



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

**HUGO SANTOS DE SOUZA**

**PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS DE ALTA  
RESOLUÇÃO**

**BELÉM-PARÁ  
MARÇO 2014**

**HUGO SANTOS DE SOUZA**

**PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS DE ALTA  
RESOLUÇÃO**

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

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ellen de Nazaré Souza Gomes.

BELÉM-PA  
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

---

S729pe Souza, Hugo Santos de

Processamento de dados sísmicos de alta resolução / Hugo Santos de Souza– 2014

55f. :il

Orientadora:Ellen de Nazaré Souza Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

1. Sísmica rasa. 2. Sísmica de alta resolução. 3. Processamento sísmico. 4. Atenuação de múltiplas de fundo marinho. 5. Deconvolução preditiva. I.Gomes, Ellen de Nazaré Souza, orient. II. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências.III. Título.

CDD 22. ed.: 551.22

---

**HUGO SANTOS DE SOUZA**

**PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS DE ALTA RESOLUÇÃO**

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

Data de Aprovação: 11 / 03 / 2014

Conceito: BOM

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Ellen de Nazaré Souza Gomes – Orientadora  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Marcelo Rollnic – Membro  
Doutor em Oceanografia  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. José Jadsom Sampaio de Figueiredo – Membro  
Doutor em Ciências e Engenharia do Petróleo  
Universidade Federal do Pará

*Aos meus amados pais, Ronaldo e  
Lourdes.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me concedido o dom do conhecimento, e ter me dado saúde e paz de espírito necessária para superar as dificuldades.

Aos meus pais Ronaldo e Lourdes, pelo o amor, incentivo e dedicação que sempre me proporcionaram.

Ao meu irmão, Bruno pelo o apoio através de palavras e conselhos que sempre me motivaram.

À minha namorada, Caroline pelo o amor, carinho, incentivo e companheirismo.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ellen de Nazaré Souza Gomes, pelo o suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas as suas correções e incentivos.

Aos professores que compõem a banca examinadora por terem participado e contribuído para este trabalho.

Aos demais professores da Faculdade de Geofísica pelos ensinamentos e/ou contribuições ao meu trabalho.

Aos amigos Andrei Oliveira, Marcio Lord e a amiga Zoraída por ter me ajudado na parte do processamento e georreferenciamento de dados.

Ao amigo Alberto Jaques por ter contribuído para os meus conhecimentos relacionados à aquisição de dados de sísmica rasa.

Aos amigos e amigas que fiz ao longo do Curso, em especial as pessoas que formavam o nosso grupo de estudo, os amigos Leonardo Reis, Michael Alves, Diego Rogério, Dheymison, Vitor Alfaia, Carol Sena, Alan Silva, João Paulo, David Tupi e Wilber Pinheiro.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*“A persistência é o menor caminho do êxito”.*  
*Charles Chaplin*

## RESUMO

No presente trabalho foi aplicado um fluxo de processamento sísmico para dados marinho 2D de alta resolução, relacionado a um levantamento realizado com o perfilador sísmico de subfundo do tipo *chirp* na Bacia de Campos. O processamento desses dados é fundamental para melhorar a sua baixa razão sinal-ruído, caracterizada principalmente pela presença de reflexões múltiplas de fundo marinho e forte atenuação do sinal sísmico, que dificulta na identificação de informações geológicas na seção. A aplicação do fluxo de processamento foi baseada nas características que os dados de sísmica rasa apresentam como: o tipo de aquisição (monocanal), o comportamento do sinal de alta frequência, tipo de ganho e tipo de filtro, sendo composto por etapas básicas necessárias para um fluxo geral e alguns processos suplementares, na qual se destaca a aplicação da Deconvolução Preditiva que permitiu obter resultados satisfatórios na atenuação de múltiplas de fundo marinho.

Palavras-Chave: Sísmica rasa. Sísmica de alta resolução. Processamento sísmico. Atenuação de múltiplas de fundo marinho. Deconvolução preditiva.

## **ABSTRACT**

It was applied a seismic processing flow for high-resolution 2D marine data, related to a survey realized with the Chirp Sub-Bottom Profiler in the Campos Basin. The processing this data is fundamental to improve their low signal-to-noise ratio, characterized primarily by the presence of multiple reflections of seafloor and strong seismic signal attenuation, which becomes difficult the identification of geological information in the section. The application of processing flow was based according to the characteristics of shallow seismic data presents such as: the type of acquisition (single-channel), the behavior of the high-frequency signal, type of gain and filter type, being composed of basic steps necessary for a general flow and some supplementary processes, in which stand out the application of Predictive Deconvolution that allowed to obtain satisfactory results in multiple attenuation of seafloor.

