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta à casos de estudos ligados a arqueologia. O naufrágio *Invencible* (século XVIII), composto de peças de madeira soterradas nos primeiros metros de sedimentos inconsolidados em uma lâmina d'água de 10 metros, foi escolhido como local para teste da metodologia e cálculo dos coeficientes de reflexão. Os resultados encontrados para as camadas sedimentares superficiais e para as peças de madeira soterradas concordaram com os estudos teóricos e práticos desenvolvidos previamente por Quinn et al. (1997), comprovando a aplicabilidade destes dados nestes tipos de investigação.

Aplicações de dados sísmicos de alta resolução para a classificação remota acústica dos sedimentos do assoalho marinho também são amplamente disseminadas. Em pesquisa desenvolvida por Leblanc e King (1992), o retorno acústico quantitativo de dados de *Chirp* da Baía de *Narragansett - RI* foi utilizado para estimar a impedância acústica superficial e para prever as propriedades dos sedimentos. Estes dados foram utilizados para criar um robusto modelo acústico de classificação sedimentar capaz de prever a densidade, porosidade, compressibilidade e rigidez superficial à partir das estimativas das impedâncias acústicas, caso o ambiente deposicional e seus parâmetros sejam bem conhecidos.

Em pesquisas desenvolvidas por Gomes et al. (2010) e Marino et al. (2012), dados de *Chirp* das regiões de Macau-RN e Baía de Guanabara-RJ, respectivamente, foram utilizados para a elaboração de fluxos de processamento, buscando a obtenção de perfis processados com qualidade superior aos perfis brutos. Em ambas as pesquisas a melhoria na interpretabilidade da seção final caracterizou o principal objetivo do processamento. Os fluxogramas propostos coincidem na maioria das etapas, tais como: silenciamento da coluna d'água; edição de traços; filtragem de frequências; balanceamento espectral e deconvolução preditiva. Entretanto, é importante destacar que os parâmetros selecionados em cada uma destas etapas leva em consideração as peculiaridades dos dados, apresentado-se portanto, de maneira diferenciada entre as duas pesquisas. Os resultados obtidos a partir da aplicação de ambos os fluxogramas demonstraram uma considerável melhoria no aspecto visual do perfil, na continuidade lateral dos refletores e na interpretabilidade da seção final, comprovando a aplicabilidade de algumas operações do processamento sísmico convencional aos dados de alta resolução.

Outra aplicação, amplamente disseminada em vários segmentos da indústria, refere-se à utilização da sísmica rasa para o conhecimento detalhado do fundo e subfundo marinho de regiões submetidas à implantação de estruturas artificiais. Tais investigações estão, normalmente, associadas à temas como a geotecnia, engenharia costeira ou exploração mineral/energética. Em pesquisa desenvolvida por Cwik et al. (2010) dados de sonar de varedura lateral, sísmica de alta resolução e batimetria foram combinados para identificar a morfologia e as estruturas presentes no fundo e subfundo marinho de uma área destinada à implantação

de dutos submarinos. Estruturas como afloramentos rochosos, *beach rocks*, recifes, falhamentos, linhas de dutos abandonadas, âncoras, podem comprometer a integridade dos dutos a serem implantados, representando, portanto, riscos socioeconômicos e ambientais. A identificação de tais estruturas foi utilizada para a formulação de mapas temáticos através de diferentes métodos de inferência espacial (Média ponderada, *Booleano* e *Fuzzy*). Segundo os autores, a combinação de dados geológicos e geofísicos forneceu o apoio para definição de áreas favoráveis ao traçado de diretrizes dos dutos, sendo o método de *Fuzzy* ponderado o mais adequado devido ao maior comprometimento com a segurança.

Na presente pesquisa dados sísmicos de alta resolução, originalmente obtidos para a localização de dutos aflorantes, ou soterrados nos primeiros metros de sedimentos inconsolidados da região noroeste da Baía de Guanabara – RJ, foram utilizados para a aplicação de um fluxograma básico de processamento, contendo algumas etapas do processamento sísmico convencional adaptadas às particularidades dos dados de alta resolução. Em linhas gerais, o fluxograma centrou seus objetivos na edição e filtragem das seções sísmicas adquiridas em direções aproximadamente perpendiculares a dutovia em questão, buscando interferir minimamente no dado original. A aplicabilidade do fluxograma foi testada em outras linhas sísmicas referentes ao mesmo levantamento, sendo os perfis sísmicos processados utilizados para reunir informações acerca da disposição dos diversos dutos componentes da dutovia investigada.

Ainda neste capítulo são apresentadas algumas características geológicas e oceanográficas da região onde foi desenvolvida a aquisição dos dados. A partir de então são apresentadas as justificativas e os objetivos da presente pesquisa.

1.1 Área de estudo

A Baía de Guanabara (figura 1.1), localizada no estado do Rio de Janeiro, na região metropolitana das cidades de Niterói, São Gonçalo e Rio de Janeiro, representa uma das mais proeminentes baías do litoral brasileiro (Silveira, 1964). Situada entre as latitudes $22^{\circ}40'$ e $23^{\circ}00'S$ e as longitudes $43^{\circ}00'W$ e $43^{\circ}20'W$, com cerca de 131 km de perímetro, e extensões máximas de 30 km (N-S) e 28 km (E-W), a Baía possui mais de 381 km^2 de área superficial, totalizando um volume médio de água estimado em $1,87 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Amador, 1992). Ainda segundo este autor, sua bacia de drenagem possui área aproximada de 4600 km^2 , compreendendo grande parte da região metropolitana do Rio de Janeiro com descarga média anual em torno de $356 \text{ m}^3 / \text{s}$.

Grande parte da batimetria da Baía revela profundidades inferiores a 10 metros, sendo a média de profundidade calculada em torno de 5,7 metros (Quaresma, 1997). A feição mais proeminente da Baía é o canal central com maiores profundidades que se estende desde a

entrada da baía até a ponte Rio-Niterói por mais de 400 metros. Este canal possui largura variando de 1,6 a 2,0 km, direção aproximada Norte-Sul (348°), profundidades mais comuns entre 30 e 40 metros, sendo a profundidade máxima de 50 metros próximos à entrada da Baía (Quaresma et al., 2001). Segundo Dias e Quaresma (1996), na margem leste este canal pode ser descrito como um campo de ondas de areia com alturas entre 0,5 e 2,5 metros, comprimento de onda entre 20 e 100 metros e profundidades entre 10 e 26 metros.

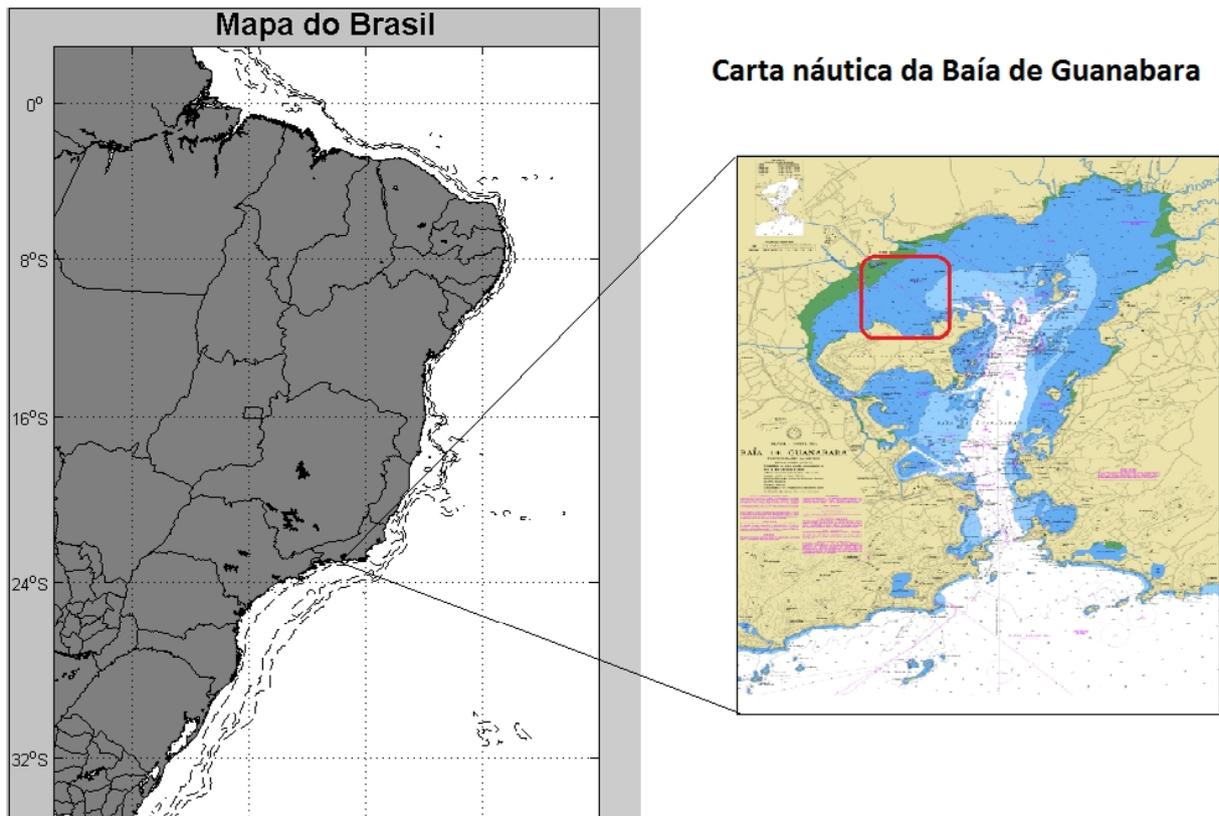


Figura 1.1: Mapa do Brasil, à esquerda. Carta náutica 1501 da Baía de Guanabara - RJ, à direita. Em vermelho destaca-se a região onde foi desenvolvido o levantamento dos dados sísmicos sobre a dutovia

O padrão de circulação superficial da Baía é principalmente influenciado pelas correntes de maré, sendo as amplitudes médias calculadas em torno de 1,1 e 0,3 metros para as condições de sizígia e quadratura respectivamente (Kjerfve et al., 1997). Segundo Quaresma (1997), esta Baía está enquadrada no regime de micromarés. Condições de correntes mais intensas podem acontecer em situações de aceleração das correntes de maré devido à ação conjunta dos ventos. Em condições de preamar as correntes podem ser aceleradas por ventos de S, SE e SW, ao passo que em baixamar os ventos de N, NE e NW podem acarretar na intensificação das correntes (Quaresma, Dias e Baptista Neto, 2001).

Próximo a entrada da Baía observa-se um grande banco arenoso que se eleva quase 10 metros

do fundo, situado a profundidades próximas a 20 metros (Dias e Quaresma, 1996). Segundo Quaresma (1997), a presença desta feição, associada à configuração da costa na entrada da Baía, tem fortes implicações no padrão de circulação, pois juntas são responsáveis pelo estrangulamento e canalização das correntes próximas a entrada da baía.

A distribuição sedimentar é caracterizada pelos sedimentos clásticos finos localizados a montante, e os mais grossos a jusante da Baía (Kjerfve et al., 1997). Sedimentos do tamanho areia estão localizados com maior frequência em zonas de maior energia de corrente, mais próximos a entrada da Baía, enquanto os sedimentos finos acumulam-se nas zonas de baixa hidrodinâmica. De maneira geral sedimentos lamosos são predominantes (Kjerfve et al., 1997). Em grande parte da Baía ocorrem lamas terrígenas e lamas terrígenas arenosas ligadas, principalmente, à diminuição das velocidades das correntes, sendo, portanto, mais proeminentes na região interna na forma de siltes finos a muito finos e argilas.

Em relação à evolução geológica da Baía, segundo observações de Ruellan (1944), a Baía de Guanabara, localizada em uma faixa de depressões terciárias denominada de rifte da Guanabara, se originou a partir de uma depressão de ângulo de falha entre os blocos da Serra dos Órgãos e dos pequenos maciços costeiros, correspondendo a um compartimento estrutural rebaixado tectonicamente de idade Cenozoica. O rifte do tipo semigráben possui blocos basculados na direção NW, sendo limitado ao norte pela Serra do Mar, e a leste e oeste por colinas e planícies (Jica, 1994).

A região onde foi desenvolvida a aquisição dos dados, região interna da Baía compreendida entre a Ilha do Governador e o estuário do rio Sarapuí (figuras 1.1, 2.2, 2.3 e 2.4), é caracterizada por uma baixa energia hidrodinâmica de correntes de marés e de ondas, pouca profundidade, e sedimentos, em geral, muito finos (Quaresma, 1997)(Kjerfve et al., 1997). Segundo estes autores, esses sedimentos são pouco selecionados, com diâmetro médio que varia de silte fino/muito fino a argila e apresentam altas concentrações de matéria orgânica. As águas calmas desta área caracterizam um ambiente deposicional aonde as partículas vão decantando lentamente pela coluna d'água, proporcionando a acumulação de grandes quantidades de sedimento fino de origem terrígena.

Esta região foi utilizada para a implantação de diversos dutos que conectam a ilha do Governador ao continente. Tais dutos encontram-se dispostos sobre o fundo da Baía, ou soterrados nos primeiros metros de sedimentos inconsolidados. É importante destacar que a área compreendida pela perfilagem sísmica contínua apresenta profundidades da ordem de poucos metros, diminuindo gradativamente em direção do continente, o que impossibilitou a aquisição dos dados em parte da área prevista, originalmente, para ser investigada.

1.2 Justificativa e objetivos

Em geral, nas pesquisas geofísicas de prospecção após a etapa de aquisição dos dados ocorre o processamento, basicamente dividido em pré-processamento, processamento e imageamento. Apenas após tais etapas é que normalmente ocorre a interpretação dos dados. Para dados de alta resolução, ou sísmica rasa devido ao seu baixo poder de penetração, entretanto, é comum a interpretação dos dados em sua forma bruta, sem qualquer tipo de tratamento pós-aquisição (Quinn et al., 1998). Ou seja, o bom imageamento de camadas e estruturas da subsuperfície proporcionado pela aplicação dos métodos sísmicos de alta resolução quase sempre permite boas análises, dispensando, portanto, qualquer tipo de processamento. Entretanto, devido a grande quantidade de ruídos apresentada em algumas seções, ou a perda elevada das amplitudes das reflexões com a profundidade torna-se justificável a aplicação de um fluxo de processamento contendo algumas das etapas básicas do processamento sísmico convencional, buscando, desta forma, melhor definição dos refletores e em consequência a melhoria da interpretabilidade da seção final. Apesar da ampla utilização dos dados em sua forma bruta, as poucas referências na literatura ao processamento sísmico dos dados de alta resolução mostraram um considerável progresso em relação à razão sinal/ruído, a continuidade lateral dos refletores e à atenuação das reflexões com a profundidade (Quinn et al., 1998; Gomes et al., 2010; Marino et al., 2012). É importante mencionar que os fluxos de processamento propostos por tais pesquisas foram desenvolvidos a partir das particularidades dos dados em estudo e de acordo com as necessidades apresentadas nas seções dos dados brutos, e, portanto, não coincidem entre si nas técnicas empregadas.

Pesquisas que busquem a otimização de dados oriundos das margens continentais brasileiras tornam-se justificáveis diante da importância destes ambientes como fonte de recursos minerais e energéticos (Kearey et al., 2002). Além disso, cerca de 70% da população mundial está concentrada em grandes cidades situadas na região costeira, o que demonstra a necessidade da utilização de tais áreas para a implantação de diversas estruturas ligadas à engenharia costeira. Entre tais estruturas destacam-se as pontes, portos, atracadouros, marinas, diversos tipos de dutos como gasodutos, oleodutos, emissários submarinos, etc.

Diante do crescente interesse e da evidente importância dos bens e serviços prestados pelas áreas marinhas rasas situadas nas adjacências das grandes cidades, a presente pesquisa tem como objetivo principal a organização de um fluxo de processamento básico para os dados de sísmica de reflexão de alta resolução obtidos originalmente para a caracterização de uma dutovia disposta na porção NW da Baía de Guanabara-RJ. Este fluxo busca a obtenção de perfis sísmicos com qualidade superior ao dado bruto, partindo do pressuposto de que apesar do dado de sísmica rasa apresentar bons resultados já em sua forma bruta, pode ter sua interpretabilidade aprimorada através da aplicação de algumas etapas do processamento sísmico convencional.

Diante do exposto, ressalta-se que o foco deste trabalho é utilizar as seções processadas para identificar tais tubulações e verificar se as mesmas estão enterradas nos sedimentos inconsolidados, ou se estão expostas ao nível do assoalho marinho. O processamento permite a observação mais nítida das hipérbolas de difração, que por sua vez ocorrem quando o perfil sísmico corta um duto. Os dutos aflorantes constituem um potencial risco socioambiental por extravasamentos causados por possíveis rompimentos, sendo, portanto de essencial importância caracterizar espacialmente tais estruturas.

Para tanto foram instituídos os seguintes objetivos específicos:

- * Testar diversas técnicas comumente aplicadas no processamento sísmico convencional aos dados de sísmica (e.g. edição de traços; silenciamento da coluna d'água; análise espectral e correção das amplitudes; filtragem de frequências; migração; deconvolução);
- * Verificar a eficiência das técnicas aplicadas em termos de melhorias no aspecto visual da seção, na razão sinal ruído, e na definição dos refletores de interesse;
- * Empregar as técnicas para a elaboração de um fluxo de processamento básico único;
- * Demonstrar a aplicabilidade do processamento sísmico aos dados de alta resolução a partir de comparações com os dados brutos;
- * Utilizar os perfis sísmicos processados da região de estudo para identificação dos diversos dutos que caracterizam a dutovia investigada.

CAPÍTULO 2

Dados sísmicos

A sísmica de reflexão representa o método geofísico mais utilizado na prospecção marinha devido ao seu alto poder de resolução da subsuperfície dos oceanos (Souza, 2006). Em geral, este método consiste na geração artificial de ondas acústicas para a posterior identificação dos tempos de retorno através da distribuição da velocidade de propagação. A partir de então é possível determinar as interfaces onde as ondas acústicas sofreram reflexão e/ou refração, fornecendo, portanto, informações sobre a disposição estrutural das camadas sedimentares, de parâmetros como espessura, mergulho, falhas, e presença de estruturas.

Neste capítulo serão discutidos, de maneira sucinta, os aspectos relacionados à teoria de propagação das ondas acústicas em meios elásticos. Em seguida serão feitas algumas considerações acerca das particularidades dos dados sísmicos de alta resolução, os principais tipos de sistemas de aquisição utilizados para coleta destes dados e suas diversas aplicações. Além disso, serão destacadas algumas peculiaridades do levantamento e dos próprios dados utilizados na presente pesquisa.

2.1 Teoria da sísmica de reflexão

Em meios isotrópicos, as ondas acústicas viajam segundo o princípio de *Fermat*, do percurso de tempo mínimo, e se propagam tridimensionalmente com forma esférica segundo o princípio de *Huygens*. Este princípio descreve cada ponto localizado na frente de onda como uma fonte pontual de emissão de novas ondas acústicas, que também se propagam de maneira esférica. Este processo de expansão se repete ao longo do tempo, caracterizando a propagação da energia mecânica (cinética e potencial), na direção normal à frente de onda, através do movimento de partículas em um meio elástico, sem transportar a matéria. A velocidade de propagação das ondas acústicas nos sedimentos do fundo oceânico é influenciada pela porosidade, mineralogia, densidade, pressão, temperatura e conteúdo de fluidos. Ou seja, essa velocidade de propagação é função das constantes elásticas do meio (e.g. módulos de *Young*, *Poisson*, de rigidez e de compressão), que relacionam a quantidade de deformação sofrida por um material em função da força exercida sobre este.

As velocidades de propagação das ondas P (longitudinais ou compressionais) e S (transversais

ou cisalhantes) são definidas segundo as equações (Schon, 1996):

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4\mu}{3}}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Onde

V_p - velocidades das ondas P;

V_s - velocidades das ondas S;

K - Módulo de compressibilidade;

μ - Rigidez do meio;

ρ - Densidade do meio;

Para meios líquidos o módulo de rigidez é igual a zero, impossibilitando, segundo a equação acima, a propagação das ondas S nestes meios. Na água do mar as ondas sonoras (ondas P) se propagam com velocidade em torno de 1500 m/s, pouco variando em função da salinidade, temperatura e pressão (Woods, 1991). Ainda segundo este autor, os fatores que controlam os módulos de compressibilidade e rigidez, relacionados na equação acima, para os sedimentos inconsolidados do assoalho oceânico, são porosidade, pressão de confinamento, grau de saturação e rigidez. É importante mencionar que os sedimentos marinhos inconsolidados são materiais contendo mais de uma fase (sólida e líquida), sendo, portanto, suas propriedades elásticas medidas em função das propriedades de seus constituintes, relativo à sua presença e volume. Em geral as velocidades das ondas P podem variar de 800 m/s em sedimentos marinhos superficiais saturados com gás, a 4000 m/s em rochas sedimentares profundas.

A velocidade de propagação das ondas acústicas dependem, portanto, das propriedades inerciais e elásticas do meio. Um sinal acústico emitido ao atingir uma interface entre dois meios de diferentes propriedades físicas pode sofrer diferentes fenômenos, como: reflexão, refração, espalhamento absorção, entre outros. As propriedades destes dois meios e o ângulo de incidência da onda determinam quantidade de energia que é refletida, refratada, absorvida (em forma de calor), ou transformada em outras ondas.

A lei de Snell descreve os fenômenos de reflexão e refração a partir da relação entre os senos dos ângulos de incidência e reflexão/refração, e as velocidades de propagação nos meios, segundo a equação:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.3)$$

Onde

θ_1 - ângulo de incidência

θ_2 - ângulo de reflexão/refração

v_1 - velocidades de propagação da onda acústica no meio 1

v_2 - velocidades de propagação da onda acústica no meio 2

A reflexão, fenômeno de maior interesse na sismica rasa, acontece quando o sinal sísmico atinge uma interface entre matérias contendo impedâncias acústicas distintas.

A quantidade de energia refletida é função da interação complexa entre diversos fatores, entretanto, uma boa aproximação pode ser feita para ângulos de incidência normal à superfície refletora. Para estes casos o coeficiente de reflexão pode ser calculado a partir da equação (Sharma, 1997):

$$R_c = \frac{A_r}{A_i} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (2.4)$$

Onde

A_r - amplitude do sinal refletido;

A_i - amplitude do sinal incidente;

P_1 - densidade do meio 1

P_2 - densidade do meio 2

Ou seja, o coeficiente de reflexão depende do contraste de impedância acústica entre os meios 1 e 2, e determina a quantidade de energia que é refletida. A impedância acústica constitui-se, portanto, como fundamental propriedade do meio quando se trata de aquisição de dados sísmicos, sendo definida matematicamente como o produto entre a densidade e a velocidade de propagação do som no meio.

De maneira geral nos levantamentos marinhos o registro sísmico é gerado a partir do tempo de trânsito do sinal sísmico emitido próximo à superfície do mar e refletido nas interfaces entre os meios de propriedades distintas, compreendendo o tempo de percurso da onda entre a fonte e o receptor. No caso específico do registro sísmico utilizado na presente pesquisa, a distância entre a fonte e o receptor é mínima (aproximadamente um metro), pois o equipamento utilizado foi um perfilador de subfundo compacto composto por unidades de transmissão e recepção (monoestático). Neste tipo de levantamento, devido a este offset

mínimo, o registro sísmico é caracterizado pelo tempo duplo de incidência normal. A seguir serão feitas algumas considerações a respeito das particularidades dos sistemas de aquisição sísmica marinha rasa.

2.2 Sísmica de alta resolução

A sísmica de alta resolução utiliza os mesmos princípios da sísmica convencional, explanados sucintamente no subitem anterior. Em outras palavras, a sísmica rasa também explora o fato das ondas acústicas se propagarem com velocidades distintas em tipos de materiais diferentes para localizar as interfaces onde as ondas são refletidas a partir do registro do tempo de trânsito das ondas sonoras. Em geral os sistemas sísmicos de alta resolução compreendem métodos que investigam meios de baixos contrastes de impedância acústica e baixa razão sinal/ruído. Somado a isso, tem-se as altas taxas de atenuação dos sinais de alta frequência, restringindo a aplicação destes métodos à alvos em pouca profundidade (Quinn et al., 1998).

A principal diferença entre diversos tipos de sistemas sísmicos está associada às características do sinal emitido (Trabant, 1984). No caso da sísmica rasa este sinal possui espectro associado a altas frequências, o que desencadeia na aquisição de registros com alta resolução espacial quando comparado aos dados da sísmica convencional. Entretanto, este ganho de resolução é compensado por uma alta taxa de atenuação, tanto em profundidade, como ao longo do tempo. O emprego de um espectro contendo altas frequências limita a utilização da sísmica de alta resolução para apenas algumas dezenas de metros abaixo do assoalho marinho, devido ao alto poder de absorção da Terra. Em geral quanto mais alto for o espectro de frequência de um sinal acústico maior a atenuação sofrida por ele, e menor sua penetrabilidade em subsuperfície (Bull et al., 1998a).

Outra diferença marcante entre as fontes acústicas convencionais e rasas refere-se à faixa de energia do sinal emitido, sendo esta determinada, principalmente, pela profundidade de investigação pretendida. Quanto mais profundo a aplicação desejada, maior a energia do sinal requerida.