**Key Words:** Shallow seismic. High resolution seismic. Seismic processing. Attenuation of seafloor multiple reflection. Predictive deconvolution.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1: Subdivisão da investigação sísmica de áreas submersas rasas .....	4
Figura 2: Métodos de sísmica rasa: ecobatímetro, multifeixe, sonar de varredura lateral e perfilador de subfundo.....	5
Figura 3: Fonte acústica tipo <i>boomer</i> , modelo aa251 <i>boomer plate</i> da empresa <i>Applied Acoustics</i> e o receptor através do streamer de hidrofones .....	7
Figura 4: Esquema mostrando os componentes básicos do sistema <i>boomer</i> .....	8
Figura 5: Fonte acústica tipo <i>sparker</i> , modelo squid 200 <i>sparker</i> e seu <i>streamer</i> ,empresa <i>Applied Acoustics</i> .....	9
Figura 6: Esquema mostrando os componentes básicos para o funcionamento do sistema <i>sparker</i> . .....	10
Figura 7: Esquema mostrando os componentes básicos e o funcionamento do sistema <i>chirp</i> .....	11
Figura 8: Fonte acústica do tipo <i>chirp (townfish)</i> e seus componentes.....	12
Figura 9: Localização da Bacia de Campos.....	14
Figura 10: Abertura do oceano atlântico.....	15
Figura 11: Localização da aquisição sísmica realizada na Bacia de Campos, a linha 09 utilizada no processamento encontra-se destacado de amarelo.....	16
Figura 12: Plataforma integrada computador/amplificador ( <i>Topside processor</i> ) e o <i>software</i> de aquisição e processamento <i>Discover Sub Botton 3.52</i> .....	18
Figura 13: Modelo tipo <i>chirp</i> , modelo 3200XS, com um <i>townfish</i> modelo 512i, empresa <i>Edge Tech</i> .....	18

Figura 14: Seção sísmica da linha 09. Na parte rasa do levantamento verifica-se a presença de um possível refletor, demarcado pela a letra R. Na parte mais profunda verifica-se múltiplas de fundo marinho, demarcada pela a letra M. O fundo marinho é demarcado pela a letra F.....	20
Figura 15: Fluxograma das etapas de processamento utilizadas neste trabalho.....	22
Figura 16: Visualização do espectro no domínio f-k (frequência x número de onda), mostrando a concentração das amplitudes nas frequências entre 4 a 8 KHz marcado em vermelho.....	26
Figura 17: Configuração do filtro passa-banda e espectro de frequência do traço 1 mostrando o antes e depois do filtro.....	28
Figura 18: Comparação do traço sísmico, antes e depois da aplicação da correção de divergência esférica.....	30
Figura 19: Visualização da seção sísmica (a) sem o processamento (b) com o processamento que constituiu na aplicação de filtro e correção de amplitude.....	31
Figura 20: Esquema dos procedimentos da deconvolução preditiva .....	33
Figura 21: Comparação do traço sísmico, antes e depois da aplicação da deconvolução preditiva. ....	34
Figura 22: Visualização da seção sísmica: (a) sem processamento (b) com o processamento após a aplicação da deconvolução preditiva.....	35

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGC – Ganho automático controlado (*Automatic Gain Control*)  
ANP – Agência Nacional do Petróleo  
TVG - Ganho variável de tempo (*Time Varing Gain*)  
CDG – Correção de divergência geométrica ou espalhamento esférico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\omega$  - Frequência

$k$  - Numero de onda

$U(\omega, k)$  - Transformada de Fourier do campo no domínio de frequência e número de onda

$t$  - Tempo

$x$  - Distância

$u(x, t)$  Campo no domínio do tempo e espaço

$\rho$  – Densidade de energia

$A$  – Amplitude do sinal sísmico

$r$  – Raio da frente de onda

$\infty$  – Proporcionalidade

$x(t)$  - Traço sísmico ou registro

$\alpha$  - Distância ou *lag* de predição

$*$  - sinal de convolução.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 SÍSMICA DE REFLEXÃO DE ALTA RESOLUÇÃO</b> .....	20
2.1 SÍSTEMA DE PERFILAGEM DE SUBFUNDO .....	20
<b>2.1.1 Fontes Impulsivas</b> .....	21
2.1.1.1 Boomer .....	21
2.1.1.2 Sparker .....	23
<b>2.1.2 Fontes Ressonantes</b> .....	24
2.1.2.1 Chirp .....	24
<b>3 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	28
3.1 GEOLOGIA DA ÁREA .....	28
3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	29
<b>4 PROCESSAMENTO SÍSMICO DE DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO</b> .....	35
4.1 LEITURA DE DADOS .....	36
4.2 GEOMETRIA .....	37
4.3 EDIÇÃO DE TRAÇO .....	38
4.4 ANÁLISE ESPECTRAL .....	39
4.5 FILTROS E GANHOS .....	41
4.6 DECONVOLUÇÃO PREDITIVA .....	46
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	50
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51
<b>APÊNDICE - ETAPAS DO PROCESSAMENTO SÍSMICO REALIZADO</b> <b>    ATRAVÉS DO PROGRAMA REFLEX WIN</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

A sísmica rasa ou de alta resolução compreende métodos sísmicos que investigam alvos rasos (lâmina d'água de menos de 100 m) com uma alta resolução (na ordem de centímetros), utilizando fontes acústicas que emitem pulsos de alta frequência (na ordem de kHz) para identificar as interfaces geológicas em subsuperfície.