Entre as vantagens da utilização da sísmica rasa destacam-se as altas taxas de aquisição de dados em um curto período de tempo, e a possibilidade de obtenção de perfis sísmicos no campo e em tempo real que se assemelham muito com uma seção geológica. Além disso, alguns sistemas de alta resolução são capazes de localizar refletores da ordem de centímetros, sem a necessidade de grandes contrastes de impedância acústica para isso (Bull et al., 1998a). Estas características conferem aos sistemas de aquisição sísmica marinha de alta resolução a aplicabilidade em diversos seguimentos da pesquisa e da indústria de extração de recursos minerais e energéticos.

Existem vários tipos de sistemas de aquisição sísmica marinha rasa, cada um contendo diferentes sistemas de aquisição de dados, fontes acústicas, espectros de frequências, receptores, etc. A seguir é feita uma breve descrição dos principais tipos de sistemas de aquisição sísmica marinha rasa.

2.3 Sistemas de aquisição sísmica marinha

Segundo classificação desenvolvida por (McGee, 1995) existem dois tipos principais de fontes acústicas para a aquisição de dados sísmicos marinhos: as impulsivas e as ressonantes.

As ressonantes caracterizam-se por gerar pulsos senoidais de forma conhecida, altamente repetitivos, originados a partir da frequência de ressonância de pastilhas piezelétricas. Ou seja, estas fontes utilizam a eletricidade para gerar um trabalho mecânico proporcional ao campo elétrico aplicado, resultando em sinais acústicos de alta repetitividade, amplo espectro, altas frequências, mas com a potência de emissão dos sinais limitada.

Ecobatímetros de alta frequência, sonar de varredura lateral, e sistemas *Chirp* representam exemplos de sistemas de aquisição marinha rasa que utilizam fontes do tipo ressonantes para a geração dos sinais acústicos. Segundo Trabant (1984), entre as vantagens da utilização de fontes ressonantes destacam-se a facilidade operacional, devido ao pequeno porte dos equipamentos, alta taxa de repetibilidade, alta razão sinal/ruído e baixo custo de manutenção. Em geral, tais fontes possuem frequência entre 0,5 e 20 kHz, penetração inferior a 30 metros e uma resolução na ordem dos centímetros. São aplicados a pequenos alvos localizados a poucos metros do subfundo, normalmente ligados a temas como a geodinâmica costeira, classificação do sedimento do fundo, estudos de impactos ambientais, arqueologia e colocação/avaliação de estruturas ligadas à engenharia costeira.

Por outro lado as fontes acústicas impulsivas caracterizam-se por liberar uma grande quantidade de energia instantaneamente. Segundo Mosher e Simpkin (1999) podem ser subdivididas em fontes de aceleração de massa, explosivas ou implosivas. As fontes de aceleração de massa utilizam uma descarga elétrica acumulada em um capacitor para gerar uma vibração no conjunto mola /placa que desencadeia um deslocamento de massa d'água. O sinal gerado possui alta potência e amplo espectro de frequência, resultando em registros sísmicos com boa penetração e qualidade (Souza, 2006). *Boomers* são exemplos de sistemas de aquisição sísmica rasa que utilizam fontes impulsivas de aceleração de massa. Em geral os sinais possuem espectro de frequências entre 1 e 5 kHz, resolução entre 0,5 e 1 metro e penetração máxima de 100 metros. São comumente empregados na estratigrafia, na localização de estruturas geológicas ou artificiais e avaliação da profundidade do embasamento.

As fontes do tipo explosivas utilizam dinamites, gás, espoletas elétricas para criar ondas acústicas de alta energia e amplos espectros de frequência na coluna d'água. Entre os mais

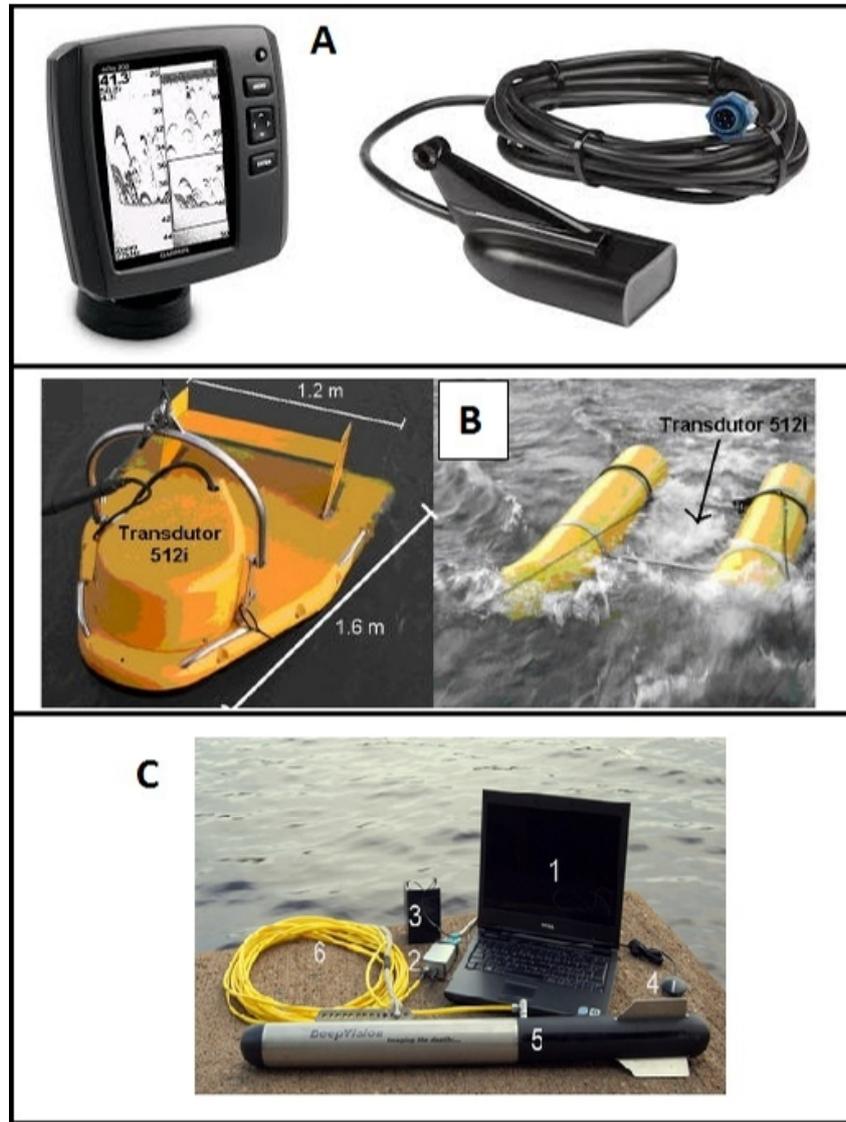


Figura 2.1: Exemplos de sistemas de aquisição sísmica marinha rasa com fontes ressonantes. a) Ecobatímetro modelo *Garmin Fishfinder Eco 200*; fonte: <http://continuouswave.com/> acessado em 29/09/2014; b) À esquerda, perfilador de subfundo modelo *Edge Tech SB-512i* do tipo *Chirp*; à direita estrutura contendo os flutuadores, onde o transdutor é acoplado; fonte Souza (2006); c) Sonar de varredura lateral modelo *Towfish DE340*, e componentes necessários para a aquisição em campo; fonte <http://www.hydrosurvey.cn/>, acessado em 29/09/2014.

comuns destaca-se o sparker. Este equipamento utiliza uma descarga elétrica em um meio condutor para gerar uma bolha de vapor que em rápida expansão cria um impulso positivo. Este impulso ao se propagar na coluna d'água gera o sinal sísmico de interesse com frequências menores que 1 kHz, penetração na ordem de centenas de metros e resolução de 2 metros aproximadamente. Estas fontes são normalmente empregadas em investigações a respeito da

estratigrafia, geologia estrutural e estudo de reservatórios.

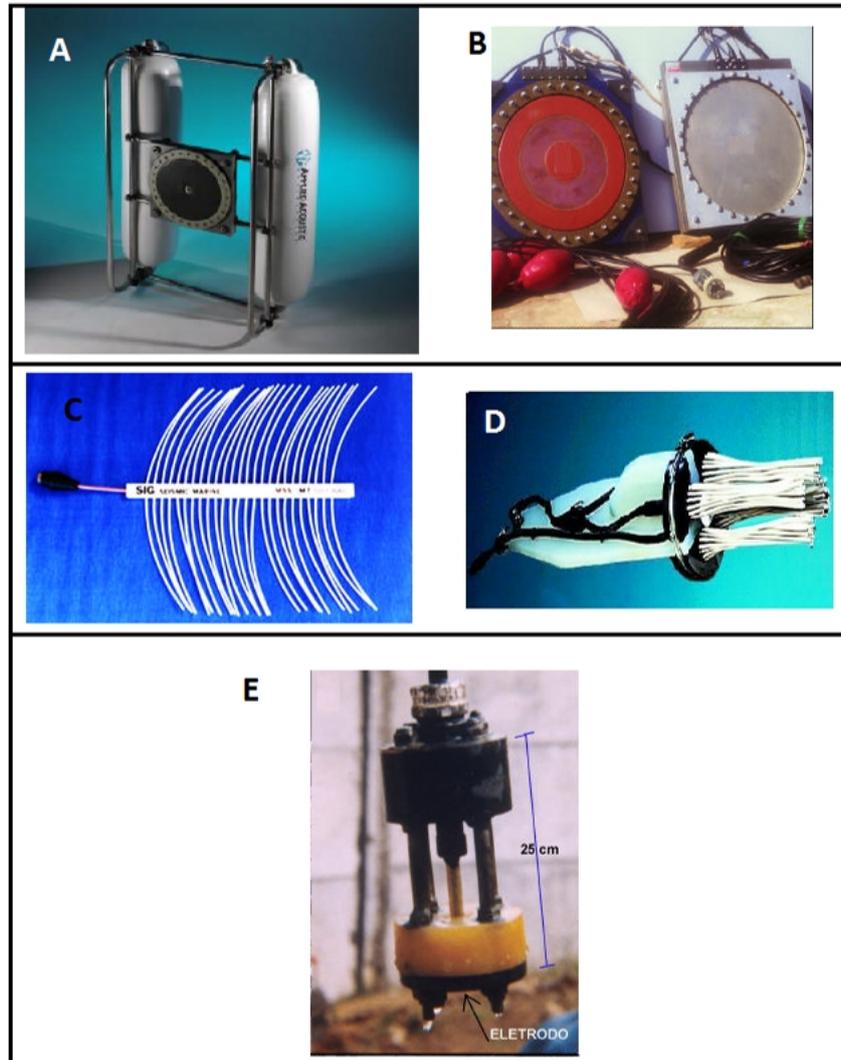


Figura 2.2: Exemplos de sistemas de aquisição sísmica marinha rasa com fontes impulsivas. a) Fonte acústica do tipo *Boomer*, modelo AA 200 da *Applied Acoustic Engineering* acoplada à flutuadores a serem rebocados na popa da embarcação; b) Exemplos de placas de *Boomers* modelos ED-5 e ED-10; c) Fonte acústica do tipo *Sparker*, modelo ELC820 da SIG; d) *Sparker* modelo *Squid 500* da *Applied Acoustic*; e) *Sparker* de pequeno porte pertencente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT fonte Souza (2006).

As fontes impulsivas do tipo implosivas são caracterizadas, segundo Mosher e Simpkin (1999), por utilizar ar comprimido para gerar a implosão de uma bolha preenchida pelo vácuo, que por sua vez desencadeia uma onda de pressão na coluna d'água. Essas fontes não são utilizadas em investigações rasas, pois possuem sinal sísmico de alta energia e baixo

conteúdo de frequências, sendo, normalmente empregados em investigações mais profundas. *Vaporchoc*, *flexichoc* e *waterguns* representam alguns exemplos deste tipo de fonte.

Os princípios envolvidos para a geração das ondas sonoras, assim como os principais componentes dos sistemas de aquisição sísmica marinha rasa foram abordados sucintamente nesta seção. A seguir expõe-se um diagrama demonstrando os espectros de frequência, energias das fontes e as respectivas profundidades de investigação dos principais sistemas de aquisição sísmica marinha rasa.

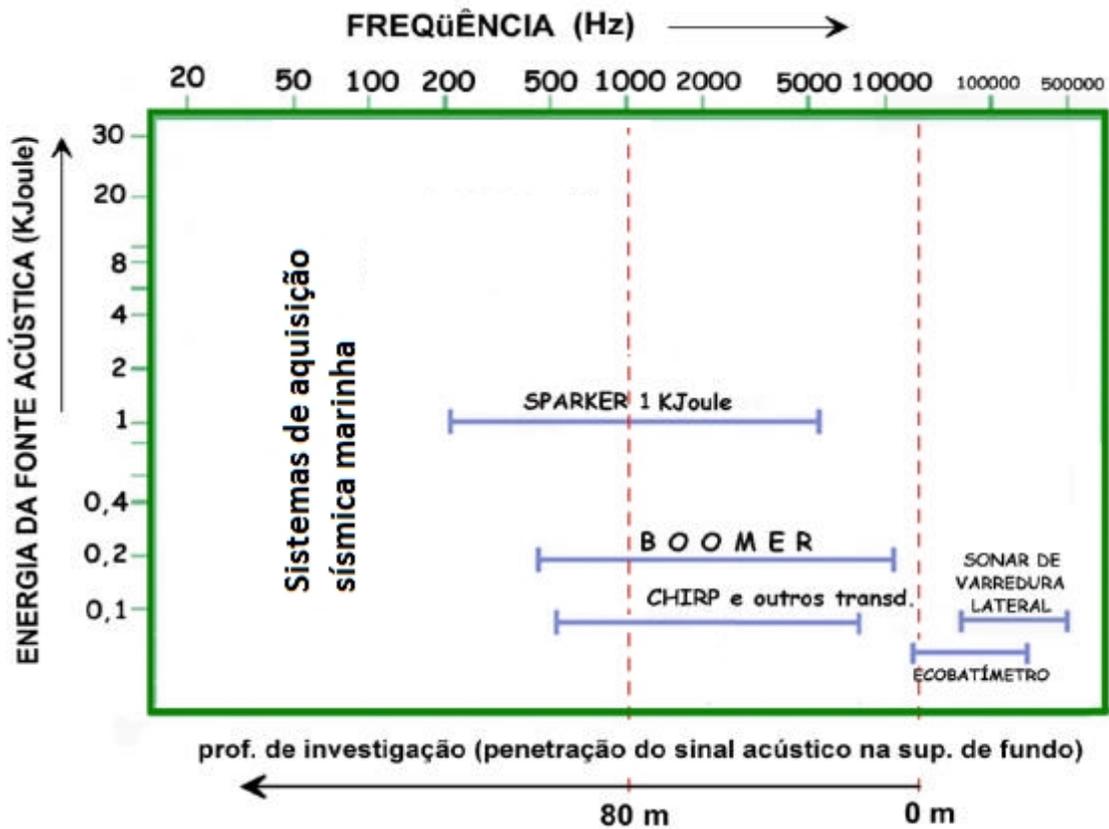


Figura 2.3: Diagrama ilustrativo dos espectros de frequência emitidos, das energias das fontes e das profundidades de investigação dos principais sistemas de aquisição sísmica marinha rasa. Fonte: modificado de Trabant (1984).

2.4 Levantamento dos dados

Na presente pesquisa foram utilizados dados de sísmica de alta resolução adquiridos a partir de um sistema de perfilador de subfundo do tipo *Chirp*. Este equipamento é monoestático, ou seja, composto pelas unidades de transmissão e recepção em um único corpo, o que facilita a logística da aquisição e proporciona o levantamento de dados em áreas rasas, como foi o caso da presente pesquisa. É importante mencionar que o tamanho e peso destes equipamentos

são consideravelmente menores quando comparados aos equipamentos utilizados na sismica marinha convencional.

O perfilador de subfundo utilizado é composto por projetores e hidrofones posicionados abaixo de um defletor acústico. A fonte, enquadrada no tipo ressonante, é capaz de operar no espectro de frequência de 0,5 a 20 kHz, com baixa potência, penetração inferior a 50 metros, e resolução espacial na ordem dos centímetros. O sistema de sonar emite pulsos cuja forma da onda é controlada de maneira bastante precisa, gerando sinais compensados em fase e amplitude, altamente repetitivos (Quinn et al, 1998). Ainda segundo estes autores, a utilização de um sinal com características da assinatura da fonte bem conhecidas representa uma das grandes vantagens dos sistemas *Chirp*. Além disso, a forma do sinal emitido é ponderada no domínio da frequência para possuir uma distribuição Gaussiana ao redor da frequência central.

O levantamento sísmico marinho que originou os dados da presente pesquisa foi executado a partir de uma embarcação, cujo casco foi utilizado para a implantação da unidade mono-estática do sistema *Chirp*. A embarcação se desloca ao longo de uma linha preestabelecida executando uma perfilagem sísmica contínua, o que permite a obtenção em tempo real de uma seção sísmica muito parecida com uma seção geológica, ao contrário do levantamento em terra que apresenta diversos obstáculos para o progresso da aquisição (Souza, 2006). O sistema utilizado possui offset entre fonte- receptor próximo de 1 metro. Devido a esse offset mínimo, o registro sísmico deste tipo de equipamento é caracterizado pelo tempo duplo de incidência aproximadamente normal (figura 2.3).

Durante a aquisição dos dados utilizados a presente pesquisa, foram desenvolvidas perfilagens sísmicas contínuas ao longo de 18 linhas com direção perpendicular às estruturas artificiais de interesse, com intervalo de amostragem de 92 μ s. A localização, sentido e comprimento das seções sísmicas podem ser visualizados nas imagens aéreas das figuras 2.5 e 2.6.

Durante o levantamento, objetivou-se localizar os diversos dutos que conectam a região da ilha do Governador ao continente, caracterizando, portanto, uma dutovia disposta na região noroeste da Baía de Guanabara-RJ, próxima à desembocadura do rio Sarapuí. A aquisição dos dados foi exercida em um ambiente raso, menos de 10 metros de profundidade, cuja composição sedimentar é predominantemente lama e argila. É importante mencionar que a pouca lâmina d'água apresentada impossibilitou o desenvolvimento da perfilagem sísmica contínua em parte da região de estudo, planejada inicialmente para ser contemplada pela aquisição sísmica (figura 2.7).

Outro aspecto importante a ser destacado refere-se à boa visualização dos dutos oferecida pela seção em sua forma bruta (figura 2.8). Nesta figura observam-se, além dos dutos aflorantes, diversas hipérbolas de difração representativas dos dutos que foram soterrados nos primeiros metros de sedimentos inconsolidados.

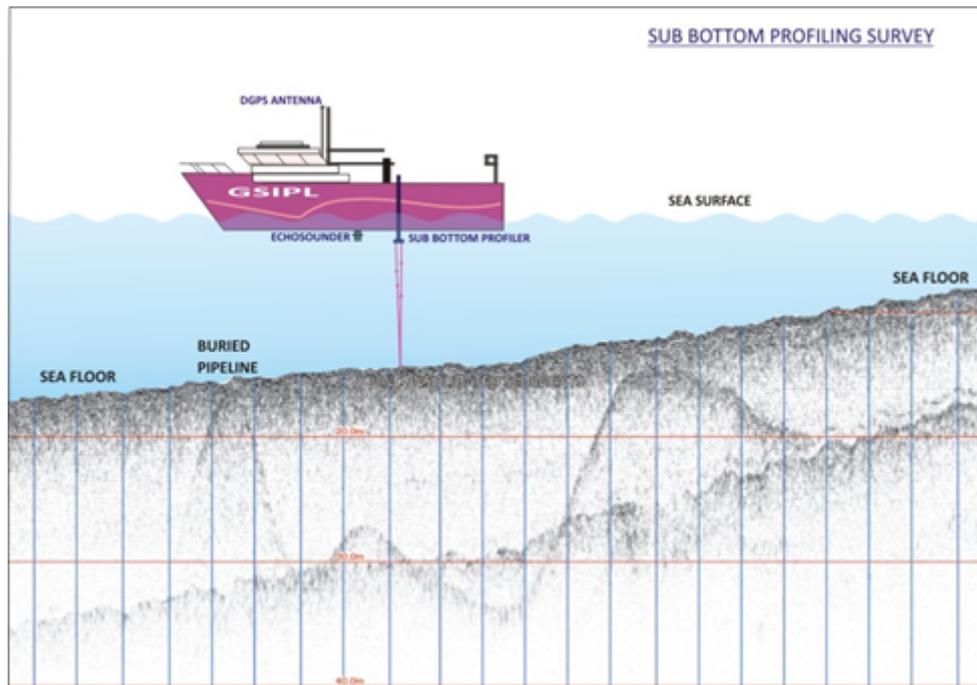


Figura 2.4: Esquema ilustrativo da perfilagem sísmica contínua; abaixo um exemplo de perfil sísmico obtido em tempo real. Fonte geostar-surveys.com/. Acessado em 22/09/2014.

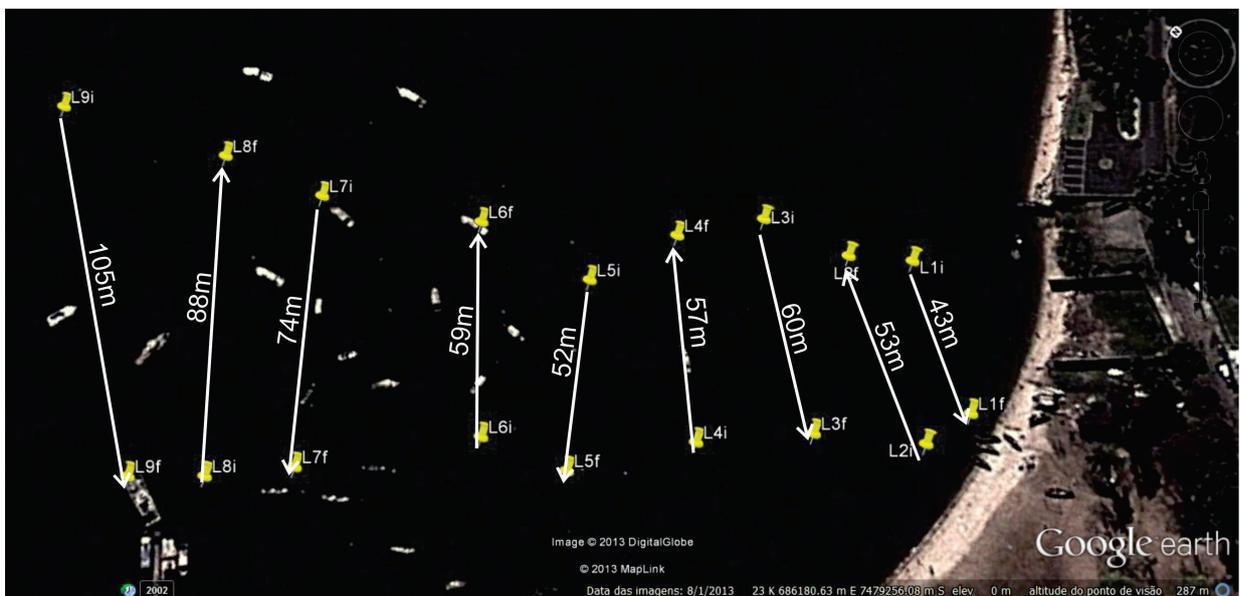


Figura 2.5: Imagem de satélite mostrando a localização, sentido de aquisição e comprimento das linhas sísmicas 1 a 9.

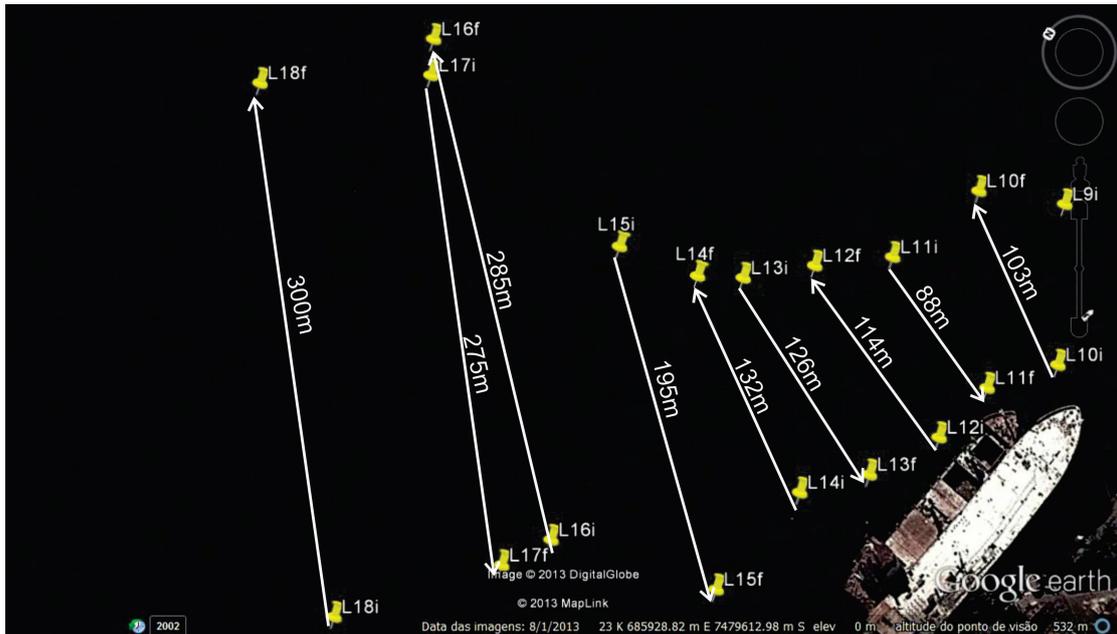


Figura 2.6: Imagem de satélite mostrando a localização, sentido de aquisição e comprimento das linhas sísmicas 10 a 18.

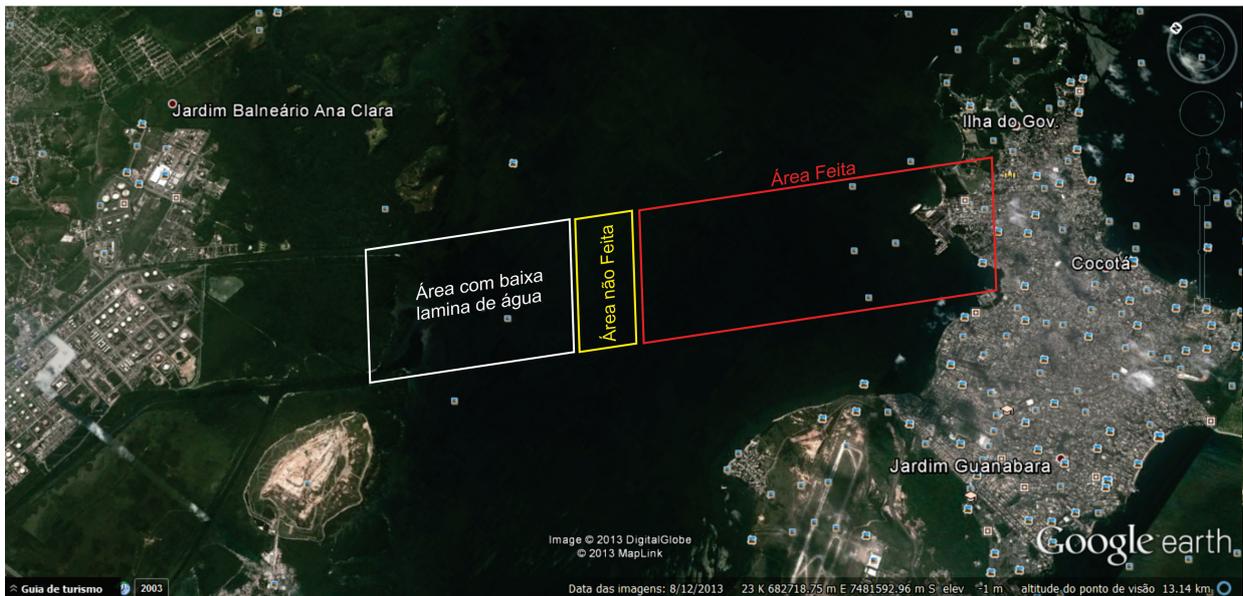


Figura 2.7: Imagem aérea evidenciando a região do levantamento dos dados.

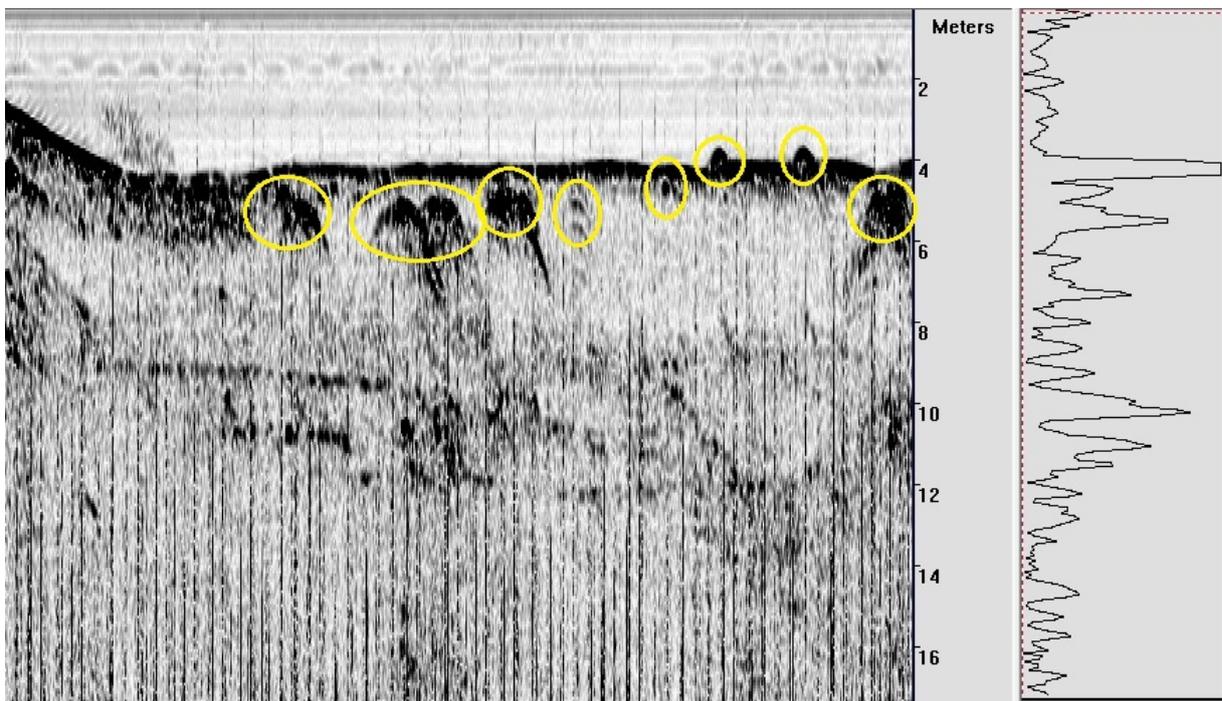


Figura 2.8: Imagem do perfil bruto (linha 10) escolhido para ser submetido ao fluxograma de processamento. Em amarelo destacam-se as estruturas de interesse (dutos).

CAPÍTULO 3

Fluxograma de processamento básico

Conforme foi informado anteriormente, OS dados de sísmica rasa constituem seções sísmicas de afastamento nulo e, portanto, são comumente interpretados sem a obrigatoriedade do processamento sísmico CMP convencional, valendo destacar à sua boa qualidade mesmo em sua forma bruta (figuras 2.8 e 3.2). Entretanto, as poucas pesquisas que objetivaram aplicar algum processamento nestes dados demonstraram fornecer uma considerável melhoria na seção sísmica, devido as diversas etapas do processamento. Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às etapas do processamento dos dados de *Chirp* da Baía de Guanabara-RJ, sistematizando os fundamentos teóricos abordados em cada uma destas etapas. Para isso, o método utilizado para a apresentação dos resultados consiste, basicamente, na exposição do perfil sísmico selecionado (linha sísmica 10) em diferentes estágios que compõe a sequência de processamento, evidenciando as alterações sofridas pela seção em cada um destes estágios através de análises complementares.

A aplicabilidade do fluxo proposto é testada posteriormente em três outros perfis (linhas sísmicas 9, 11 e 13) expostos em suas formas brutas e processadas. A partir de então, as seções processadas foram utilizadas para a identificação e classificação dos dutos de acordo com sua localização, se soterrados ou aflorantes.

O *software* utilizado para o processamento foi o *ReflexW 6.0* (de autoria de *K. J. Sandmeier*), mais especificamente o módulo *2D-Data Analysis*. É importante mencionar que a proposta de um fluxo de processamento básico com o mínimo de interferência no dado original caracteriza um dos objetivos deste trabalho. As explicações matemáticas referentes às distintas etapas serão abordadas apenas de maneira sucinta. Ressalta-se que este fluxo de processamento objetivou a melhoria na definição dos eventos e refletores de interesse, sendo estes eventos indicativos dos diversos dutos que compõe a dutovia investigada, em detrimento dos aspectos relacionados à geologia da área

A seguir expõe-se o esquema do fluxograma de processamento proposto.

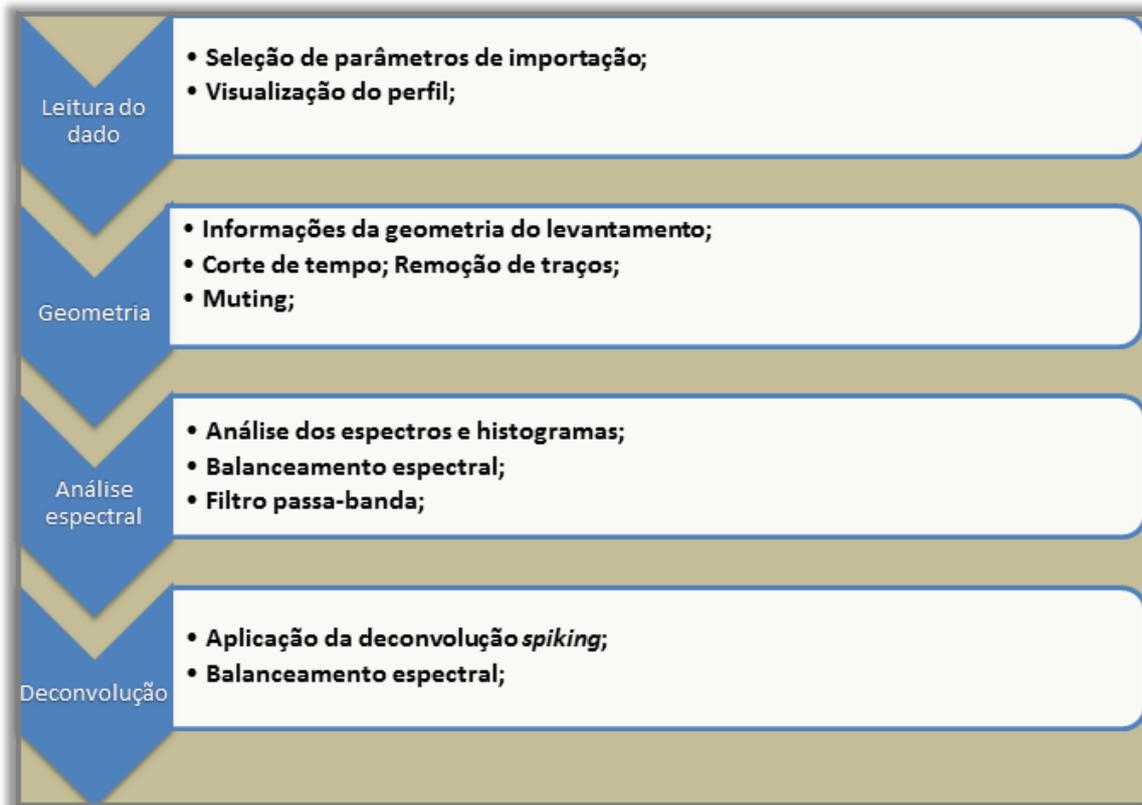


Figura 3.1: Fluxograma de processamento evidenciando as principais operações de cada etapa.

3.1 Leitura do dado

Os dados obtidos pelo sistema de aquisição sísmica marinha rasa (tipo *Chirp*) foram gravados no formato SEG Y. Este formato, estabelecido pela *Society of Exploration Geophysicists* (SEG), representa o padrão dos dados sísmicos utilizados tanto na indústria, como na pesquisa (Souza, 2006). Tais dados são constituídos de quatro componentes: (1) cabeçalho tipo EBCDIC contendo informações gerais sobre o perfil do registro ; (2) *bin header* com importantes informações acerca dos dados; (3) *trace header* com as informações a respeito da geometria da aquisição de cada traço; e (4) o dado sísmico.

Para a importação de dados para o ambiente interno do *ReflexW* é necessário, primeiramente a criação do diretório do projeto, contendo os dados brutos a serem submetidos ao processamento (*Project>ProjectDirectory*). A partir de então, deve-se abrir o módulo usado para o processamento (*Modules>2D-DataAnalysis*) para a importação do dado bruto no formato SEG Y, e consequente transformação para o formato interno do programa. Este novo arquivo, formato DAT, é alocado na pasta ROHDATA, criada automaticamente pelo programa, e disposta no diretório do projeto.

Na janela de importação devem ser determinadas algumas entradas referentes às características dos dados, tais como: formato do dado de entrada (SEG Y), tipo do dado (*offset* constante), dimensões de tempo (μs) e de espaço (metro), direção do perfil, etc. A seleção correta destes atributos é de essencial importância para o fluxo, pois um equívoco nesta

etapa comprometeria todas as etapas subsequentes do processamento. Ao importar o dado em formato SEG Y, o *software* gera automaticamente um arquivo em formato interno do módulo *2D-Data Analysis*, que pode ser facilmente plotado na janela do programa em qualquer etapa do processamento. Além disso, o programa cria um relatório em um arquivo de texto contendo algumas informações do cabeçalho do dado importado.

Após a importação, com a opção *PrimaryFile* ativada, o dado é plotado automaticamente na janela principal do programa. A partir de então é possível a manipulação do dado através da janela de opções de plotagem (*Plot>Options*). Nesta janela é possível a aplicação de ganhos, mudança na palheta de cores, no enquadramento, no modo de visualização dos dados (*wiggle* ou interpolado), na escala, no preenchimento, se positivo ou negativo, etc. A aplicação de operações ainda nesta etapa do processamento busca uma melhor visualização inicial dos dados, pois tais alterações não são permanentes, e não são criados novos arquivos de dados contendo as alterações desenvolvidas até então.

O perfil sísmico plotado na figura 3.2 representa a forma bruta do dado, com opções de visualização em modo interpolado de pixels por amostra, com zoom de 1,4 no eixo x e paleta de cores do programa (*Gray2*). É importante mencionar que já em sua forma bruta, os dados sísmicos de alta resolução foram capazes de indicar as estruturas artificiais que representaram o objeto de interesse durante o levantamento sísmico. Estas diversas estruturas, indicadas pelas setas azuis correspondem à dutos ou tubulações que fazem parte de uma dutovia que conecta a Ilha do Governador ao continente. Seus diversos dutos estão dispostos sobre o assoalho marinho, ou soterrados nos primeiros metros de sedimentos inconsolidados, indicados pelas diversas hipérbolas de difração.

Um aspecto importante a ser destacado é a importância da informações sobre os dutos estarem soterrados ou não, pois os dutos aflorantes, ou seja, dispostos sobre o assoalho marinho constituem um risco ambiental em potencial. Este risco deve-se ao fato de que diferentes equipamentos utilizados por diversos tipos de embarcação para a ancoragem, como poitas, garatéias e âncoras podem facilmente se prender nos dutos expostos e rompê-los com a força de arraste da maré. Exemplos como este já ocorreram na Baía de Guanabara - RJ, desencadeando grandes desastres naturais através do vazamento de substâncias tóxicas (e.g. óleos).

A melhoria na visualização de tais dutos nas seções sísmicas caracteriza um dos principais objetivos do processamento desenvolvido nesta pesquisa. As informações geológicas passíveis de serem adquiridas através da aplicação da sísmica rasa, não representam o objetivo maior da presente pesquisa, não sendo realizado uma interpretação sedimentológica a partir das seções geradas pelo processamento dos dados.

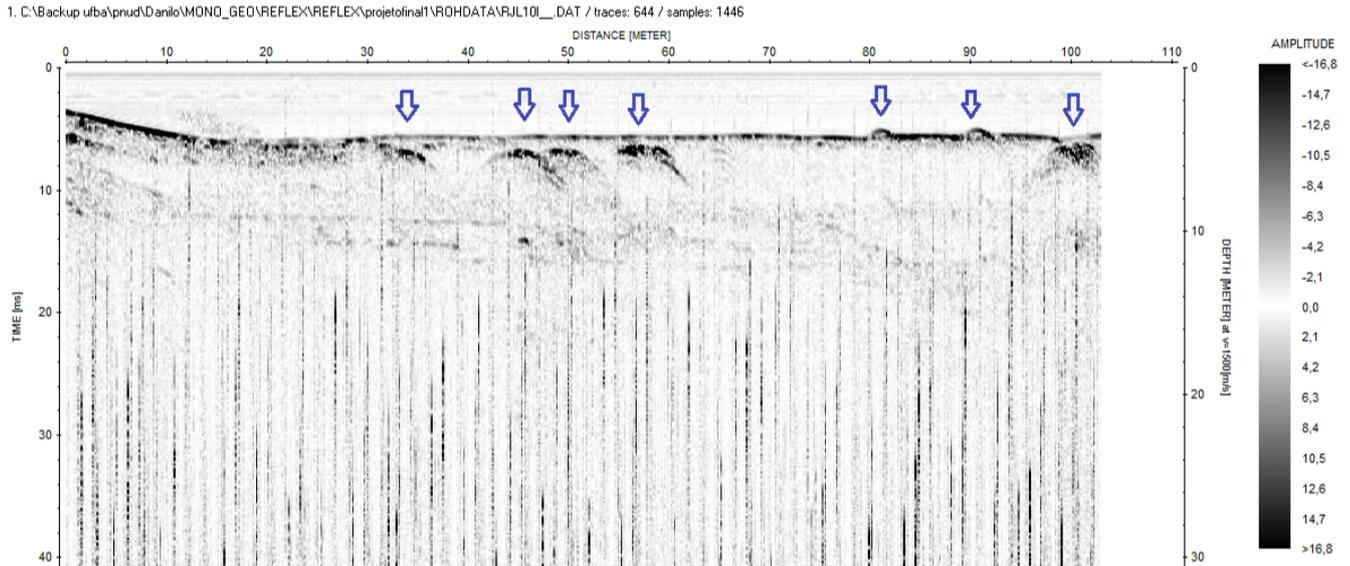


Figura 3.2: Perfil sísmico bruto importado para o módulo 2D-Data analysis. Em azul destacam-se os dutos, objeto de interesse durante a aquisição dos dados e da presente pesquisa.

3.2 Geometria

O próximo passo consiste na verificação e correção das informações contidas no *header* dos dados referentes à geometria do levantamento. É importante lembrar que a geometria é intrínseca ao tipo de levantamento sísmico e à configuração fonte-receptor, que no caso de dados de *Chirp*, estão dispostas no mesmo equipamento monoestático. Ou seja, o *offset* entre fonte-receptor deste tipo de equipamento é mínimo, o que caracteriza o registro sísmico a partir do tempo duplo de incidência normal (Quinn et al., 1998).

As informações da geometria do levantamento são inseridas no cabeçalho dos traços no início do processamento, permitindo a realização das etapas subsequentes do fluxo. Segundo Bruneta (2005), pequenos equívocos na geometria do dado podem comprometer o processamento, devido ao acúmulo de imprecisões nas informações.

Dados referentes às coordenadas geográficas do sistema fonte-receptor, identificação sequencial do traço, número da linha, número de traços e de amostras, distância entre traços, e elevações são algumas das informações contidas *header* que podem ser inseridas nesta etapa. No caso específico dos dados utilizados nesta pesquisa, notou-se que alguns dos parâmetros de aquisição não estavam corretamente representados no *header*. Sendo assim, foi necessário adicionar manualmente valores referentes às coordenadas (valores em X e Y) do início e fim dos perfis. Estas informações foram utilizadas para atualizar os cabeçalhos dos traços, que, juntamente com informações referentes aos tempos de registro, foram usadas para calcular a distância entre os traços (*trace increment*) (figura 3.3).

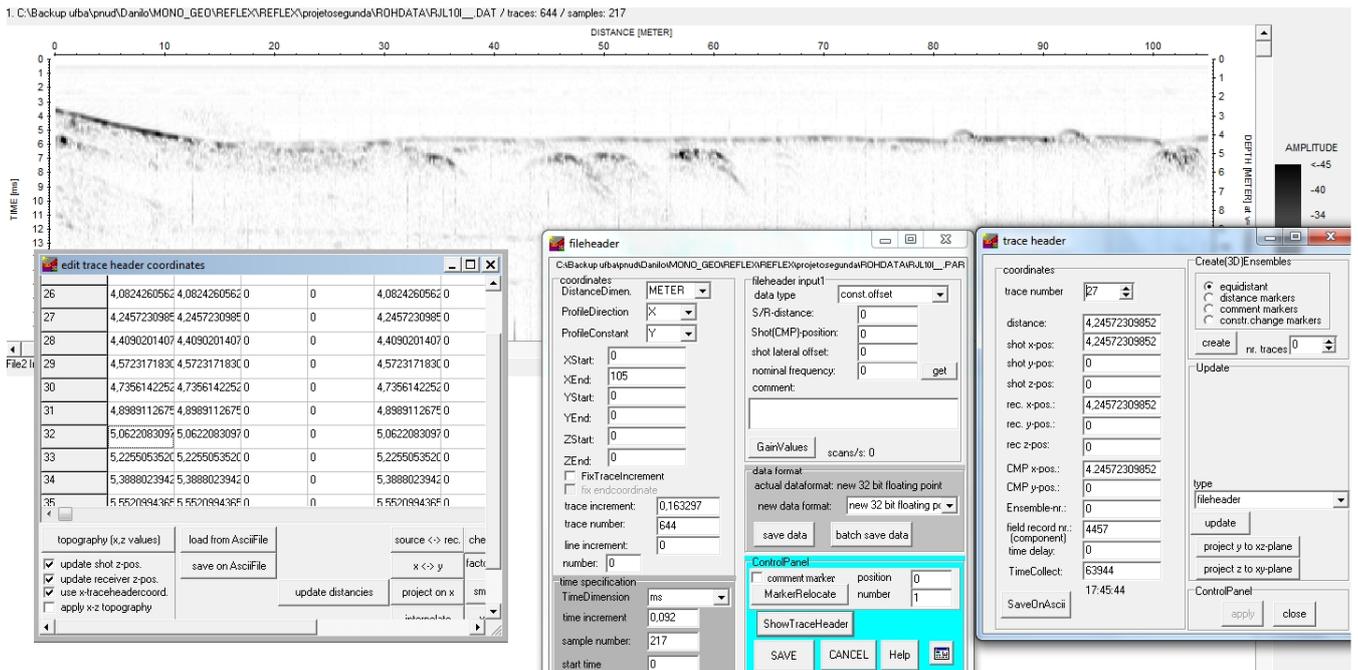


Figura 3.3: Interface do módulo 2D-Data Analysis mostrando da esquerda para a direita a tabela de cabeçalho dos traços, e os Menus de edição dos cabeçalhos do perfil e dos traços.

Antes de iniciarmos as correções da geometria da aquisição foi necessário submeter o perfil escolhido a uma operação de inversão no sentido do levantamento, buscando uma padronização entre todos os perfis. Esta operação pode ser efetuada a partir da função *XFlipProfile* disposta no *Menu Processing>Trace Interpolation/Resorting*.

Para o perfil 10 o intervalo de amostragem foi de $92 \mu\text{s}$, a distância entre os traços foi estimada em torno de 0,16 metros, sendo 1446 o número de amostras e 644 o número de traços, distribuídos ao longo de 103 metros de linha sísmica.

É importante mencionar que no cálculo do incremento do traço, desenvolvido automaticamente pelo software *ReflexW*, assume-se que a velocidade do barco é constante, quando na realidade ocorrem variações ao longo do tempo. Isto introduz um erro no cálculo que pode acarretar em variações de distância entre os traços ao longo do perfil (Gomes et al., 2010).

Algumas operações complementares podem ser desenvolvidas ainda nesta etapa do processamento. A primeira operação escolhida foi a remoção de parte da seção, devido ao fato do registro sísmico apresentar escala do eixo de tempo elevada, apesar da informação de interesse estar restrita aos primeiros metros da subsuperfície. Além disso, esta operação diminui o tempo de processamento, e o custo operacional de todas as etapas subsequentes. A operação de corte de tempo pode ser realizada através da função *Time cut*, disposta no *Menu Processing>Static Correction*. No caso do perfil 10, o tempo de corte escolhido foi de 20 ms.