Nas últimas décadas este método vem sendo cada vez mais empregado na investigação de áreas submersas como na caracterização de feições (estruturais ou estratigráfica) de fundo e sub-fundo marinho. O crescimento na aplicação deste método se deve ao desenvolvimento da eletrônica digital e da micro-informática, que possibilitou o surgimento dos pequenos sismógrafos digitais e sistemas para processamento de sinais sísmicos em micro computadores. Dentre as aplicações destacam-se a utilização do método no mapeamento do Quaternário, na investigação de processos sedimentares, na engenharia costeira, na exploração mineral e nos estudos de habitats subaquáticos e entre outros temas (AYRES NETO, 2000; WESCHENFELDER, 2005; SOUZA, 2006; GOMES, 2008).

Apesar do grande avanço tecnológico, a sísmica de reflexão apresenta uma grande dificuldade em relação à melhoria da qualidade do imageamento sísmico. Um dos principais fatores que afeta diretamente a qualidade das imagens sísmicas são os ruídos. Os ruídos são eventos indesejáveis que atuam sobrepondo as informações de interesse, podendo ser classificado como coerentes ou aleatórios, e relacionados ou não ao levantamento (YILMAZ, 2001). Dentre os ruídos que se encontram presentes neste tipo de dado destacam-se as múltiplas de fundo marinho.

As múltiplas de fundo marinho são registros repetidos de reflexões primárias que ficam reverberando na lâmina d'água até serem totalmente dissipadas no meio. Apresentam menor energia que as reflexões primárias e se caracteriza por ser um evento coerente em virtude de sua repetição periódica. No caso da sísmica rasa, que geralmente são realizados em uma lâmina d'água de pouca profundidade, as múltiplas ocorrem em menor período de tempo, interferindo na identificação de reflexões primárias oriundas de camadas rasas e mascarando a seção com falsa informação sobre a geologia da área, promovendo em muito dos casos uma interpretação errada do local.

A necessidade de técnicas para o tratamento desses dados é considerada de

extrema importância para o avanço dessas práticas, tornando um processo indispensável para a identificação de informações geológicas.

Baseado neste contexto, este trabalho tem como principal objetivo atenuar as reflexões múltiplas de fundo marinho de um dado real 2D da bacia de Campos, adquirido através do levantamento sísmico de alta resolução com o perfilador de subfundo X-Star (*chirp*), realizado em conjunto com o laboratório de Oceanografia e Geofísica Marinha, da Universidade Federal do Pará (UFPA), com o intuito de fornecer subsídio na construção de um porto na área.

Para isso foi proposto um fluxo aplicado para o processamento de dados sísmicos de alta resolução bastante simplificado em que a metodologia utilizada para atenuar as múltiplas foi a deconvolução preditiva, que através de um filtro de predição, prediz e suprime esses eventos indesejáveis. Para a validação das etapas desse fluxo, foi utilizado o programa de processamento Reflex Win versão 6.0.

O desenvolvimento deste trabalho pode ser descrito nos seguintes capítulos: No segundo capítulo é apresentado a sísmica de reflexão de alta resolução, o terceiro capítulo apresenta a área de estudo que foi realizado o levantamento, o quarto capítulo aborda detalhadamente as etapas do processamento sísmico aplicado e seus resultados e no último capítulo temos as conclusões e recomendações.

## 2 SÍSMICA DE REFLEXÃO DE ALTA RESOLUÇÃO

O termo sísmica de reflexão de alta resolução surgiu com o objetivo de diferenciar a sísmica de reflexão convencional utilizada para investigação profunda (na ordem de centenas de metros) da sísmica utilizada para alvos mais rasos e menores (na ordem de centímetros a dezenas de metros), que caracterizam-se como meios ou interfaces geológicas de baixos contraste de impedância acústica, que apresentam baixa relação sinal/ruído e se constituem em fortes atenuadores de sinais de alta frequência. Comumente a investigação destes meios necessita de fontes acústicas que emitam pulsos de frequência mais altos, além de apresentarem elevada taxa de amostragem permitindo uma leitura sísmica de alta resolução. Apesar de este método ser baseado em princípios e conceitos que foram herdados da sísmica de reflexão convencional, essas duas técnicas se diferem na metodologia da aquisição de dados, das fontes acústicas, nos espectros de frequência emitidos, nos tipos de receptores, no processamento dos dados e até mesmo na interpretação da seção sísmica (SOUZA, 2006).