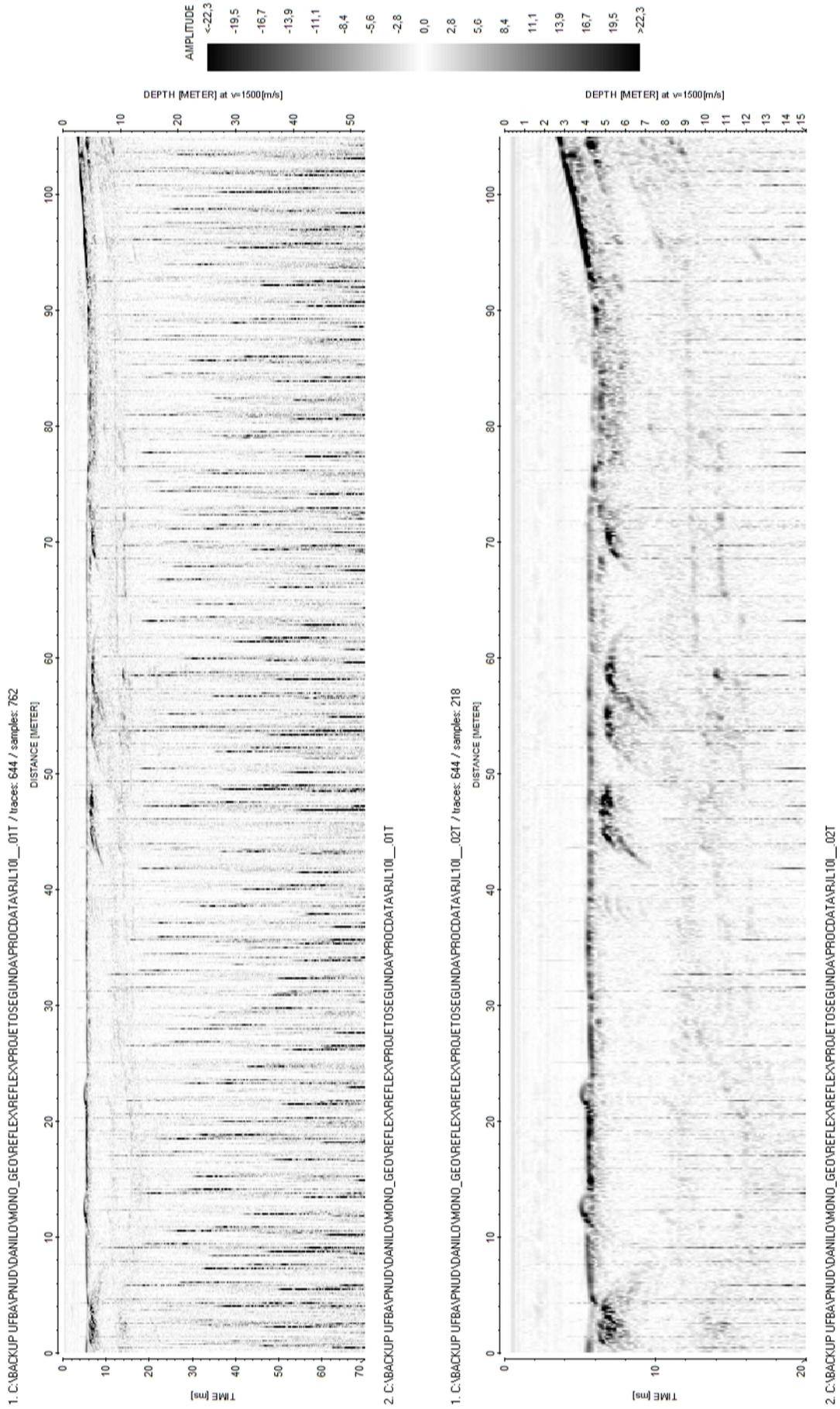


Figura 3.4: Perfil 10 antes (esquerda) e depois (direita) da operação de corte de tempo em 20 ms.

Outra operação passível de ser aplicada ainda nesta etapa do processamento refere-se ao controle de qualidade dos traços, realizado a partir da identificação visual de traços ruidosos para a posterior remoção através da operação remove disposta em *Menu>Processing>Edit Trace/traceranges*. Na figura 3.5 podem ser visualizadas as seções sísmicas antes e depois da remoção de alguns traços identificados como ruidosos, e a lista contendo a numeração destes traços removidos.

Outra operação complementar, comumente utilizada para minimizar a saturação visual do perfil, refere-se ao silenciamento da lâmina d'água, efetuado a partir da função muting no *Menu Processing>StaticCorretion*. Esta operação remove a influência da coluna d'água, de partículas e sedimentos em suspensão ou até mesmo cardumes de peixes, e também pode ser útil na otimização do tempo e precisão do processamento.

A seguir é exposta a interface do módulo *2D-Data Analysis*, contendo as seções sísmicas antes e depois da aplicação da operação *muting* de remoção da lâmina d'água.

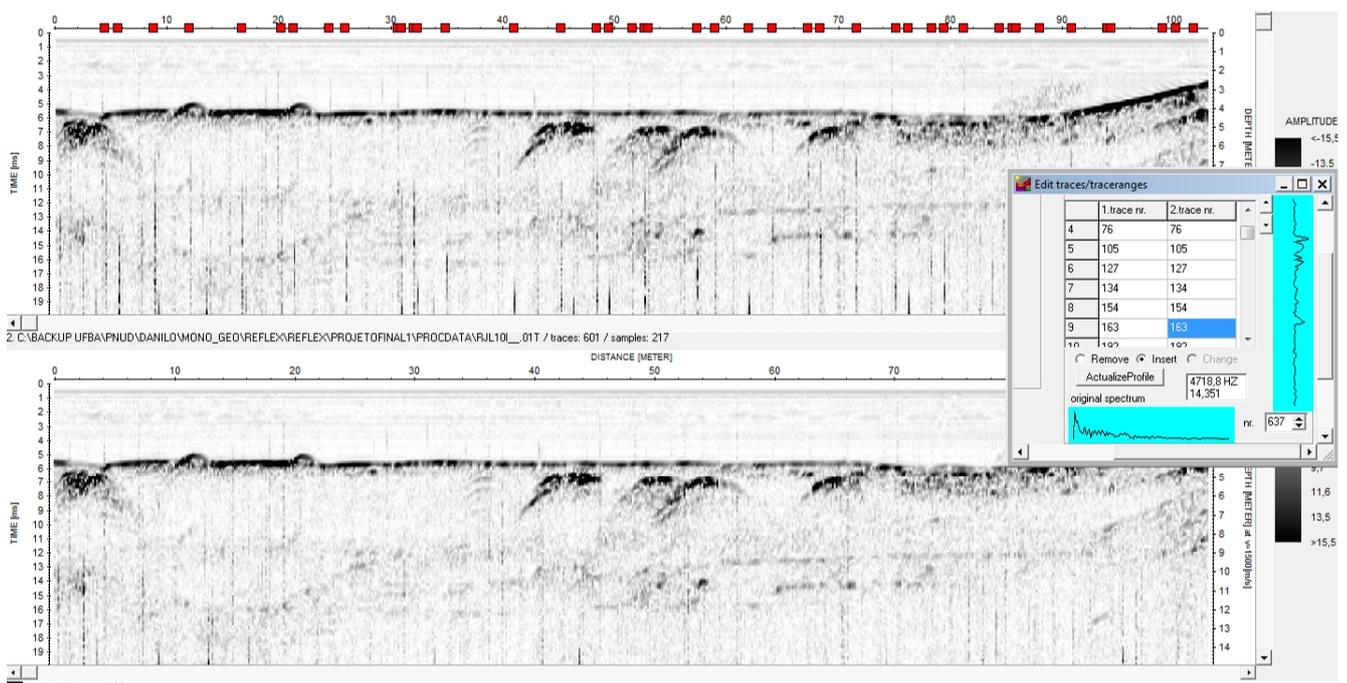


Figura 3.5: Interface gráfica do programa *ReflexW* mostrando a seção antes (acima) e depois (abaixo) da remoção dos traços ruidosos, listados na janela do *EditTrace/tracerange*. A posição de dos traços removidos podem ser visualizadas pelos quadrados vermelhos dispostos acima do perfil superior.

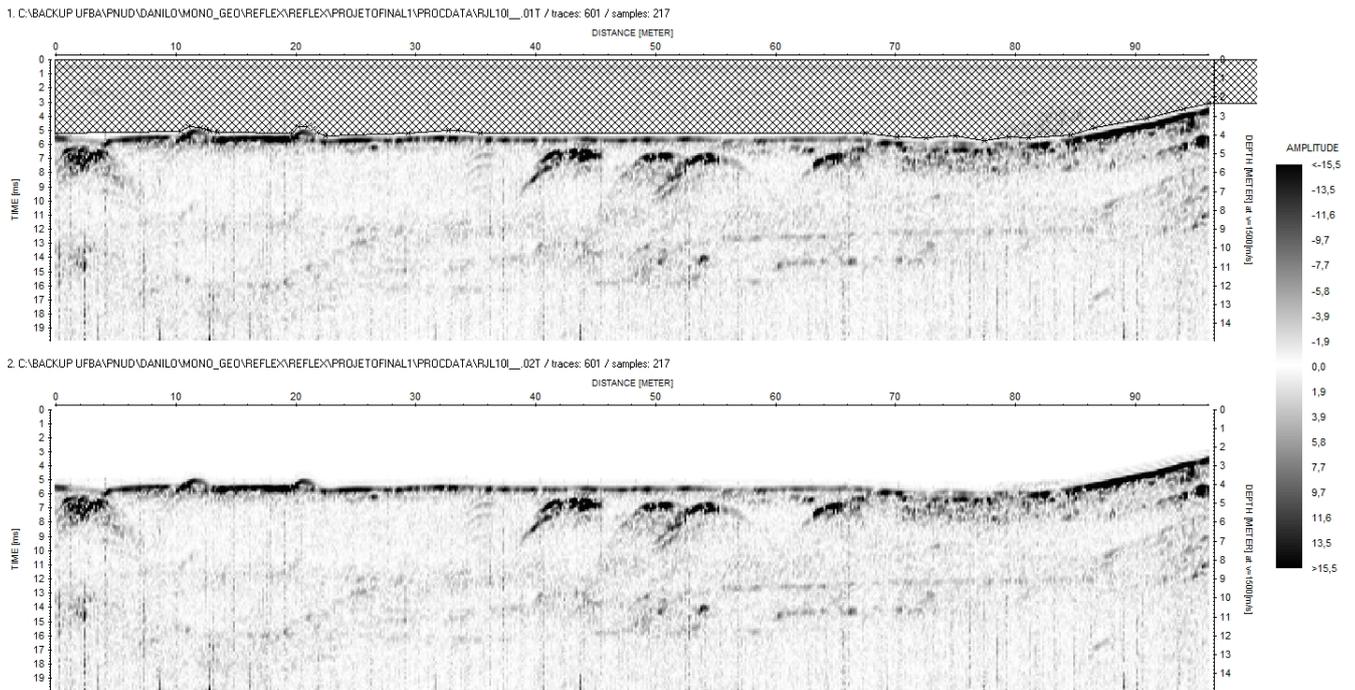


Figura 3.6: Interface gráfica do programa *ReflexW* mostrando a seção antes (acima), com a área a ser limpa representada pelo polígono hachurado, e o resultado (abaixo) após a aplicação da função *muting* de silenciamento da coluna d'água.

3.3 Análise espectral

A análise espectral do conteúdo de frequência do dado marca o início dos processos que afetam a amplitude do registro sísmico. Diversos são os fatores que levam a alteração da amplitude, sendo a divergência esférica e a absorção as duas formas que mais afetam o sinal. Outros fenômenos como perdas por transmissão, acoplamento fonte-receptor, curvatura do refletor e reflexões múltiplas também interferem na amplitude do sinal, entretanto de maneira menos destrutiva (Souza, 2006).

A divergência esférica está relacionada ao decaimento da amplitude pelo espalhamento radial da frente da onda em uma área sempre maior durante sua propagação. Ou seja, a amplitude do pulso sísmico na frente da onda decresce com o tempo à medida que a onda se propaga esfericamente segundo o princípio de *Huygens*. Este fenômeno é responsável pela atenuação de grande parte da amplitude do sinal sísmico.

A outra principal causa de perda do sinal é a absorção de energia pelas partículas do meio. Isto ocorre porque a subsuperfície não é um meio elástico perfeito. Ou seja, o comportamento inelástico do meio é responsável pela absorção de parte da energia mecânica do pulso sísmico, sendo em sua maior parte dissipada na forma de calor. Este fenômeno ocorre de maneira seletiva, absorvendo primeiramente as frequências mais altas, o que restringe a

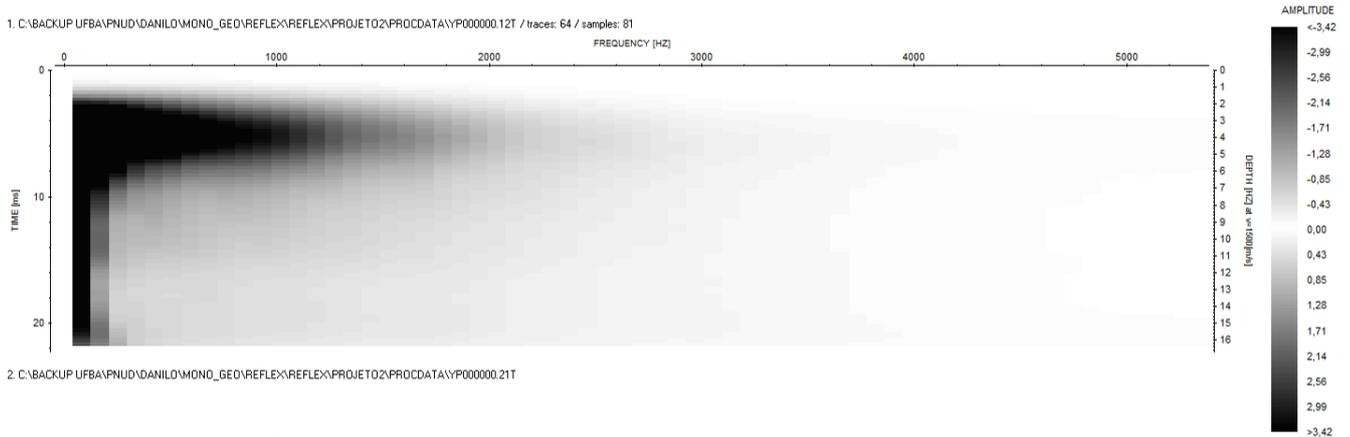


Figura 3.7: Soma dos espectros de frequência de todos os traços sísmicos correlacionados com o tempo (ou profundidade) do perfil sísmico antes das operações de filtragem.

aplicação da sísmica de alta resolução a pequenas profundidades. Comparações entre os dois efeitos indicam que as interferências causadas por divergência são mais efetivas em pequenas distâncias, ao passo que perdas por absorção ganham maior representatividade à medida que se aumenta a distância percorrida pela onda.

Outro fator atenuador do sinal é a presença de ruídos. No caso de fontes marinhas ruídos associados à embarcação (motor e outros equipamentos), aos flutuadores do equipamento, ou fontes naturais como a chuva podem interferir negativamente na relação sinal/ruído. É importante lembrar que essa relação é definida como a razão da potência de um sinal e a potência do ruído sobreposto à ele (Yilmaz, 1987).

Nesta etapa do processamento é realizada uma análise dos espectros de amplitude, tempo, frequência, buscando informações para selecionar, de maneira mais assertiva possível, os parâmetros para a construção de filtros que visam à correção da amplitude e conteúdo de frequência do dado.

A figura 3.7 representa a soma dos espectros de frequência correlacionados com o tempo e a profundidade. Este gráfico pode ser obtido a partir da ferramenta *Moving Window Spectrum*, disposta no *Menu - Complex Trace Analysis/Spectral Analysis*. Esta ferramenta facilita a identificação da distribuição e origem das frequências e amplitudes dos dados sísmicos. Ou seja, através dela é possível vincular profundidade a faixa de frequência que concentram as maiores amplitudes, podendo-se, portanto, inferir a respeito das faixas de frequência indesejadas. Observa-se no gráfico que o sinal de interesse concentra-se entre 3 e 8 ms nas faixas de frequência 0,1 - 3 kHz. Em toda a janela do tempo, e entre as frequências mais baixas, ocorre uma faixa de amplitude anômala relacionada ao ruído de fundo, aleatórios ou instrumentais.

Na figura 3.8 se encontram os histogramas de amplitude e frequência que confirmam a

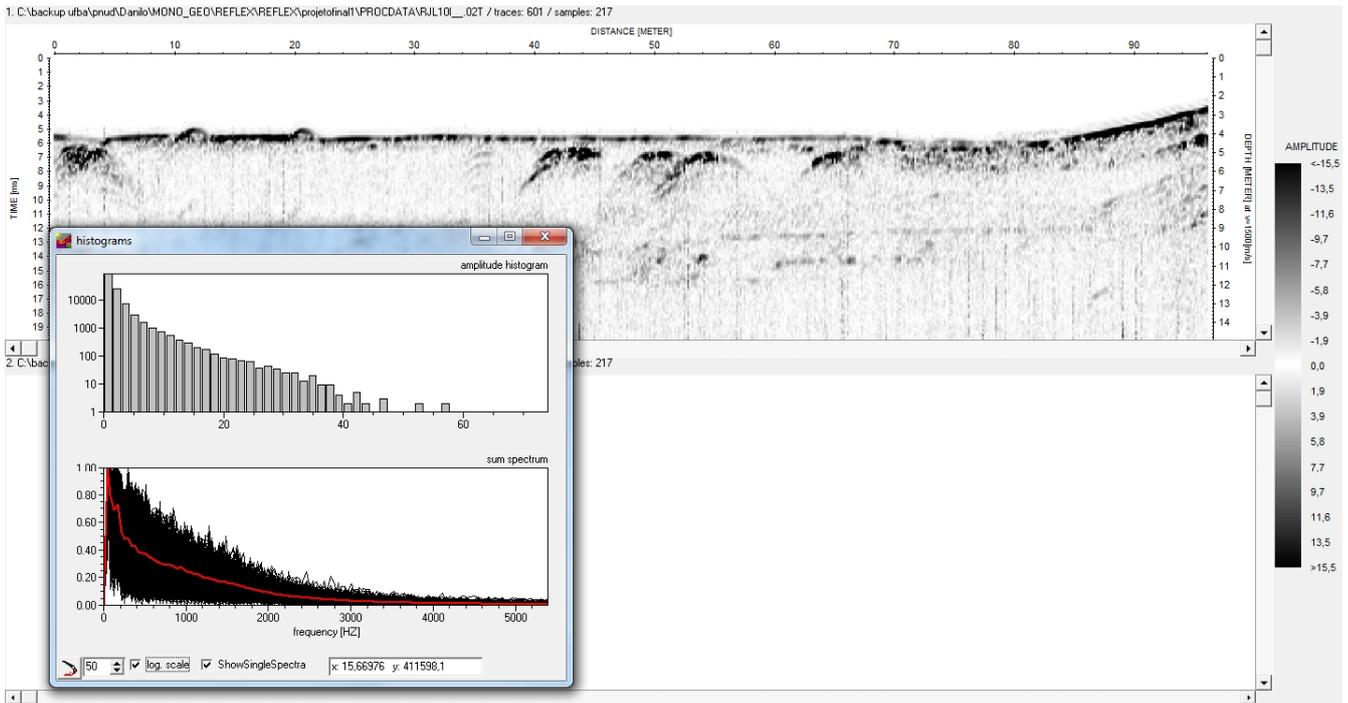


Figura 3.8: Histogramas de amplitude e frequência sobrepostos à seção sísmica antes das operações de filtragem.

distribuição de ruídos simultâneos ao sinal, o que dificulta o processamento e enfatiza a importância da aplicação de filtros, ou balanceamento espectral.

O balanceamento espectral foi a primeira operação escolhida para aplicação no perfil 10, submetido ao fluxo. Segundo Yilmaz (1987), este tipo de ferramenta de filtragem altera apenas o espectro de amplitude, nivelando o espectro de uma determinada faixa de frequências, sem interferir na fase do sinal, sendo, portanto, admitido como um tipo de deconvolução de fase zero.

A figura 3.9 apresenta o perfil sísmico após o balanceamento espectral, que pode ser efetuado no *Menu Processing – Complex traceanalysis/ spectral analysis*. Nota-se na janela à direita da figura, o resultado da equalização das frequências no traço de número 48 e no espectro de frequência deste traço. Ao analisar a seção balanceada fica evidente o realce nas reflexões do fundo marinho e nas estruturas de interesse. Estes dutos estão localizadas sobre o assoalho, ou nos primeiros metros de sedimento inconsolidado, sendo a atenuação dos ruídos de fundo responsável pelos seus destaques.

A partir da análise espectral do dado foi possível a aplicação de um filtro de frequência do tipo passa-banda, através da função *bandpassfrequency* disposta no *Menu - Processing – 1D-Filter*. Nesse tipo de filtro seleciona-se uma banda de frequência a ser preservada, e os limites inferior e superior de corte. Além disso, são definidas duas zonas de transição onde as frequências são suavizadas. No caso específico do filtro aplicada na presente pesquisa foram selecionadas as frequências de 50, 250, 3000 e 3200 Hz como frequências de *lower cutoff*,

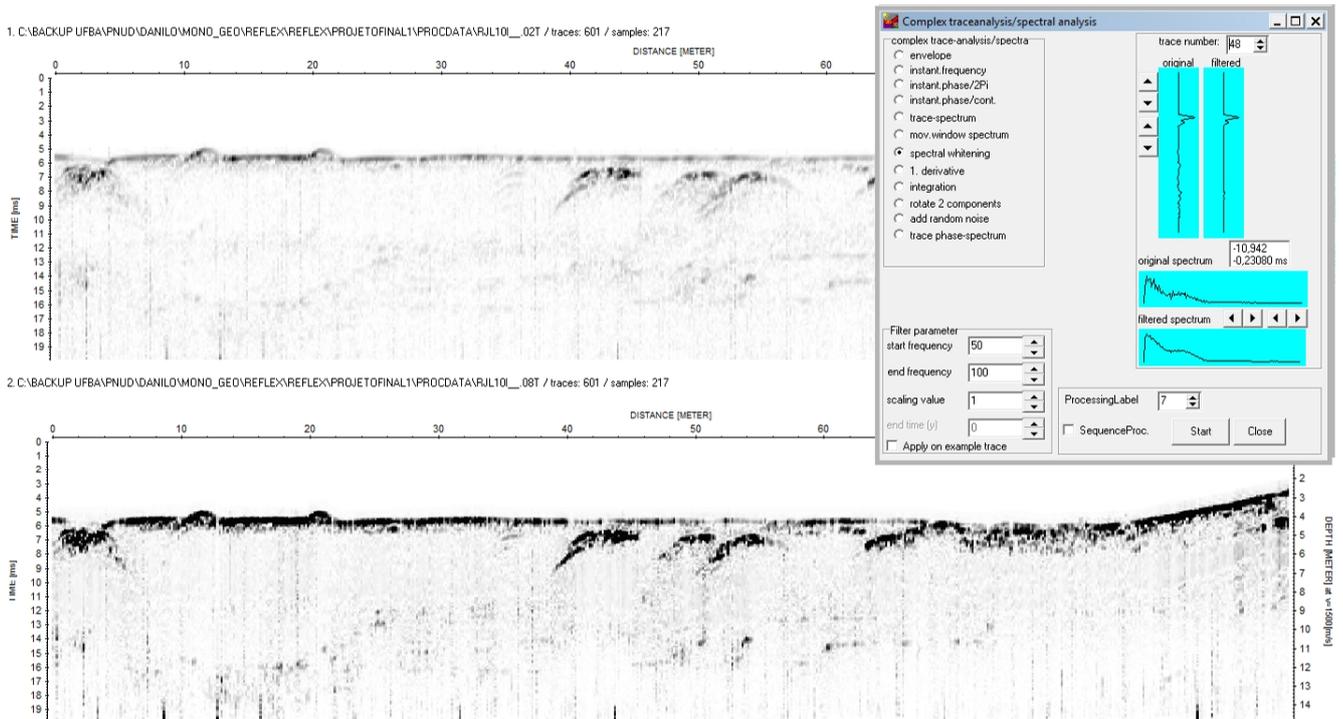


Figura 3.9: Seções sísmicas antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação do balanceamento espectral. À direita encontra-se a janela onde pode ser visualizado o resultado da aplicação do filtro sobre traços individuais e sobre o espectro de frequência.

lower plateau, *upper plateau* e *upper cutoff* respectivamente. Este filtro trapezoidal é muito utilizado em diversos tipos de processamento sísmico, devido a sua capacidade de remover as frequências indesejadas e permitir a passagem das frequências referentes aos refletores de interesse.

Apesar de a seção filtrada apresentar um leve realce nas estruturas de interesse, não houve grandes alterações em seu aspecto geral. Entretanto, ao analisar os espectros de frequência e o histograma de amplitude da seção submetida às operações, percebe-se que estes aspectos sofreram modificações, apesar dos perfis ainda se apresentarem de maneira semelhante. A faixa anômala de baixas frequências, presentes ao longo de todo o tempo do registro sísmico, bastante visível no espectro de frequência da seção bruta (figura 3.7) foi atenuada, como pode ser visto no espectro de frequência da seção pós balanceamento e aplicação do filtro passa-banda (figura 3.11). É importante destacar que a análise do conteúdo de frequência e do histograma de amplitude foi efetuada antes e depois de todas as operações do fluxo. Desta forma pretendeu-se tornar mais claras as alterações provocadas por cada uma das operações.