Os levantamentos de sísmica rasa são bastante aplicados em áreas submersas, na qual destacam-se a investigação de superfícies submersas e a investigação de subsuperfície. O primeiro caracteriza-se por utilizar fontes acústicas que possuem espectros de altas frequências, geralmente superiores a 30 kHz, para o imageamento da superfície do fundo marinho, sendo aplicado na investigação de topografia de fundo ou da profundidade da coluna d'água. Ecobatimetria (simples, dupla ou multifeixe) e a sonografia de varredura lateral constituem os principais métodos sísmicos empregados (SOUZA, 2006).

A ecobatimetria caracteriza-se por emitir pulsos acústicos com frequência superior a 30 kHz, que se propagam pela coluna d'água e são refletidos pelo fundo marinho, e ao retornarem ao transdutor são convertidos em impulsos elétricos que permite calcular a velocidade do som na água (tempo de chegada) através de cada eco recebido de acordo com diferentes algoritmos que descrevem o sinal através de características como amplitude, comprimento de onda e fase que é registrado em um computador em tempo real. Este sistema pode ser utilizado em multifeixes, na qual é usado uma faixa de frequência conhecida que atua por varredura cobrindo uma determinada área, sendo geralmente aplicado para levantamentos de larga escala. Em contraste com o monofeixe em que é emitido um pulso de frequência, cobrindo

apenas um determinado ponto que não é registrado em tempo real (AYRES NETO, 2000; SOUZA, 2006).

O sonar de varredura lateral é um equipamento rebocado por uma embarcação que emite um feixe lateral de ondas acústicas de frequência que podem alcançar até 500 KHz, produzindo uma imagem acústica do fundo do mar através do eco do sinal emitido que são registrados no equipamento, dependendo do modelo do sonar, a capacidade de varredura máxima pode alcançar a ordem de 2 mil metros (mil metros para cada lado). São sistemas que apresenta maior resolução quando comparados as outras fontes acústicas (AYRES NETO, 2000).

Para a investigação de subsuperfície, são utilizados os perfiladores de subfundo para obter informações da espessura da coluna sedimentar ou da profundidade do embasamento rochoso. Com esta finalidade destacam-se os métodos que utilizam fontes acústicas do tipo *boomers*, *sparkers* e *chirps* que emitem pulsos sísmicos com espectros de frequência inferiores a 20 kHz (SOUZA, 2006).

A Figura 1 mostra a subdivisão da investigação sísmica de áreas submersas rasas apresentando as fontes sísmicas utilizada e a frequência que é emitida neles de acordo com o objetivo da investigação. Na investigação de superfície de áreas submersas o objetivo é o mapeamento do fundo oceânico enquanto que na investigação de subsuperfície é o mapeamento do subfundo oceânico.

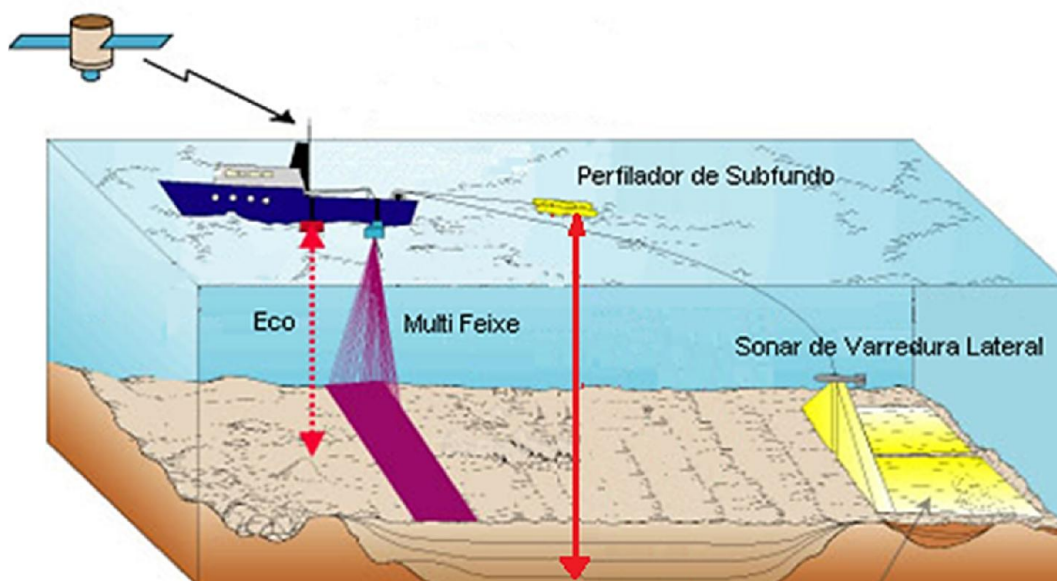
Figura 1 - Subdivisão da investigação sísmica de áreas submersas rasas.

INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIE	<p><b>Sonar de Varredura Lateral</b>  <b>&gt; 100 KHz</b></p>	fundo oceânico
	<p><b>Ecobatímetros</b>  <b>(monofeixe e multifeixes)</b>  <b>&gt; 30 KHz</b></p>	
INVESTIGAÇÃO DE SUBSUPERFÍCIE	<p><b>Perfiladores de Subfundo</b>  <b>(Boomers, Sparkers e Chirps)</b>  <b>0,5 a 20 KHz</b></p>	subfundo oceânico

Fonte: Souza, 2006 (modificado)

A Figura 2 apresenta as principais fontes acústica para o método de sísmica de alta resolução: O ecobatímetro, o multifeixe, o sonar de varredura lateral e o perfilador sísmico contínuo. Estes equipamentos de sísmica rasa que se diferenciam basicamente pela frequência e potência de emissão dos sinais.

Figura 2 - Métodos de Sísmica Rasa: Ecobatímetro, Multifeixe, Sonar de Varredura Lateral e Perfilador de Subfundo.



Fonte: Gomes, 2009 (modificado)

Segundo Tóth et al. (1997) e Souza (1988) no estudo de áreas submersas, os métodos acústicos ou sísmicos apresentam diversas vantagens quando comparados com outros métodos geofísicos, dentre as quais podem ser ressaltadas:

- A grande precisão e resolução dos sinais sísmicos.
- O produto em tempo real é um perfil contínuo onde se identificam os refletores (interfaces geológicas) em subsuperfície à medida que o dado é adquirido no levantamento, sem a necessidade de complexos processamentos dos dados.
- Os perfis obtidos em campo, em tempo real, podem ser interpretados praticamente como uma seção geológica sobrelevada, possibilitando que decisões estratégicas possam ser tomadas durante a própria aquisição de dados.

- Os levantamentos podem ser conduzidos em embarcações de pequeno e médio porte que se movem a velocidades superiores a 6 km/h, o que possibilita a rápida e ampla cobertura da área investigada.
- Fontes acústicas não explosivas podem ser utilizadas (*boomers, sparkers e chirp*) sem prejuízos ou restrições ambientais;
- A geração de ondas acústicas na superfície de água é relativamente fácil bem como a propagação das ondas acústicas no meio, já que sofrem pouca absorção na coluna d'água.

Neste trabalho será abordado de forma mais detalhada os métodos sísmicos de investigação de subsuperfície, haja vista que os dados que foram usados para o desenvolvimento do fluxo de processamento foram adquiridos através de um perfilador de subfundo.

## 2.1 SISTEMA DE PERFILAGEM DE SUBFUNDO

Os perfiladores de subfundo são geralmente composto por uma fonte que envia pulsos acústicos na água que se propagam nos sedimentos do fundo e subfundo marinho. Estes pulsos refletem nos diferentes tipos de rocha de acordo com a diferença de impedância acústica. Os tempos de chegada dessas reflexões são registrados pelo o receptor (monocanal ou multicanal), e assim, é construído um imagem da subsuperfície.

Existem diversos tipos de perfiladores de subfundo que operam com bandas de frequências diferentes, dentre eles estão aquelas que emitem um amplo espectro de frequência num menor tempo possível, denominadas de fontes impulsivas e aquelas que emitem um determinado espectro de frequência ao longo de um intervalo pré-definido, denominadas fontes ressonantes (MCGEE, 1995). Estas fontes acústicas são escolhidas de acordo com o objetivo da pesquisa, a partir das necessidades de maior penetração, que demanda fontes que emitem baixas frequências, e de maior resolução, o que demanda fontes acústicas que emitem largas bandas de altas frequência (SOUZA, 2006).