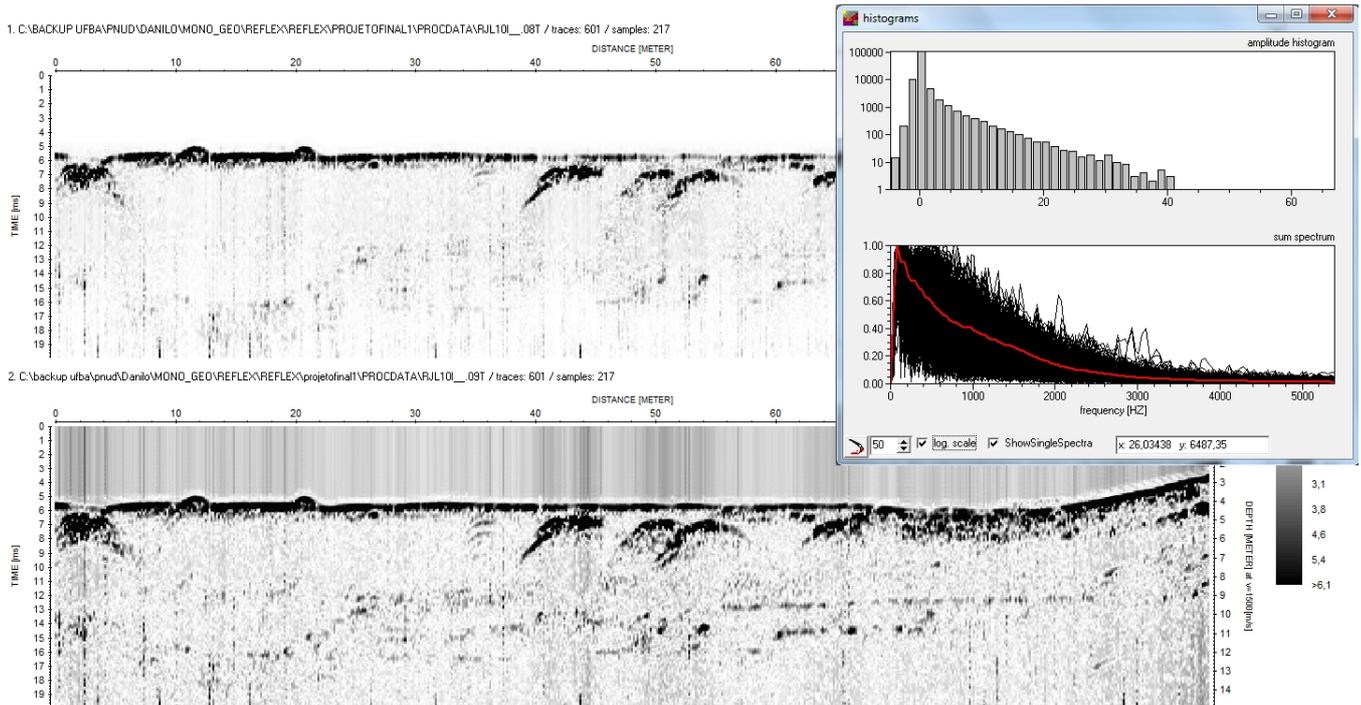


Figura 3.10: Perfis antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do filtro passa-banda. À direita se observa os histogramas de amplitude e frequência do perfil filtrado.

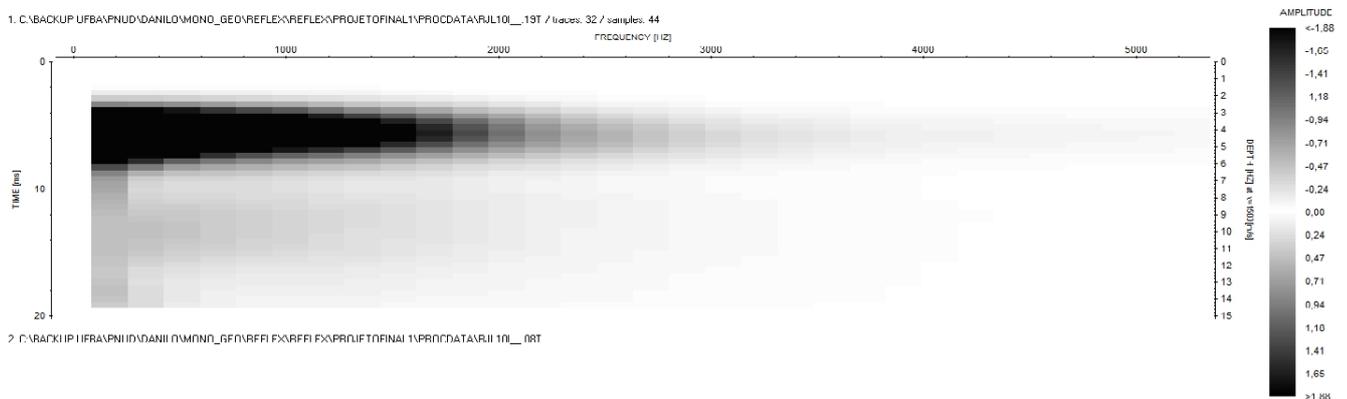


Figura 3.11: Soma dos espectros de frequência dos traços sísmicos correlacionados com o tempo da seção submetida às etapas de balanceamento espectral e filtro de frequências.

3.4 Deconvolução

De maneira geral, o traço sísmico pode ser entendido como o resultado da convolução do pulso básico com o coeficiente de reflexão, mais os ruídos. A deconvolução representa, portanto, a estimativa de um filtro inverso que quando convolvido com o pulso emitido pela fonte o converte na resposta impulsiva da terra. Esta operação de filtragem é amplamente utilizada para a supressão de reflexões múltiplas e reverberações, ou para aumentar a resolução temporal ou vertical dos traços sísmicos.

A deconvolução preditiva, em linhas gerais, remove o efeito das múltiplas, predizendo seus tempos de chegada a partir dos tempos de chegada dos eventos primários, supondo que a energia esteja concentrada na parte frontal do pulso (Robinson e Treitel, 2000). Nesta pesquisa, entretanto, foi selecionada a deconvolução do tipo *spiking*. A operação é efetuada usando o algoritmo de *Levinson*, que calcula de forma recursiva a solução da equação da onda através da matriz de *Toeplitz*. Segundo Yilmaz (2001), ao aplicar esta operação a forma de onda associada com refletores significativos é comprimida, e as reverberações que se misturam com as reflexões são suprimidas. O aumento na resolução temporal permite melhor identificação de pequenos alvos, como o topo e base de pacotes delgados, ou pequenas

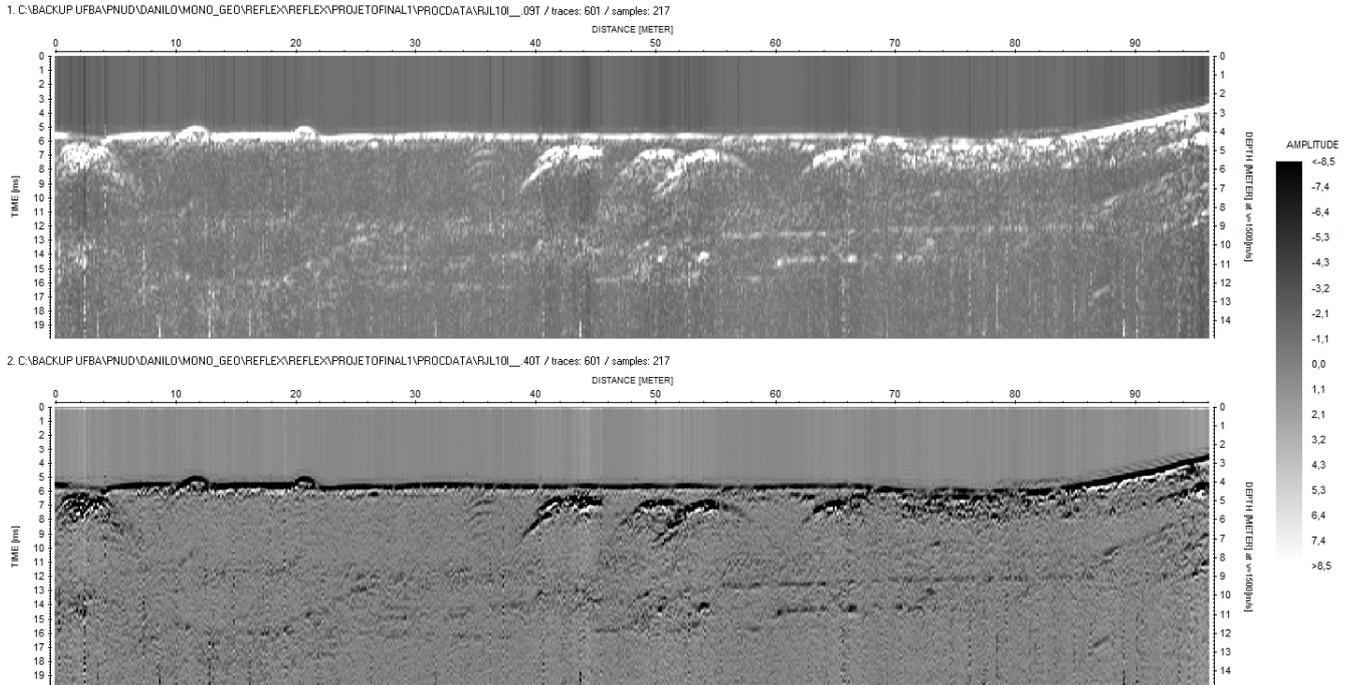


Figura 3.12: Perfis sísmicos referentes à linha 10 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação da deconvolução.

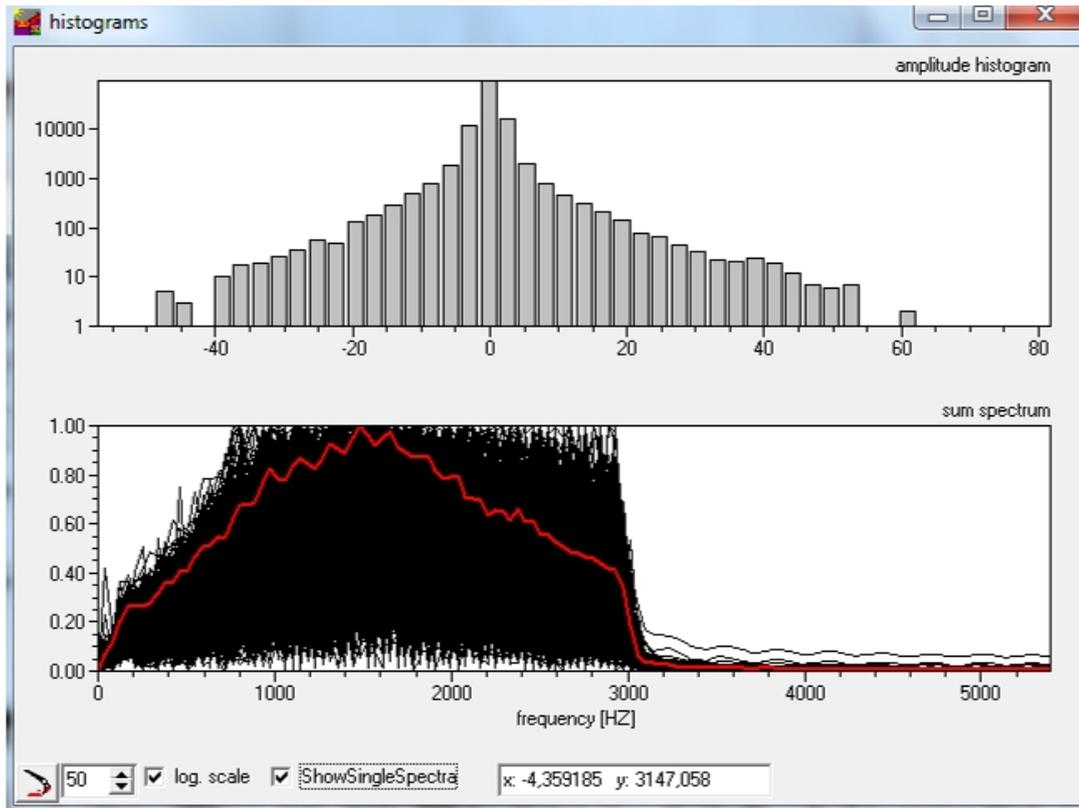


Figura 3.13: Histogramas de amplitude (acima) e frequências (abaixo) da seção processada.

estruturas artificiais, como é o caso da presente pesquisa. Entretanto, esta operação acrescenta um ganho a altas e baixas frequências, tornando imperativa a aplicação de um novo balanceamento dos traços pós-deconvolução, mantendo-se os parâmetros do filtro aplicado na primeira etapa.

A análise do perfil pós-deconvolução demonstra o efeito do aumento da resolução do dado. Nota-se que os refletores de interesse se apresentam mais bem definidos. Uma considerável melhoria na definição também pode ser percebida nos dutos soterrados nos primeiros metros de sedimentos. A principal alteração ocorrida nesta fase do processamento, entretanto, refere-se às alterações na amplitude. O histograma de amplitudes do perfil pós as etapas de balanceamento espectral e filtragem de frequências (passa-banda) (figura 3.11) demonstra o aparecimento das amplitudes negativas. Na etapa da deconvolução tais amplitudes foram ainda mais destacadas, o que desencadeou no realce das estruturas de interesse. Este fato pode ser observado no perfil processado (figura 3.12) pela presença de amplitudes adjacentes com sinais opostos ao longo dos refletores de maior destaque.

A figura 3.14 representa a soma dos espectros de frequência correlacionados com o tempo (ou profundidade) do perfil submetido ao fluxo de processamento. Comparações com o espectro

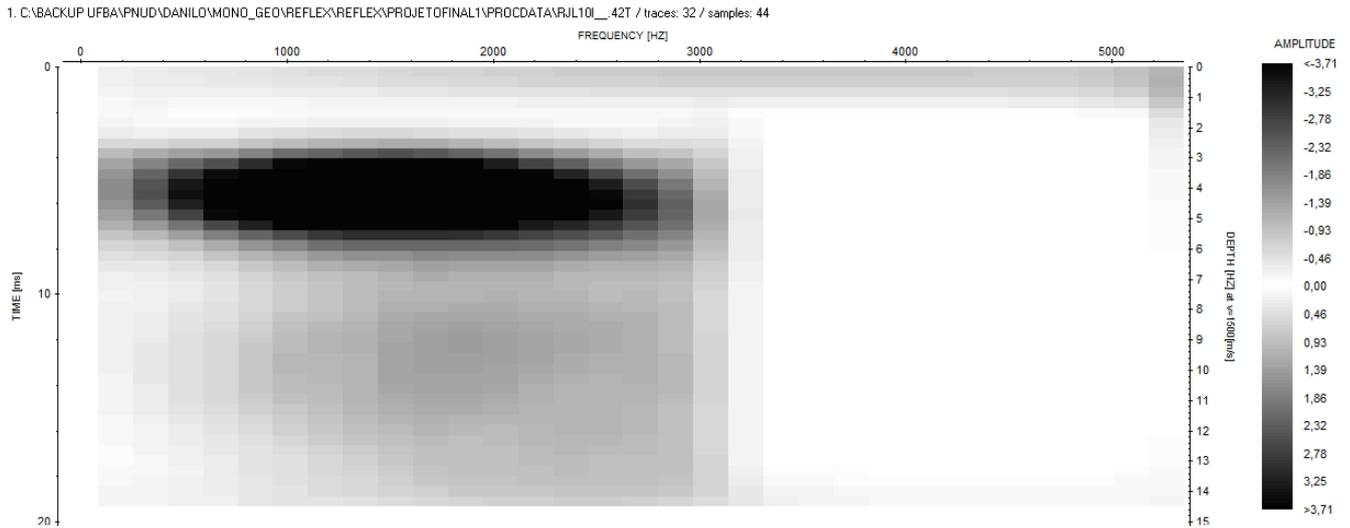


Figura 3.14: Soma dos espectros de frequência correlacionados com o tempo (ou profundidade) do perfil processado.

do perfil original permitem a percepção das alterações provocadas no domínio da frequência do dado. As frequências consideradas fora da faixa do sinal de interesse foram atenuadas, gerando um espectro com frequência central em torno de 1500 Hz (figuras 3.13 e 3.14).

A análise dos histogramas de amplitudes dos perfis antes e depois do processamento (figuras 3.8 e 3.13) evidencia como as operações do fluxo modificaram a distribuição de amplitudes do sinal. Somado a isso, notou-se um aumento na resolução vertical dos traços, tornando as estruturas de interesse do processamento mais bem definidas.

Na figura 3.15, podemos comparar as seções antes e depois do fluxo de processamento. Nota-se uma considerável melhoria na visualização da seção e na definição dos refletores de interesse (dutos), sendo estes representados por hipérbóles de difração. Tais hipérbóles de difração podem ser facilmente identificadas no perfil processado justamente graças ao aprimoramento na definição dos refletores e na resolução vertical dos traços, somados a melhoria na saturação visual da seção submetida ao fluxo.

Uma análise mais cuidadosa do perfil 10 processado (figuras 3.12 e 3.15) permite especulações acerca das estruturas de interesse que não seriam passíveis de serem elaboradas a partir da análise do perfil bruto, o que mais uma vez sublinha a importância do processamento proposto. Por exemplo: as estruturas identificadas próximas às posições 2 e 65 metros encontram-se, consideravelmente, mais bem definidas no perfil processado, o que permite inferir que são provavelmente constituídas de dois ou mais dutos adjacentes.

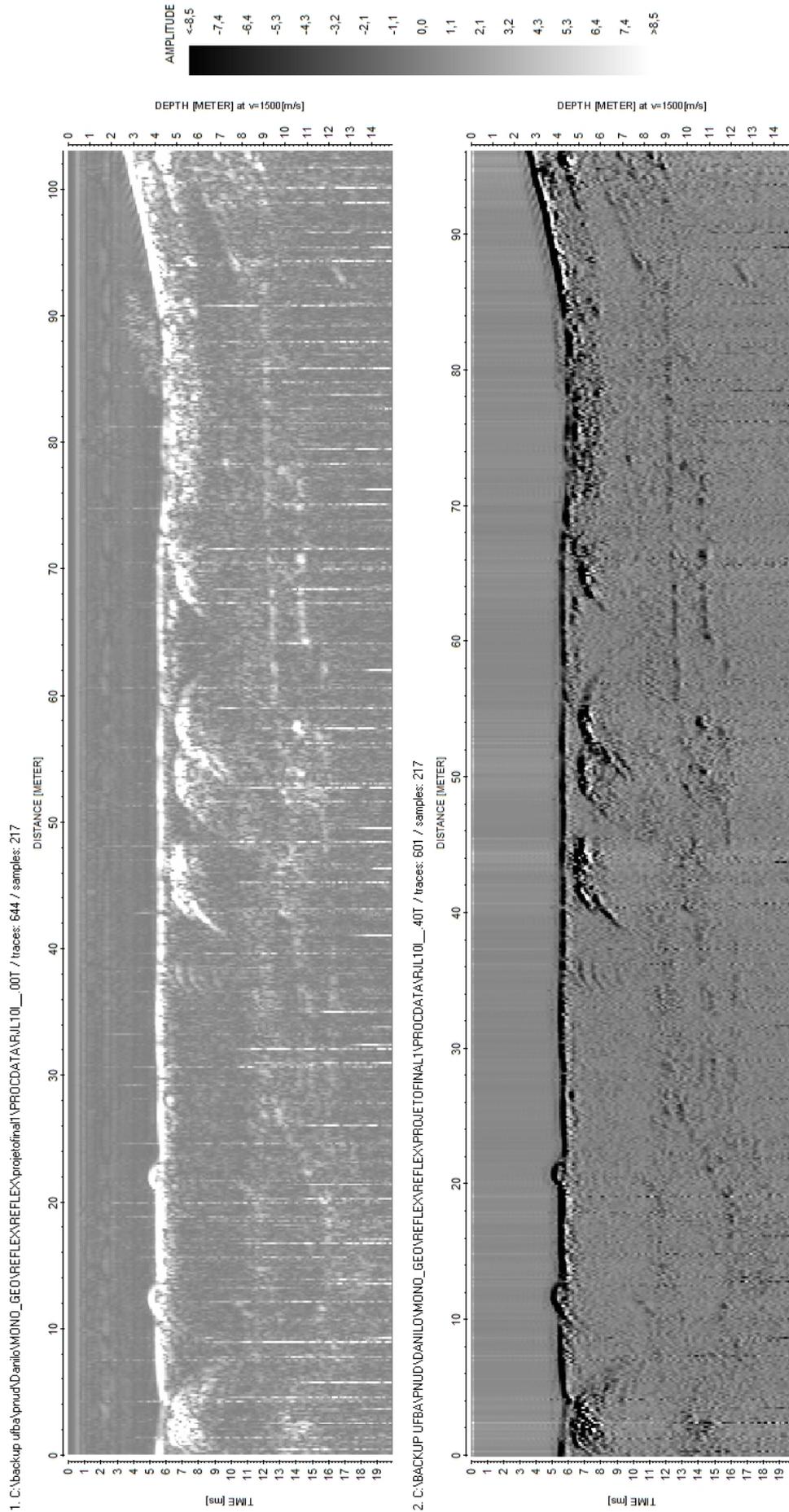


Figura 3.15: Perfil bruto (esquerda) e processado (direita) referentes à linha 10, demonstrando uma considerável melhoria no aspecto visual da seção e na definição das estruturas de interesse.

3.5 Aplicação do fluxograma

Nesta seção a aplicabilidade do fluxograma proposto na presente pesquisa é testada nos perfis sísmicos referentes às linhas 2, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15 e 17. A localização e comprimento destas linhas sísmicas podem ser visualizados nas figuras 2.5 e 2.6. A seguir expõe-se os perfis antes e depois da aplicação do fluxo de processamento.

A comparação entre os perfis processados e os respectivos perfis brutos, somada às análises dos espectros e histogramas de frequência e amplitude de cada um deles, demonstram os efeitos da aplicação do fluxograma de processamento proposto (figuras 3.16, 3.17 e 3.18). De maneira geral, não houveram grandes alterações nas seções processadas, entretanto, ao analisarmos cuidadosamente as diferentes seções submetidas ao fluxo nota-se uma considerável melhoria na saturação visual e na resolução vertical dos traços. Os espectros de frequência e os histogramas de amplitude indicam que a aplicação do fluxo levou a atenuação das baixas frequências e o destaque das amplitudes negativas, proporcionando uma melhor definição das estruturas de interesse.

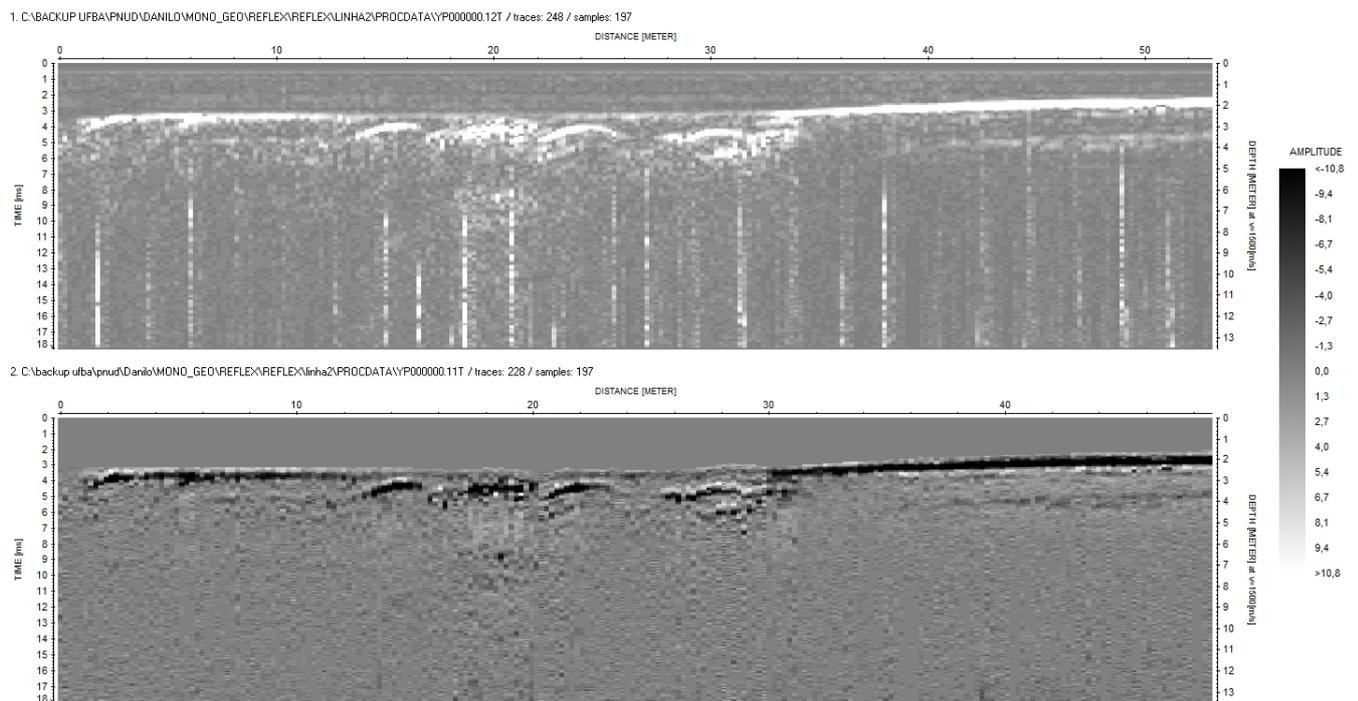


Figura 3.16: Perfil sísmico 2 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

Assim como mencionado anteriormente, estas estruturas podem ser indentificadas no assoa-lho marinho, ou pelas hipérboles de difração, dispostas nos primeiros metros da subsuperfície, representando o objeto de interesse tanto na época do levantamento dos dados, quanto ao longo do processamento desenvolvido nesta pesquisa.

As análises dos perfis processados demonstraram um considerável progresso na interpreta-bilidade das seções finais desenvolvidos a partir da aplicação das diversas etapas do fluxo. As seções submetidas ao fluxo foram utilizadas para elaboração de uma tabela reunindo algumas informações à respeito da identificação e localização dos dutos de interesse (tabela A). Em anexo (apêndice A) encontram-se as seções processadas (linhas sísmicas 2, 4, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15,) contendo as identificações das estruturas de interesse utilizadas para a elaboração da tabela A.

Tabela A			
PERFIL	Dutos aflorantes	Dutos soterrados	Total de dutos identificados
Linha sísmica 2	2	5	7
Linha sísmica 4	2	3	5
Linha sísmica 7	2	7	9
Linha sísmica 8	2	4	6
Linha sísmica 9	4	5	9
Linha sísmica 10	2	5	7
Linha sísmica 11	2	4	6
Linha sísmica 12	2	3	5
Linha sísmica 13	3	4	7
Linha sísmica 14	3	4	7
Linha sísmica 15	2	3	5
Linha sísmica 17	3	3	6
Total de dutos	29	50	79

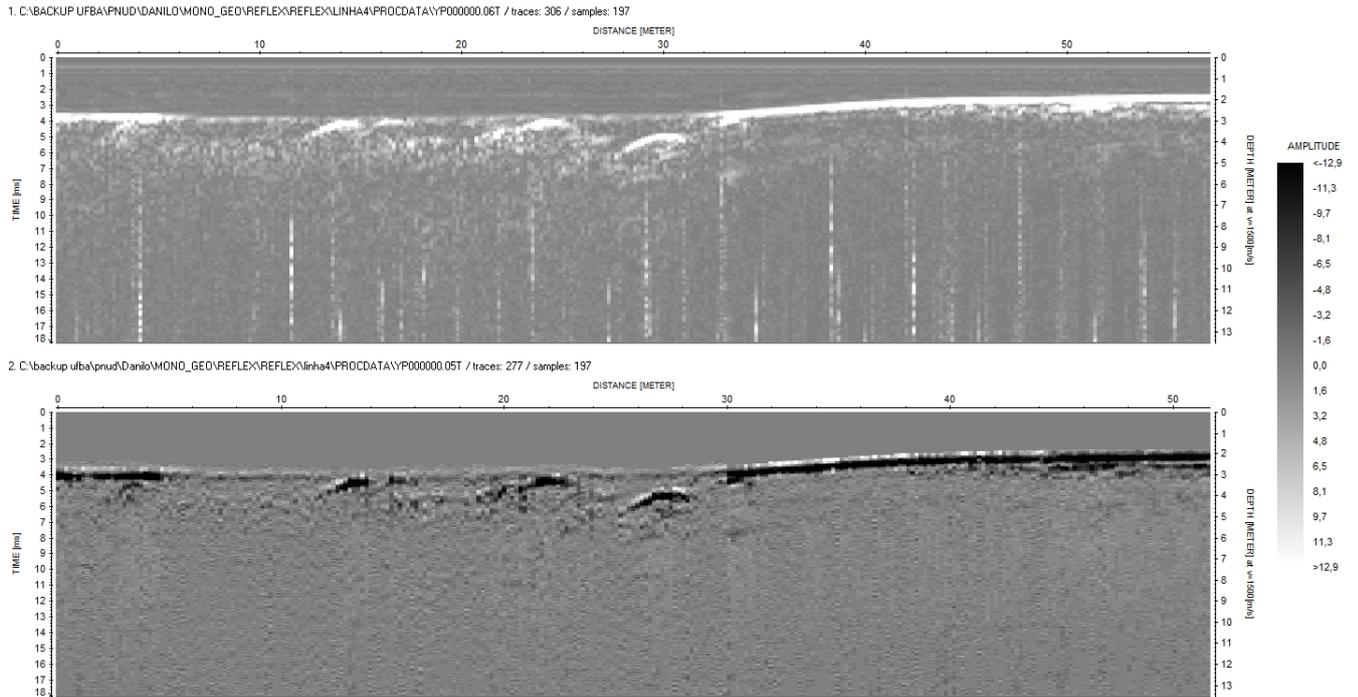


Figura 3.17: Perfil sísmico 4 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxo-grama de processamento.

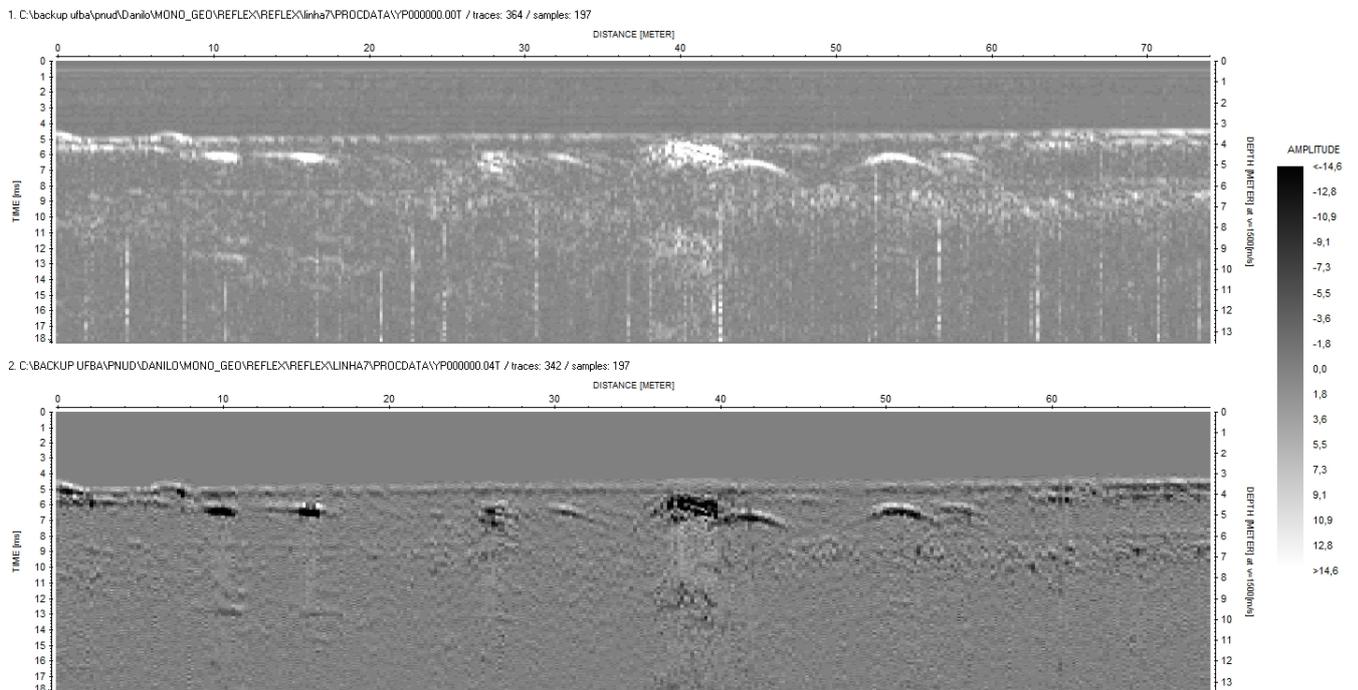


Figura 3.18: Perfil sísmico 7 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxo-grama de processamento.

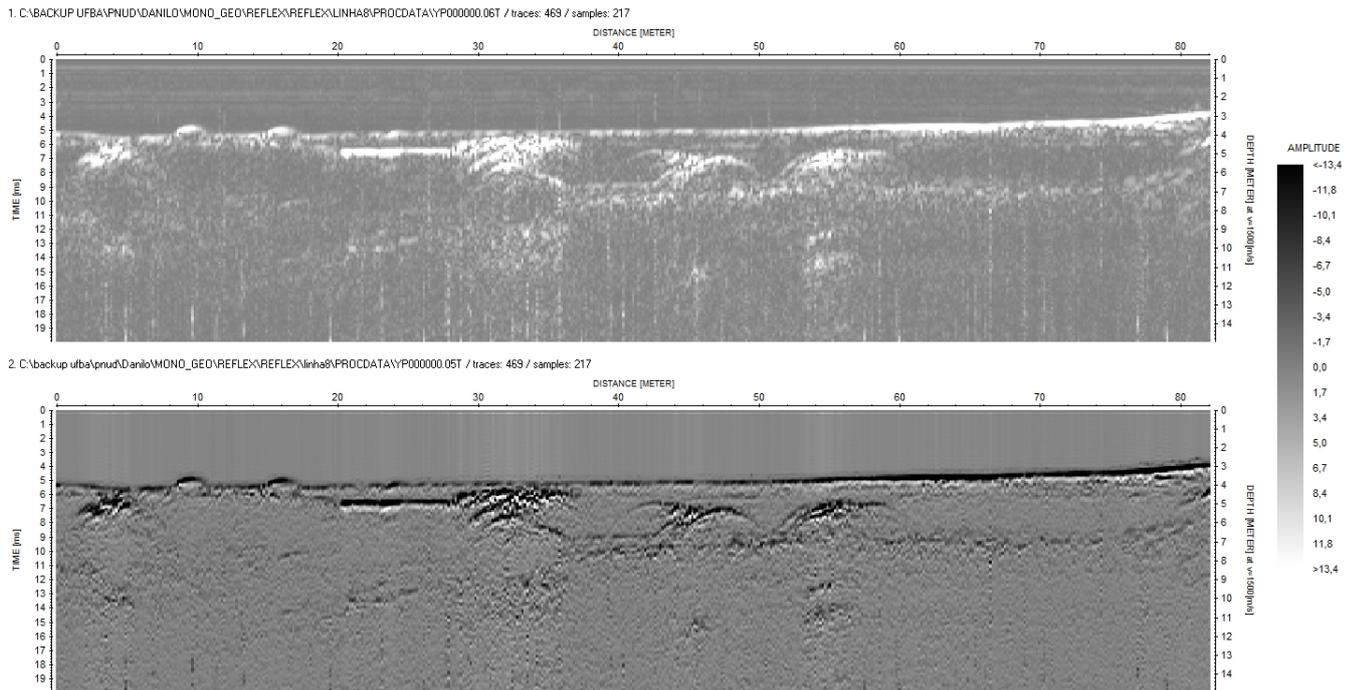


Figura 3.19: Perfil sísmico 8 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxo-grama de processamento.

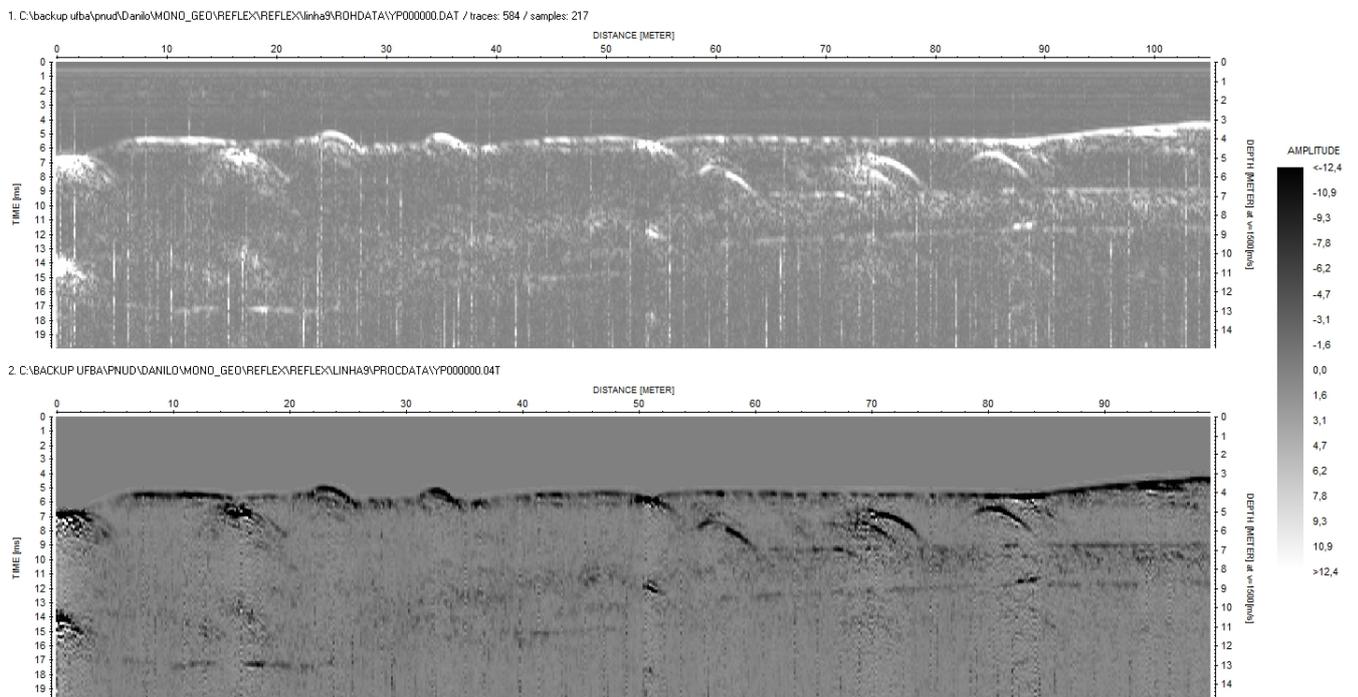


Figura 3.20: Perfil sísmico 9 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxo-grama de processamento.

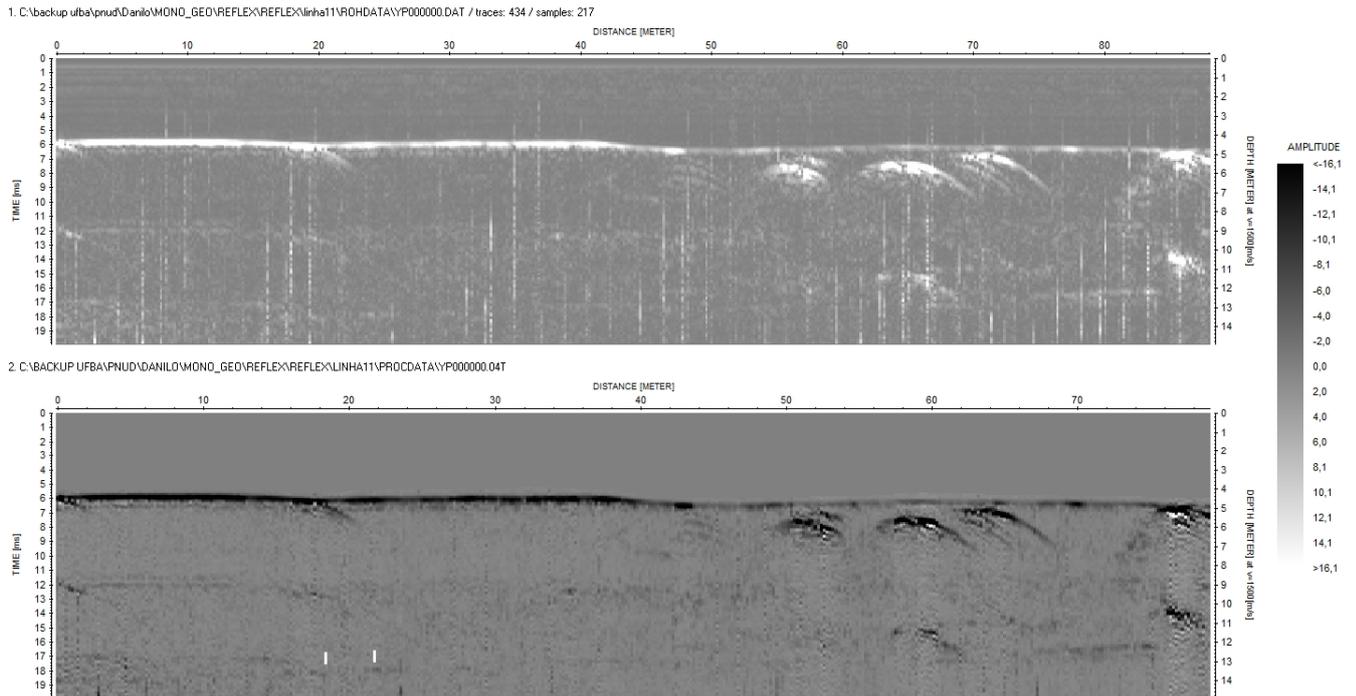


Figura 3.21: Perfil sísmico 11 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

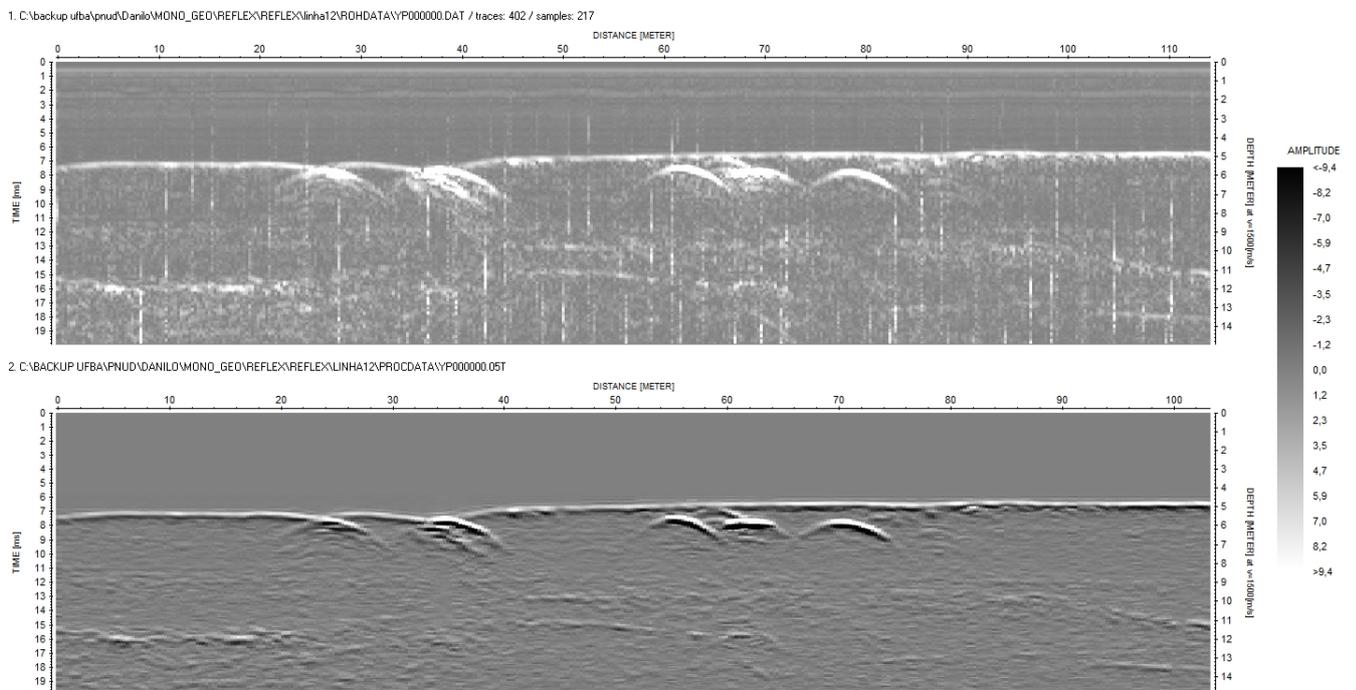


Figura 3.22: Perfil sísmico 12 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

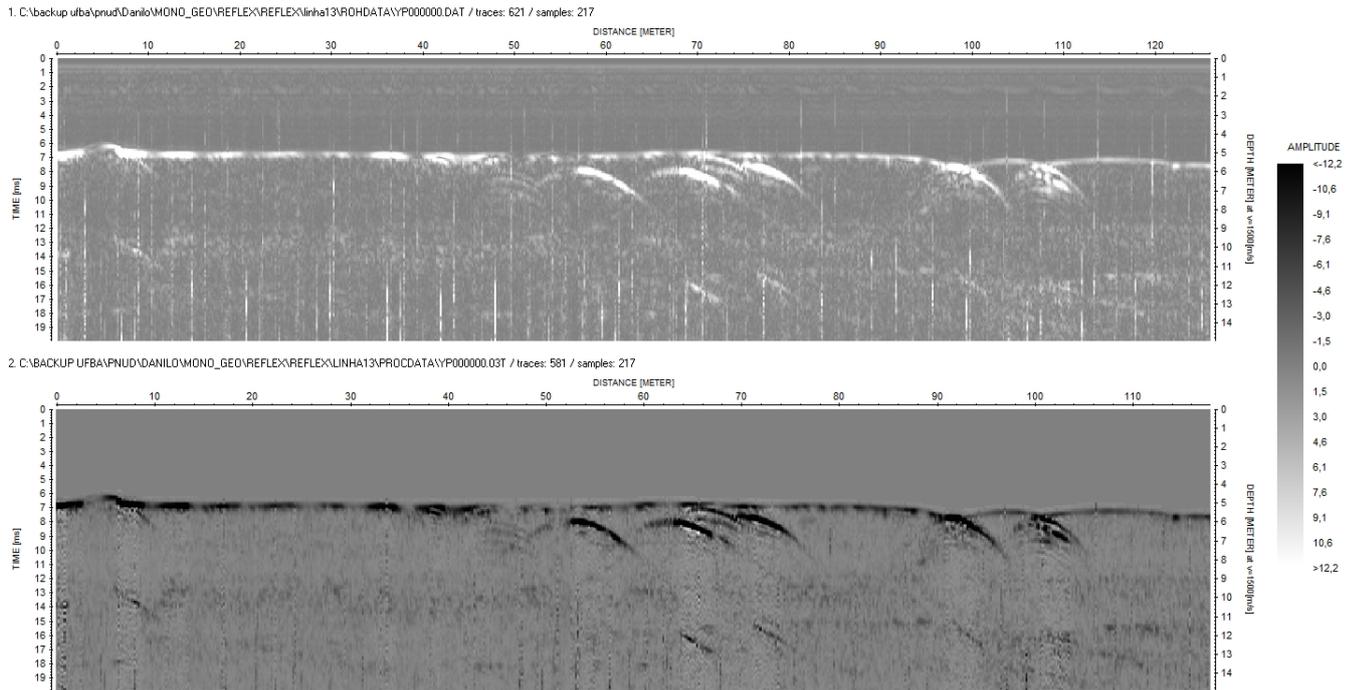


Figura 3.23: Perfil sísmico 13 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

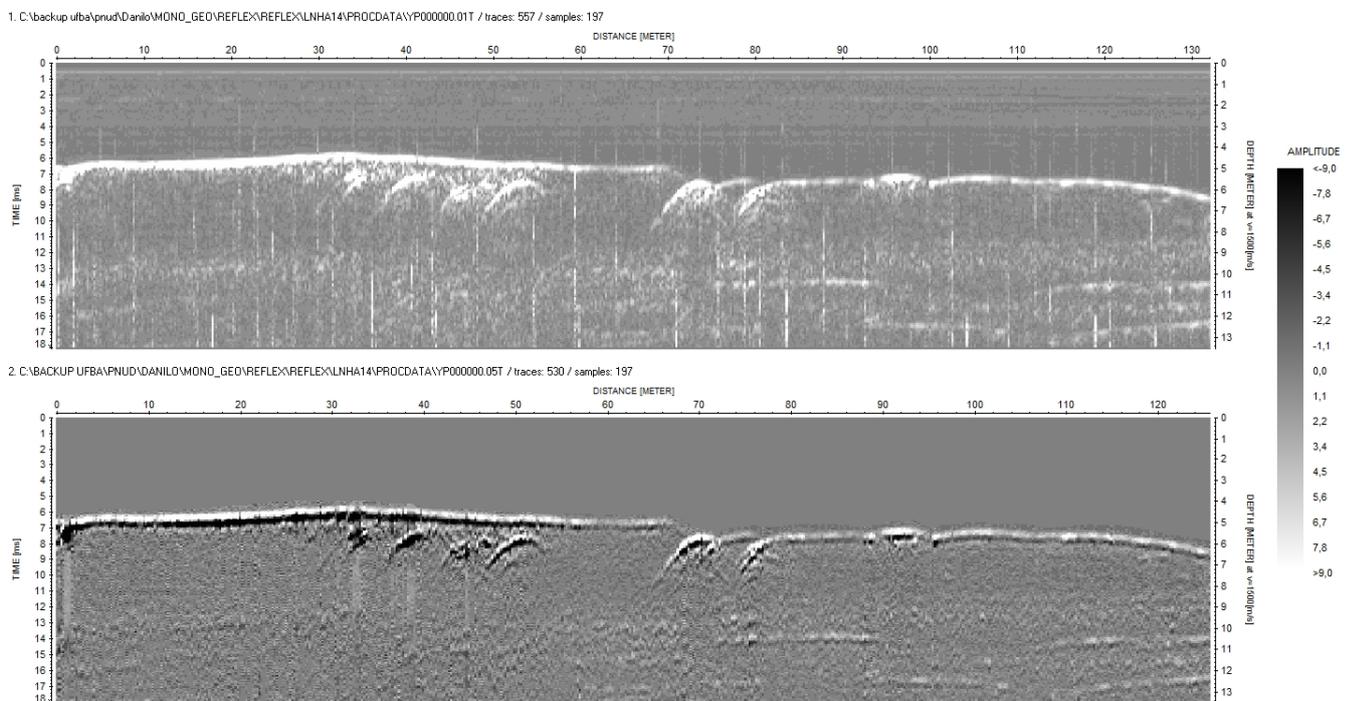


Figura 3.24: Perfil sísmico 14 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