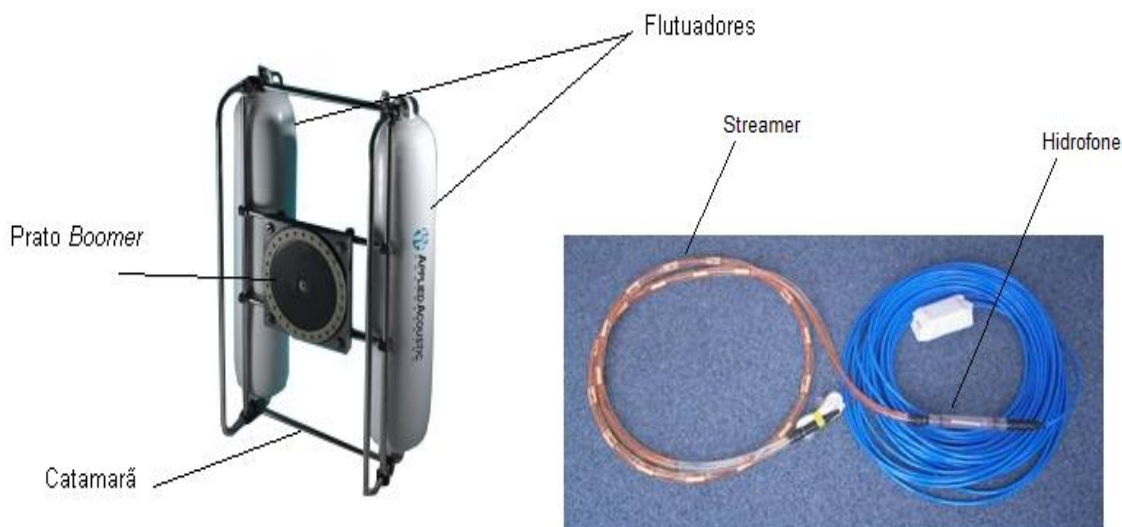
### 2.1.1 Fontes Impulsivas

As fontes acústicas impulsivas são aquelas que liberam grande quantidade de energia em um intervalo de tempo que idealmente é próximo de zero. Dentre os perfiladores sísmicos que utilizam estes tipos de fonte destacam-se os *Boomers* e os *Sparkers*.

#### 2.1.1.1 – Boomer

O sistema *Boomer* consiste em duas unidades separadas espacialmente, conforme mostra a Figura 3. Um catamarã onde o transmissor é montado (placa *boomer*) e um receptor (*streamer* com *hidrofone*, podendo ser monocanal ou multicanal), que são rebocado por uma embarcação, pelo menos 1 m um do outro e são arrastados pela água.

Figura 3 - Fonte acústica tipo *Boomer*, modelo AA251 *Boomer plate* da empresa *Applied Acoustics* e o receptor através do *streamer* de *hidrofones*.

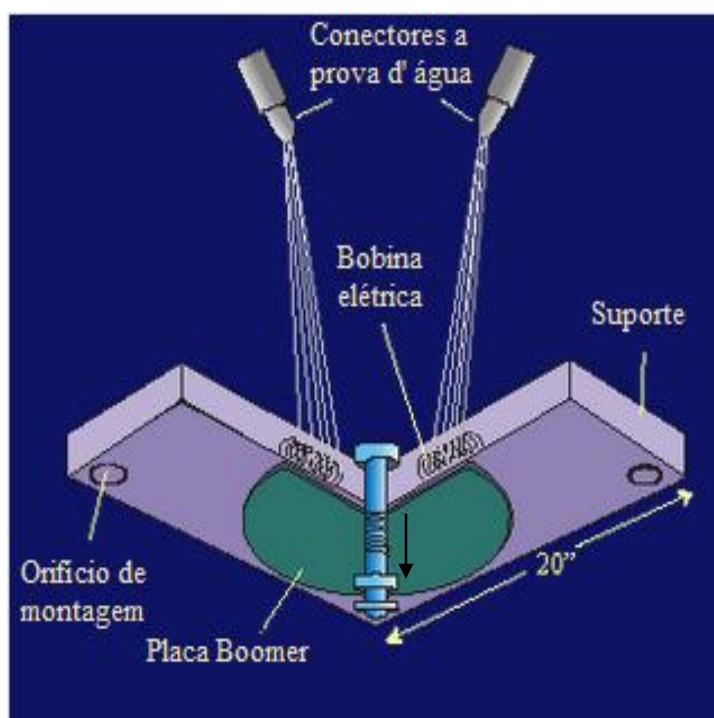


Fonte: Applied Acoustics, 2013.

O princípio deste tipo de fonte está relacionado com o rápido deslocamento da massa d'água, que é gerado através de um dispositivo que compreende a uma placa rígida de alumínio conectada a uma mola abaixo de um uma bobina elétrica, conhecido como "*prato boomer*". Quando a energia elétrica gerada por uma fonte de

alimentação e de bancos de capacitores a bordo é descarregada através da bobina elétrica e a indução eletromagnética gerada força a placa de alumínio rapidamente para baixo como mostra a Figura 4. Este movimento energético gera ondas acústicas com uma banda larga de alta amplitude na coluna d'água que se propagam em sub-superfície e são registradas pelo o *hidrofone* através do tempo de registro de suas reflexões (KRAMER ET AL, 1968; TRABANT, 1984; MCGEE, 1995).

Figura 4 – Esquema mostrando os componentes básicos do sistema *boomer*.