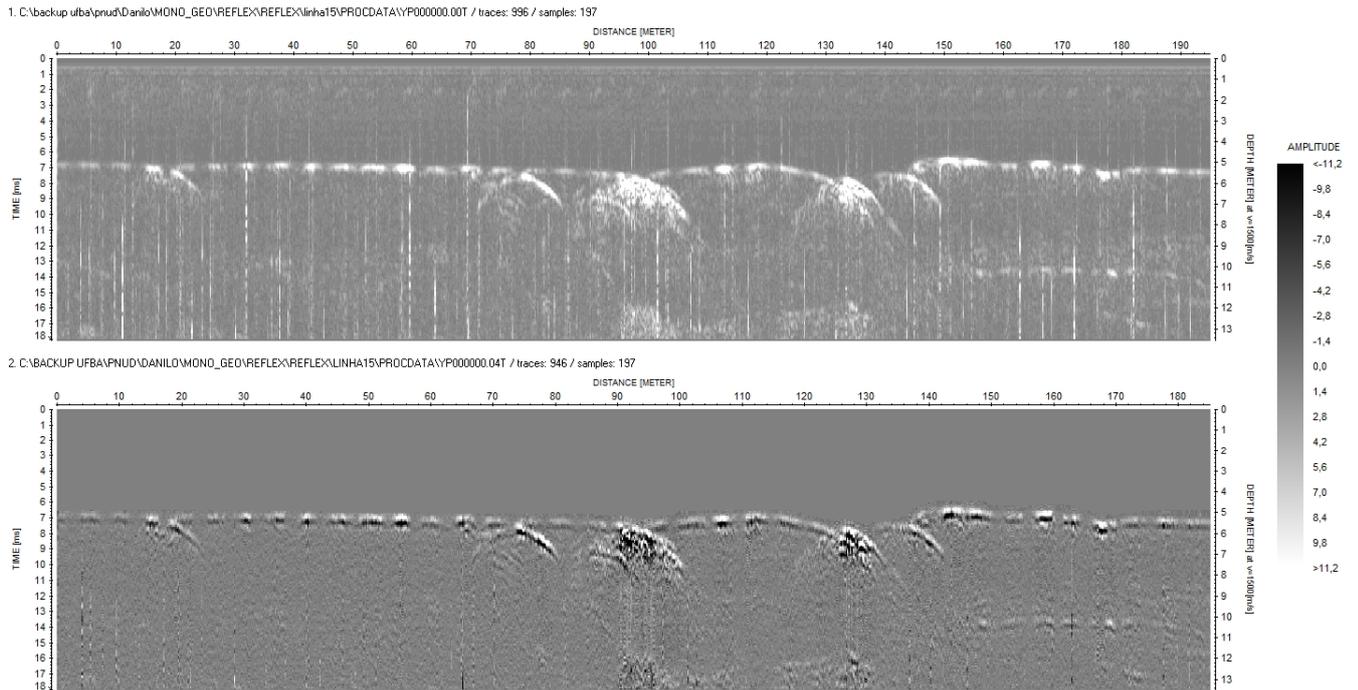


Figura 3.25: Perfil sísmico 15 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

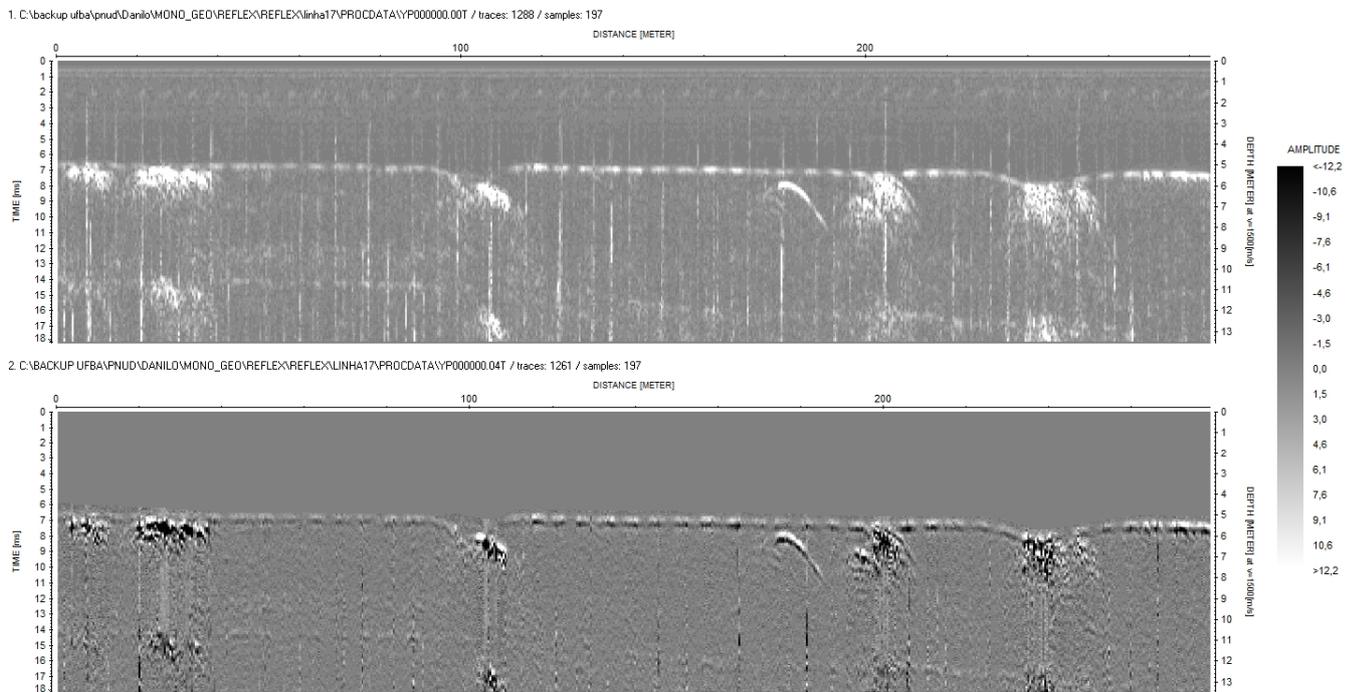


Figura 3.26: Perfil sísmico 17 antes (acima) e depois (abaixo) da aplicação do fluxograma de processamento.

CAPÍTULO 4

Considerações finais

Dados de sismica de alta resolução da Baía de Guanabara, adquiridos a partir de um sistema do tipo *Chirp*, foram utilizados nesta pesquisa para aplicação de um fluxo de processamento básico, buscando a obtenção de um perfil final com qualidade superior ao dado original. Tais dados foram levantados com o objetivo de localizar os dutos de uma dutovia disposta na região noroeste desta Baía. As técnicas de processamento que integram o fluxo estão centradas nos objetivos de aprimorar a visualização dos eventos como também para ressaltar as hipérbolas indicadoras das tubulações.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do fluxo básico de processamento proposto nesta pesquisa permitiram as seguintes conclusões:

- * As operações desenvolvidas na etapa da geometria do dado, tais como: corte de tempo, remoção de traços ruidosos e silenciamento da coluna d'água, mostraram-se eficazes na melhoria do aspecto e da saturação visual da seção. Além disso, tais operações diminuíram o custo computacional e aumentaram a precisão das operações subsequentes, justificando, portanto, a inclusão no presente fluxo de processamento;
- * A análise dos espectros e histogramas em diferentes etapas do processamento mostrou-se eficaz para a seleção de parâmetros dos filtros aplicados durante o fluxo. Além disso, estas análises foram bastante úteis, otimizando a visualização das alterações provocadas por cada operação de filtragem;
- * Em relação às alterações nas amplitudes do sinal, observa-se que as amplitudes negativas, inicialmente ausentes, foram evidenciadas ao longo das etapas do processamento. No perfil processado fica clara a presença de amplitudes com sinais opostos nos refletores marcantes, o que desencadeia no destaque das estruturas de interesse;
- * A Melhora na visualização associada ao aumento da resolução vertical dos traços permitiram uma melhor identificação dos eventos correspondentes às hipérbolas, proporcionando análises mais pertinentes à respeito da configuração da dutovia investigada.
- * Os testes desenvolvidos nas linhas sísmicas 9, 11 e 13 confirmaram a aplicabilidade do fluxograma proposto através de resultados similares aos encontrados para a linha

sísmica 10, permitindo rastrear o comportamento espacial da dutovia.

- * As seções processadas foram utilizadas para a identificação, localização e classificação, se soterrados ou aflorantes, dos diversos dutos que compõe a dutovia investigada.

É importante destacar que o fluxo de processamento proposto nesta pesquisa é aberto, podendo ser alterado pelo incremento ou remoção de etapas. Além disso, uma alteração na ordem de aplicação das operações selecionadas também desencadeia em resultados distintos, sendo, portanto, justificável ao buscar uma adequação à dados com características específicas.

Para os dados utilizados na presente pesquisa, vale a pena destacar que exaustivos testes foram desenvolvidos ao longo das diversas etapas do fluxo, principalmente na etapa pós deconvolução, tais como: migração *Kirchhoff*, migração reversa no tempo, deconvolução preditiva, aplicação de ganho manual, AGC. Entretanto, tais operações demonstraram efeitos indesejáveis aos objetivos desta pesquisa, sendo desta forma, excluídas do fluxograma de processamento apresentado. Entre estes efeitos indesejáveis, destacam-se a perda da continuidade dos refletores de interesse e a diminuição da razão sinal/ruído. Em relação ao fluxo de processamento proposto na presente pesquisa ressalta-se que sua aplicação demonstrou um considerável progresso no aspecto visual da seção e na definição das estruturas de interesse, aprimorando, portanto, a interpretabilidade da seção final.

Diante do caráter colaborativo da ciência que conta com a participação ativa de diversos atores sociais, destaca-se a importância de pequenas contribuições acadêmicas no sentido de evoluir o estado de conhecimento atual. A presente pesquisa representa mais uma dessas pequenas contribuições, em um campo ainda pouco abordado pela comunidade científica nacional, o que demonstra a importância da sua realização.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao professor Dr. Marco Botelho, que mostrou-se determinado a me ajudar em um momento delicado da minha carreira acadêmica. Agradeço pela confiança e pela valiosa orientação que permitiu a elaboração desta pesquisa.

Gostaria de agradecer a secretária do colegiado de Geofísica, Ana do Ó por inúmeras vezes me ajudar nos empecilhos burocráticos.

Agradeço ao professor Dr. Ruy Kikuchi pela confiança depositada em mim ao longo dos últimos anos.

Agradeço aos professores Dr. Arno Brichta e Dr. Milton Porsani por terem aceitado participar da comissão avaliadora e por todas as enriquecedoras contribuições a este trabalho.

Gostaria de agradecer ao apoio do convênio entre a UFBA, a FAPEX e a Petrobras (N. 005.0005.1297.090) que proporcionou a obtenção dos dados desta pesquisa.

Seria simplesmente impossível citar os nomes de todas as pessoas que me ajudaram direta e indiretamente a concluir o curso de graduação em Geofísica. Agradeço, portanto, aos amigos que em incontáveis situações me ajudaram nos momentos de dificuldade.

Referências Bibliográficas

- Amador, E. S. (1992) Sedimentos de fundo da baía de guanabara - uma síntese., Anais do iii congresso da associacao brasileira de estudos do Quaternário, **15**.
- Bruneta, R. (2005) O processamento da sísmica de reflexão rasa desafios encontrados no estudo de modelos análogos a reservatórios fraturados, Mestrado em geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Bull, J. M.; Quinn, R. e Dix, J. R. (1998a) Reflection coefficient calculation from marine high resolution seismic reflection (chirp) data and application to an archaeological case study, Marine Geophysical Researches.
- Bull, J. M.; Quinn, R. e Dix, J. R. (1998b) Reflection coefficient calculation from marine high resolution seismic reflection (chirp) data and application to an archaeological case study, Marine Geophysical Researches, **20**.
- Cwik, M. R.; Melo, A. C.; Cezar, G. S. e Pellizzari, P. O. (2010) Integração de dados geofísicos e geológicos em projetos de dutos rígidos submersos: análise dos métodos de inferência espacial, III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.
- Dias, G. T. M. e Quaresma, V. S. (1996) Baía de guanabara - evolução geomorfológica do fundo submarino, Anais do XXIX congresso brasileiro de Geologia.
- Gomes, M. P.; Vital, H. e Macedo, J. W. P. (2010) Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de plataforma continental. exemplo: Macau-rn, Revista Brasileira de geofísica, **29**.
- Jica (1994) The study on recuperation on Guanabara Bay ecosystem, Japan International Cooperation Agency, Tokyo, Kokusai Kogyo.
- Kearey, P.; Brooks, M. e Hill, I. (2002) An introduction to geophysical exploration., Blackwell Scientific, Oxford (UK).
- Kjerfve, B.; Ribeiro, C. H. A.; Dias, G. T. M.; Filippo, A. M. e Quaresma, V. S. (1997) Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: baía de guanabara, rio de janeiro, brazil, Continental shelf research, **17**.
- Leblanc, L. R., M. L. R. M. S. S. G. e King, J. (1992) Marine sediment classification using the chirp sonar, J. Acoust. Soc. Am, **91**.
- Marino, I. K.; Santos, M. A. C. e Silva, C. G. (2012) Processamento aplicado à sísmica de alta resolução. estudo de caso: Baía de guanabara – rj, Texto submetido para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de geofísica, Salvador, **25**.

- McGee, T. M. (1995) High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes part a: Acquiring analogue seismic signals., *J. Appl. Geophys.*
- Mosher, D. C. e Simpkin, P. (1999) Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition, *Geosci. Can.*
- Panda, S.; Leblanc, L. R. e Schock, S. G. (1994) Sediment classification based on impedance and attenuation estimation, *J Acoust. Soc. Am.*, **95**.
- Quaresma, V. S. (1997) Caracterização da dinâmica sedimentar da baía de Guanabara, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ.
- Quaresma, V. S.; Dias, G. T. M. e Baptista Neto, J. A. (2001) Caracterização de padrões de sonar de varredura lateral e 3,5 e 7,0 khz na porção sul da baía de guanabara - rj, *Revista brasileira de geofísica*, **6**.
- Quinn, R.; Bull, J. M. e Dix, J. K. (1997) Imaging wooden artefacts using chirp sources, *Arqueological Propection*, **4**.
- Quinn, R.; Bull, J. M. e Dix, J. K. (1998) Optimal processing of marine high-resolution seismic reflection (chirp) data., *Marine Geophysical Researches*, **20**.
- Robinson, E. A. e Treitel, S. (2000) *Geophysical signal analysis*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (USA).
- Ruellan, F. (1944) Evolução geomorfológica da baía de guanabara e das regiões vizinhas, *Revista Brasileira de Geografia*.
- Schon, J. H. (1996) *Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics. Handbook of Geophysical Exploration. Section I, Seismic Exploration*, Pergamon Press, London, England.
- Silveira, J. D. (1964) *Morfologia do Litoral*, Azevedo, A. *Brasil a Terra e o Homem*, São Paulo.
- Souza, L. (1988) As técnicas geofísicas de sísmica de reflexão de alta resolução e sonografia aplicadas ao estudo de aspectos geológicos e geotécnicos em áreas submersas., *Anais do congresso brasileiro de Geologia*, **35**.
- Trabant, P. (1984) *Applied high-resolution geophysical methods*, International Human Resources Development Corporation. Boston, MA.
- Woods, R. D. (1991) Soil properties for shear wave propagation, Hoven, J.M. et al. (Eds), *Shear Wave in Marine Sediments*.
- Yilmaz, O. (1987) *Seismic data processing*, Society of Exploration Geophysicists.

APÊNDICE A

Seções sísmicas processadas contendo as indicações dos dutos de interesse

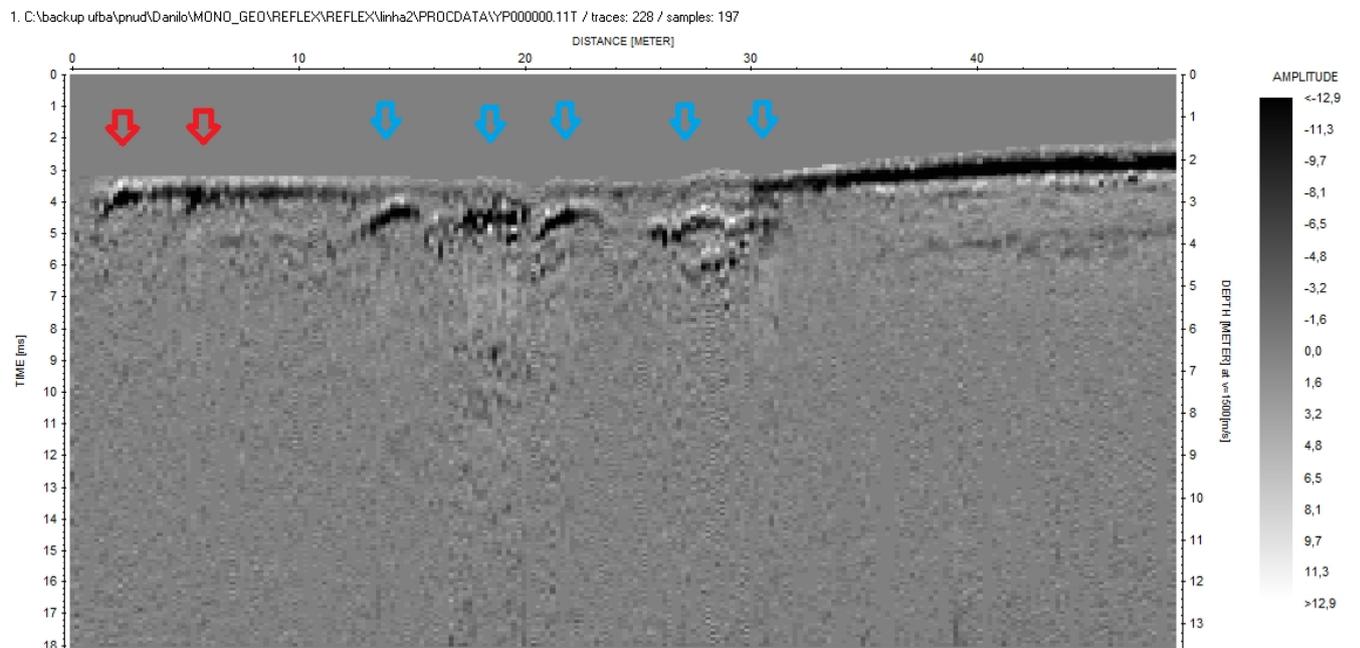


Figura A.1: Perfil sísmico processado referente à linha 2. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

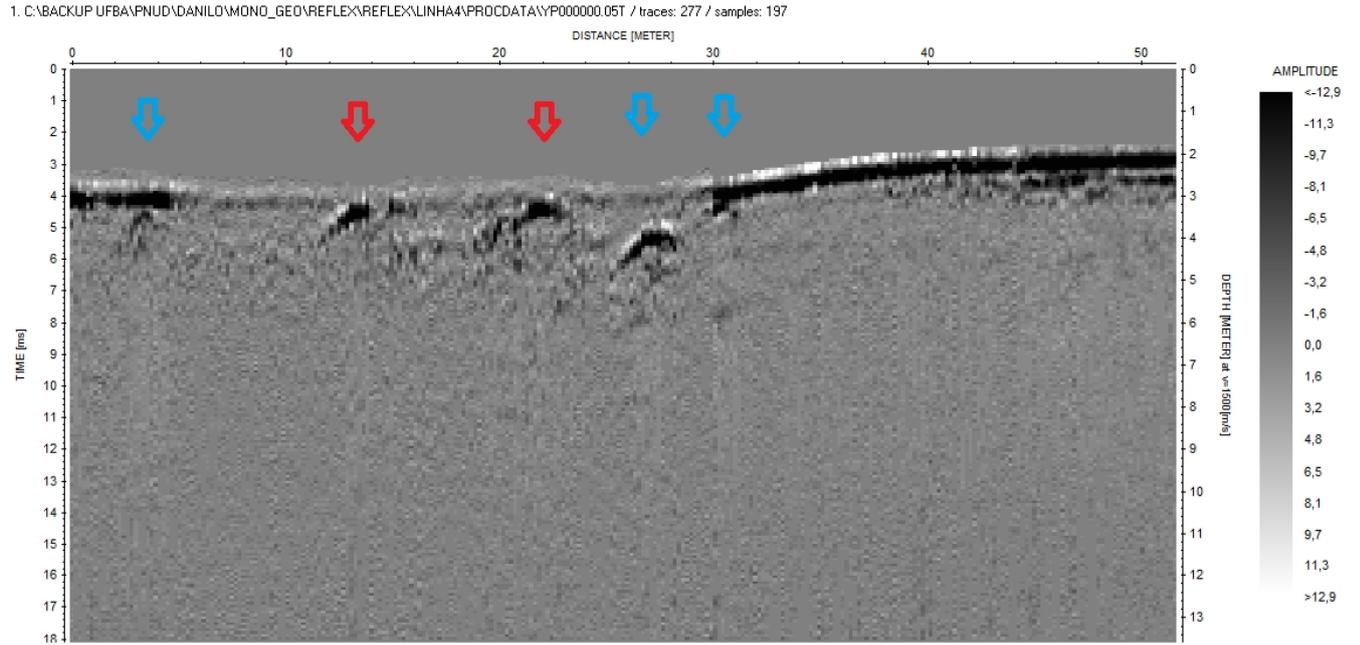


Figura A.2: Perfil sísmico processado referente à linha 4. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

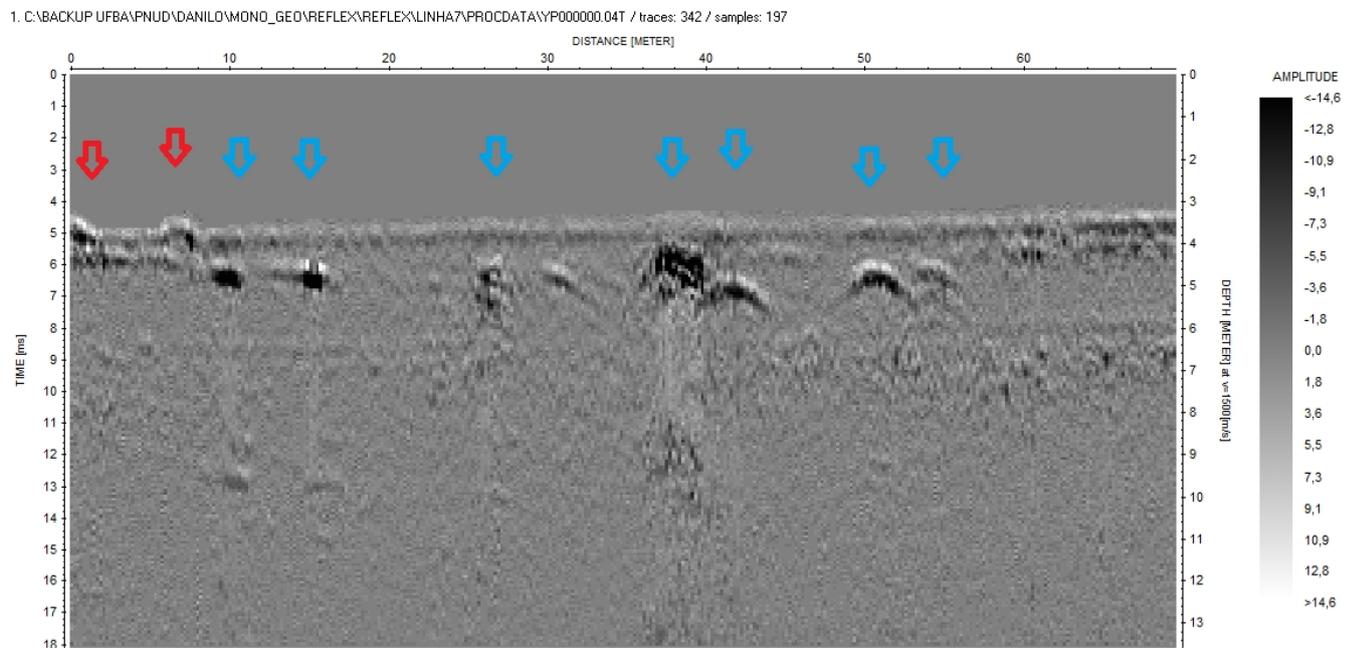


Figura A.3: Perfil sísmico processado referente à linha 7. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup ufba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\linha8\PROCADATA\YP000000.05T / traces: 469 / samples: 217