Fonte: Kramer et al, 1968 (modificado)

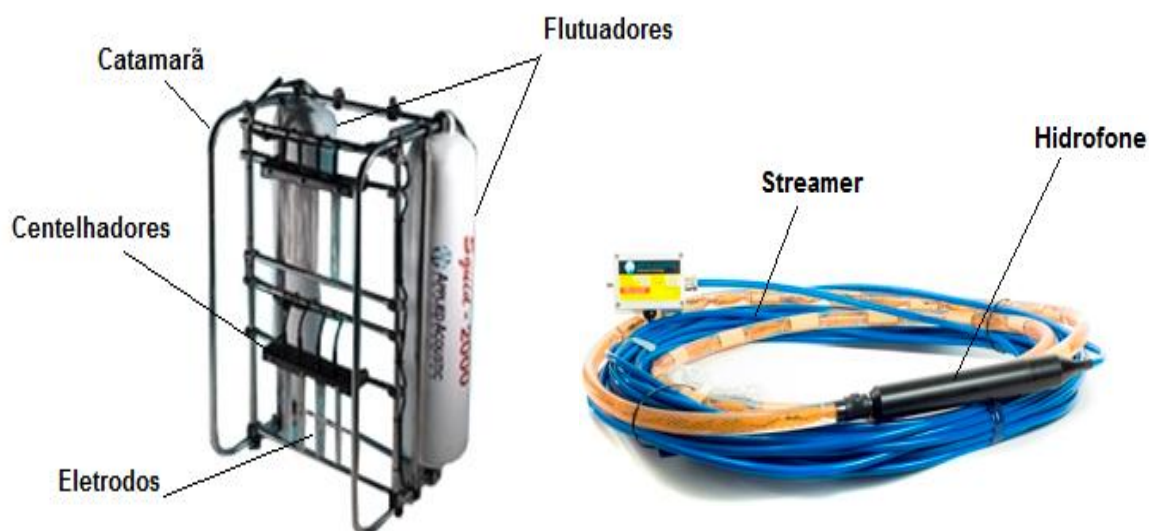
Estas fontes podem absorver até 1000 J de energia e, portanto, com alta potência tornam viável a emissão de sinais de um amplo espectro de frequências de 300 Hz – 10 kHz, tem sido uma das fontes mais utilizadas na sismica de alta resolução, possibilitando a obtenção de excelentes registros sísmicos com grande penetração no substrato. A resolução do sistema *Boomer* varia de 0,5 a 2m e penetração que varia tipicamente entre 50 a 200 metros, dependendo do tipo de sedimento (MCGEE, 1995; MOSHER; SIMPKIM, 1999; FOSTER; POPPE, 2003).

Entretanto, esta fonte acústica apresenta limitações quando utilizado em áreas submersas de coluna d'água muito rasa, interferências ocorrem no espectro de frequências que acabam por prejudicar a resolução do sistema.

### 2.1.1.2 - Sparker

O *Sparker* baseia-se nos tipos de fonte explosiva e similar ao *Boomer* são constituídos por duas unidades separadas espacialmente: Transmissor (Catamarã) e um receptor (streamer multi ou monocanal), conforme mostra a Figura 5.

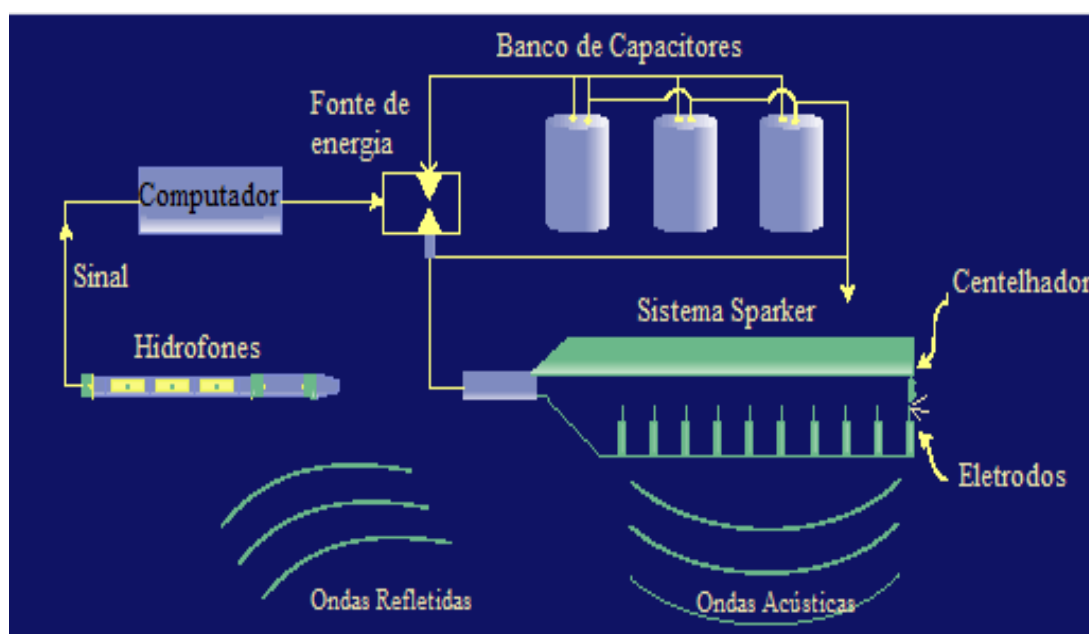
Figura 5 – Fonte acústica tipo *sparker*, modelo *Squid 200 Sparker* e seu *streamer*, empresa *Applied Acoustics*.