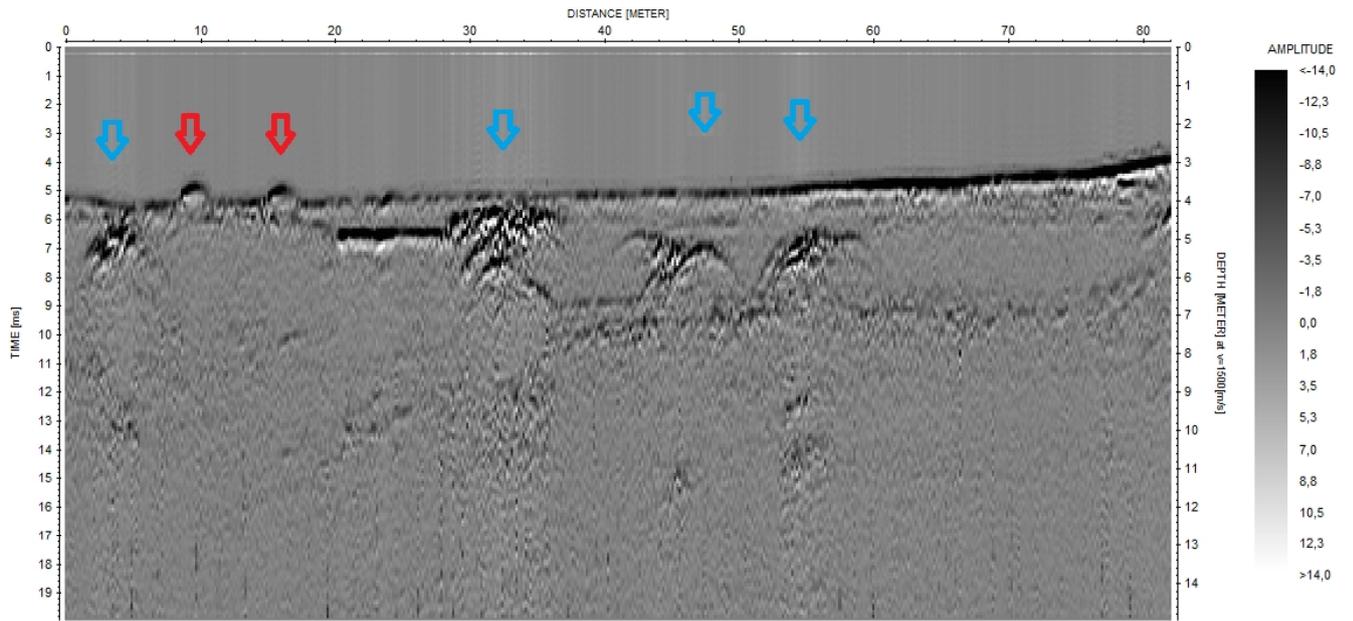


Figura A.4: Perfil sísmico processado referente à linha 8. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup ufba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\linha9\PROCADATA\YP000000.04T / traces: 551 / samples: 217

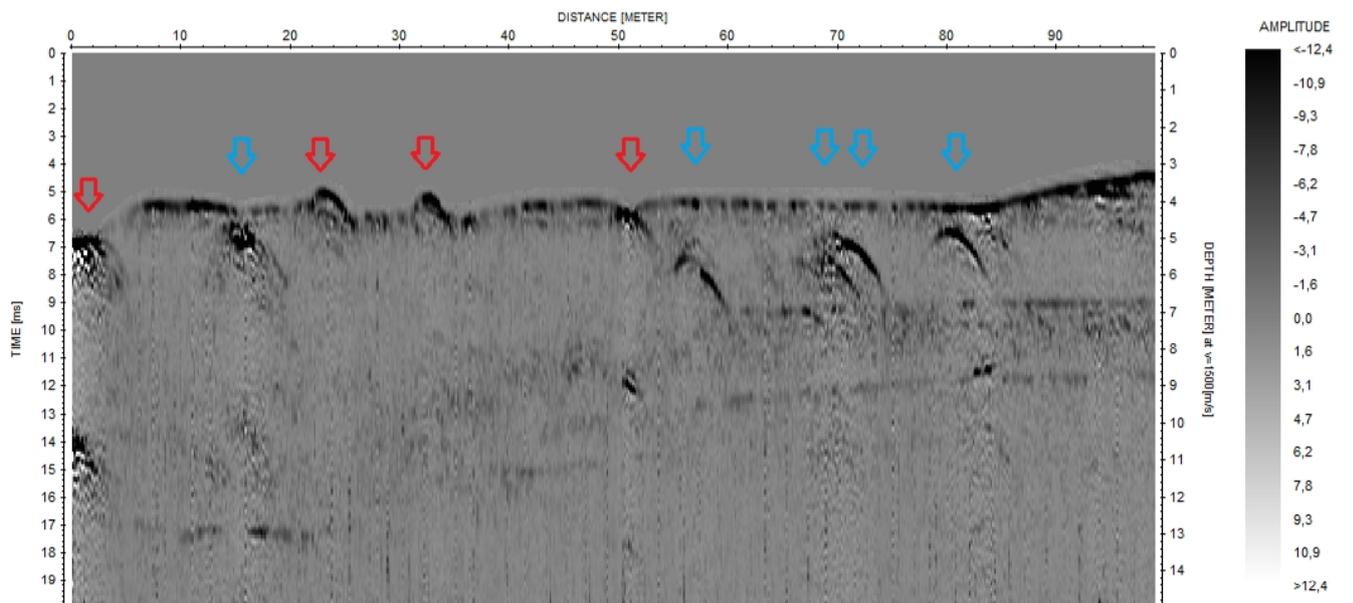


Figura A.5: Perfil sísmico processado referente à linha 9. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup utba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\projeto\final1\PROCDATA\RJL10I_40T / traces: 601 / samples: 217

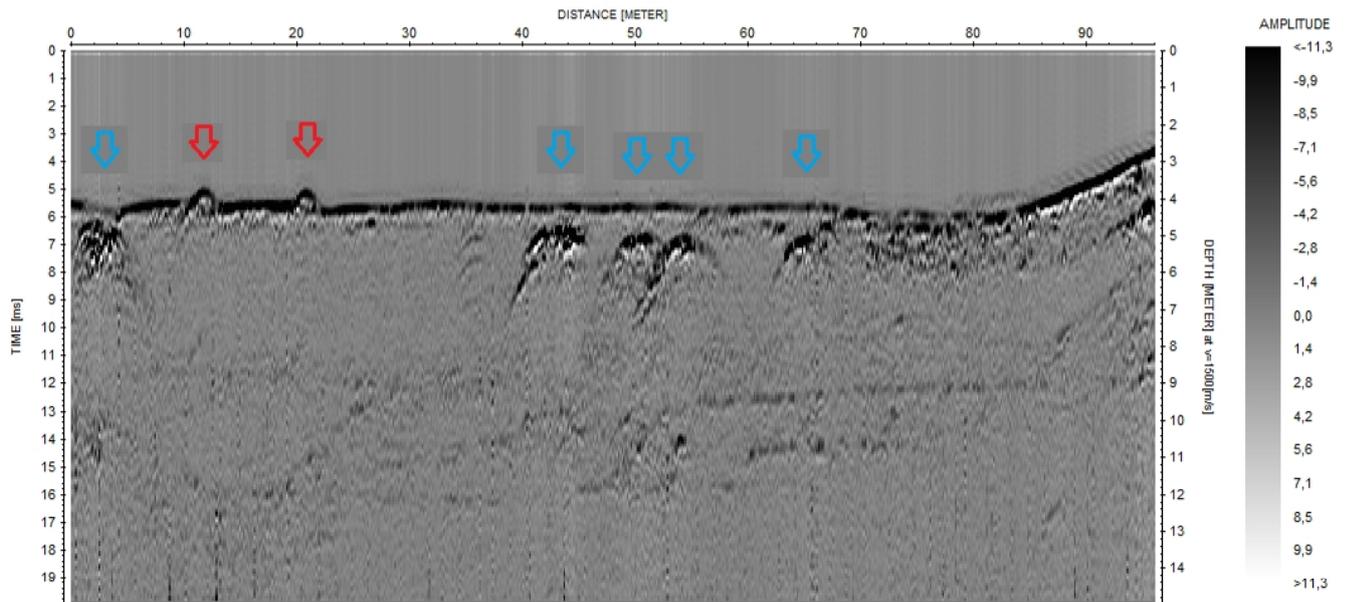


Figura A.6: Perfil sísmico processado referente à linha 10. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup utba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\linha11\PROCDATA\YP000000.04T / traces: 390 / samples: 217

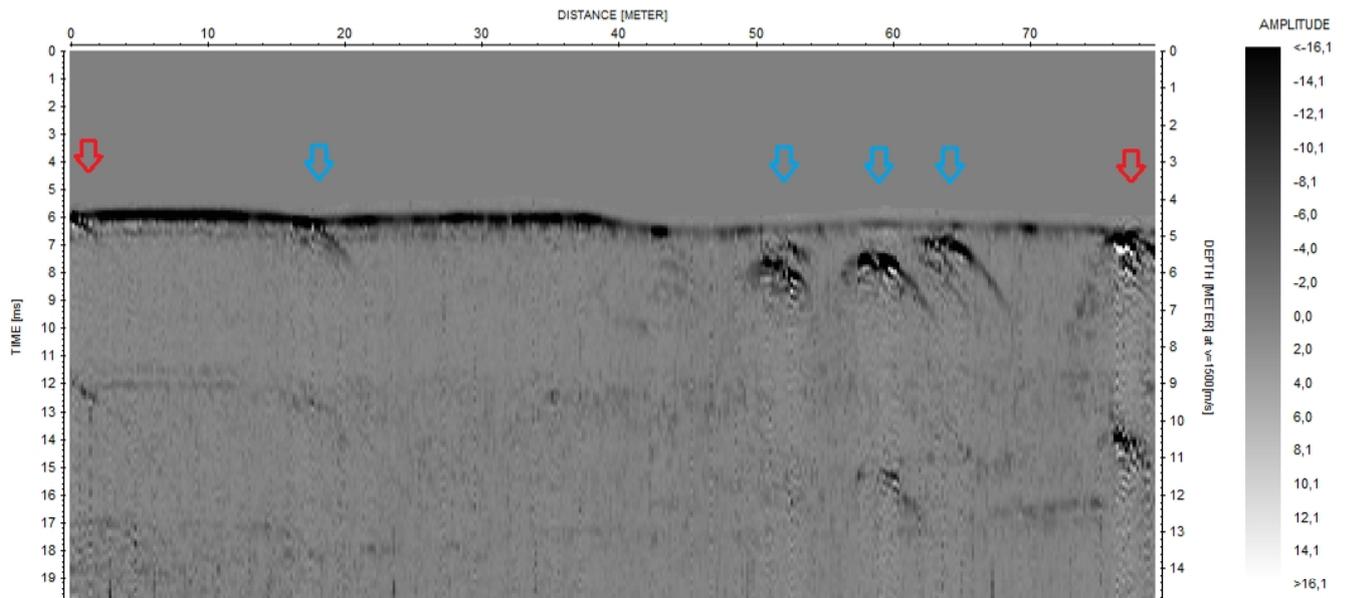


Figura A.7: Perfil sísmico processado referente à linha 11. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup ufba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\linha12\PROCDATA\YP000000.05T / traces: 364 / samples: 217

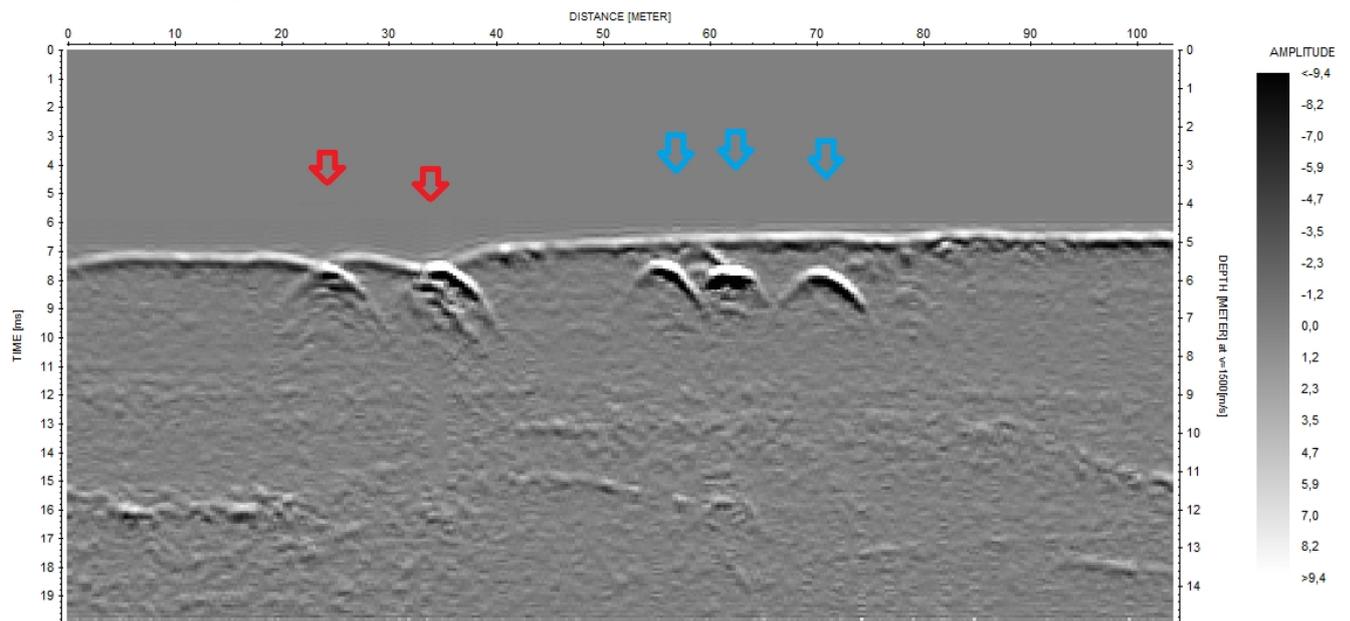


Figura A.8: Perfil sísmico processado referente à linha 12. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup ufba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\linha13\PROCDATA\YP000000.03T / traces: 581 / samples: 217

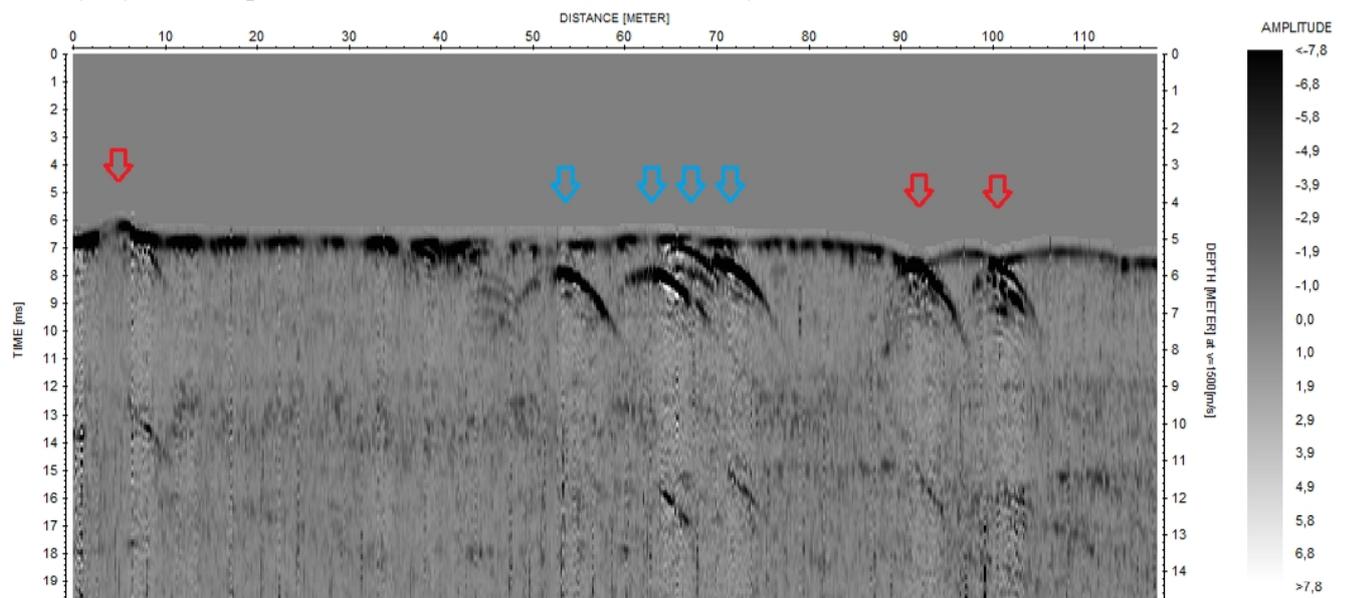


Figura A.9: Perfil sísmico processado referente à linha 13. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).

1. C:\backup ufba\pnud\Danilo\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\linha14\PROCDATA\YP000000.04T / traces: 536 / samples: 217

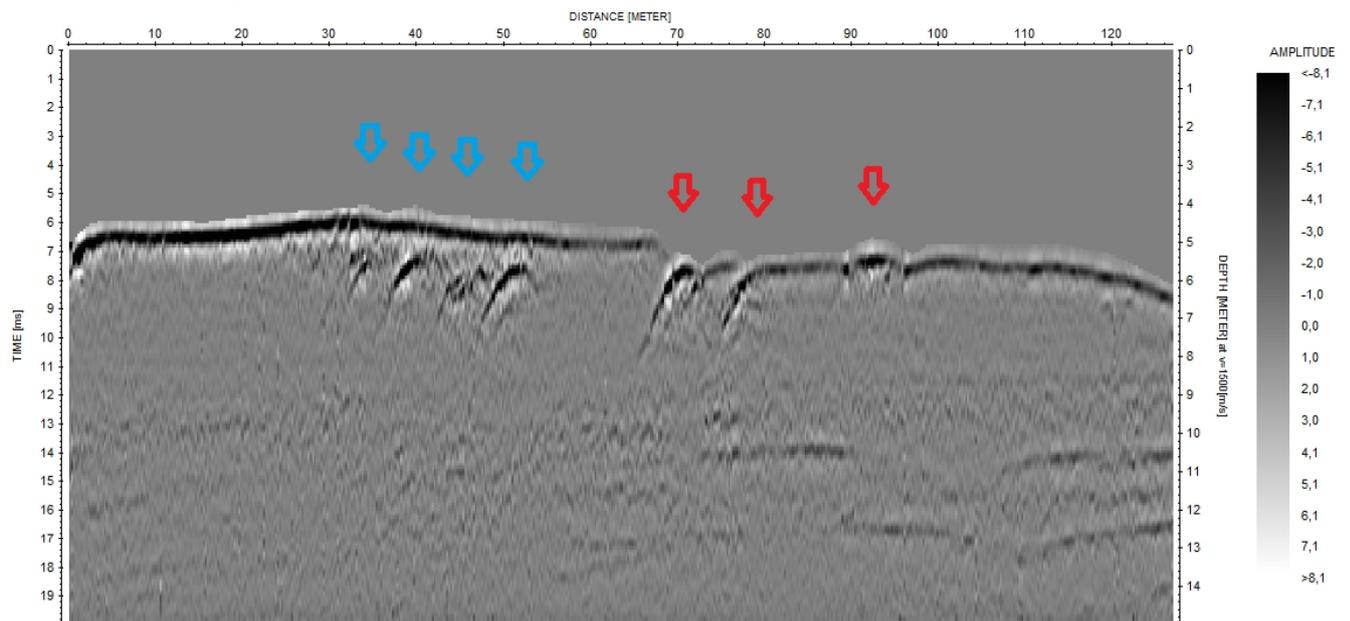


Figura A.10: Perfil sísmico processado referente à linha 14. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorentes).

1. C:\BACKUP UFBA\PNUD\DANILO\MONO_GEO\REFLEX\REFLEX\LINHA15\PROCDATA\YP000000.04T / traces: 946 / samples: 197

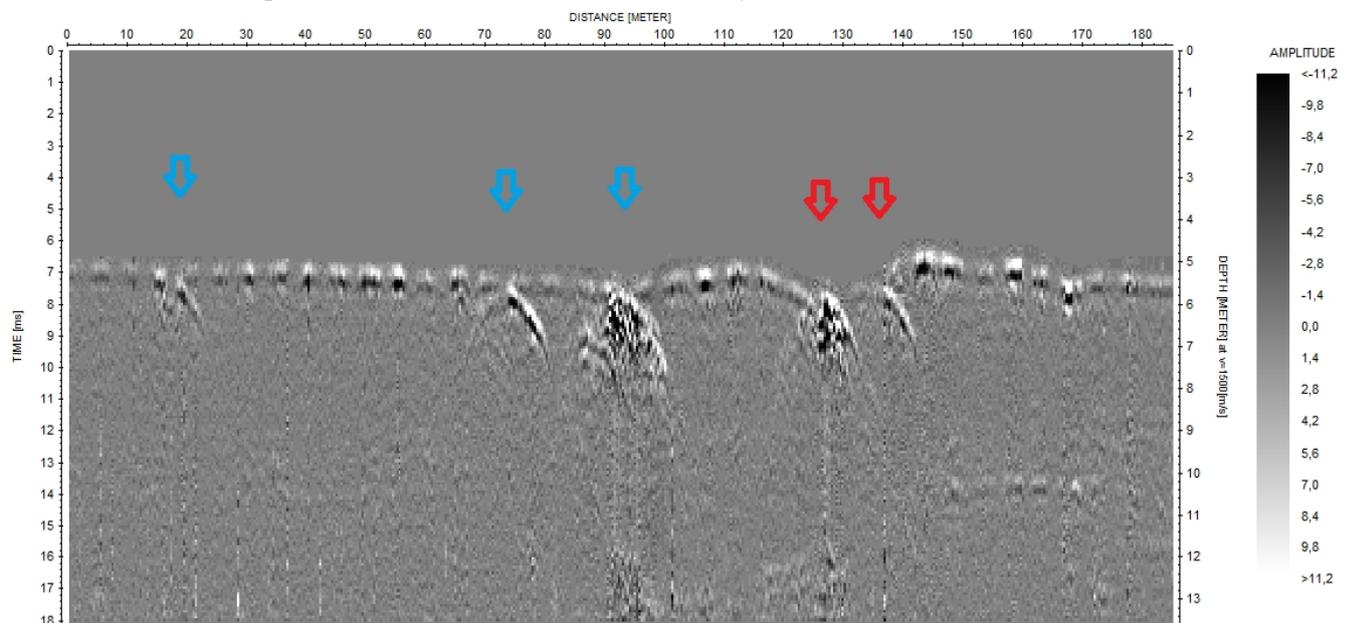


Figura A.11: Perfil sísmico processado referente à linha 15. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorentes).

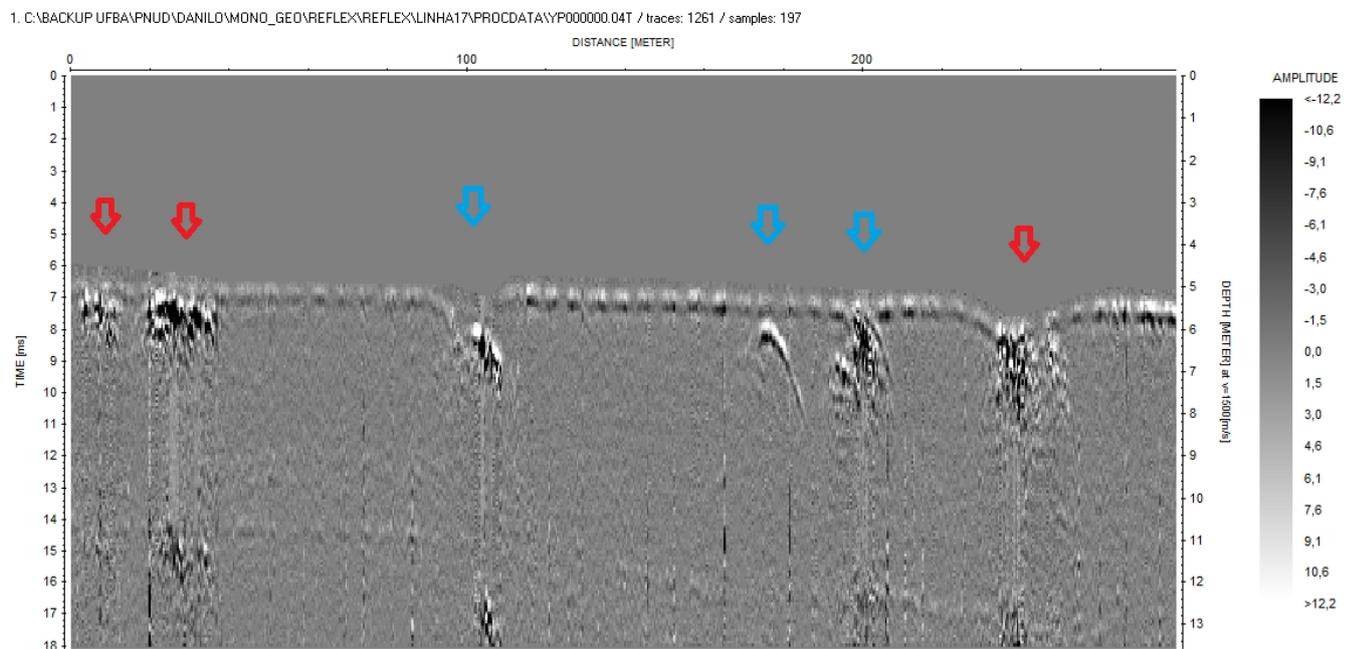


Figura A.12: Perfil sísmico processado referente à linha 17. Os dutos estão indicados por setas azuis (soterrados) e vermelhas (aflorantes).