Fonte: Applied Acoustics, 2013.

Este sistema é conectado a um banco de capacitores instalado e gerenciado na embarcação que gera uma corrente elétrica de alta voltagem para uma série de centelhadores (montado em um catamarã), produzindo uma descarga elétrica nos eletrodos que se encontram num meio condutor (p.ex. água do mar), conforme mostra a Figura 6. A descarga elétrica no meio condutor aquece e gera uma bolha de vapor de alta potência podendo absorver energia de 100 J a 30 kJ e com grande poder de emissão de amplos espectros de frequências na ordem de 50 Hz a 4 kHz, que em rápida expansão gera um impulso positivo que se propaga na coluna d'água gerando o sinal desejado. A emissão desses pulsos permitiu uma resolução que varia de 0,5 a 10 m e penetração de até 500 metros de profundidade (TRABANT, 1984; MOSHER; SIMPKIM, 1999).

Figura 6 – Esquema mostrando os componentes básicos para o funcionamento do sistema *sparker*.



Fonte: Trabant, 1984 (modificado)

Entretanto apresentam uma pobre repetitibilidade, limitada directividade e a presença de interferências destrutivas ao espectro de frequências de interesse, devido a bolha de vapor criada com a descarga elétrica ter limites de expansão, e, assim, quando colapsa, acaba por gerar um segundo sinal acústico (MOSHER; SIMPKIM, 1999).

### 2.1.2. Fontes Ressonantes

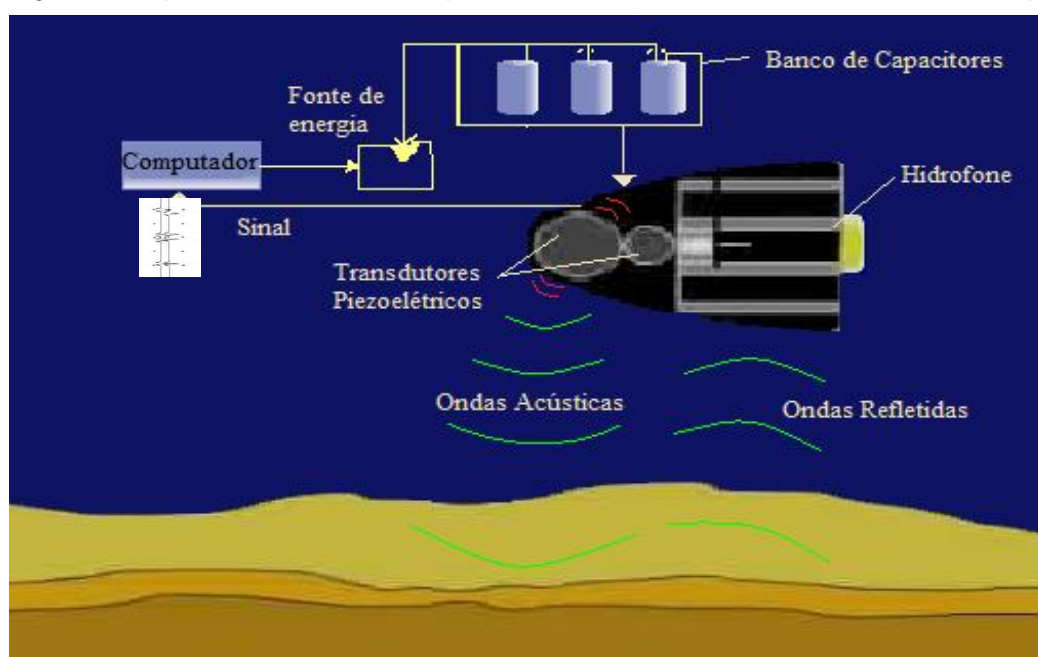
Este tipo de fonte produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitivo e origina-se a partir da frequência de ressonância de pastilhas (cristais piezelétricas). Dentre as fontes que utilizam esse sistema destacam-se o tipo *chirp*, que emitem amplos espectros de frequências num determinado intervalo de tempo.

#### 2.1.2.1 Chirp

Estes sistemas baseiam-se no princípio de que um campo elétrico aplicado sobre transdutores piezelétrico (montados no casco de um navio ou num peixe rebocado (*townfish*) dentro de água a uma distância entre 10 e 30 m do fundo do mar), que resulta na produção de um trabalho mecânico proporcional à intensidade do campo elétrico aplicado. Se a frequência do campo elétrico aplicado é próxima da frequência

de ressonância do material do transdutor, a energia elétrica é facilmente convertida em energia mecânica e, por conseguinte, em movimento de vibração da pastilha, que é facilmente transmitido à massa de água existente ao redor da fonte conforme mostra a Figura 7. Este processo é reversível, ou seja, a pressão da água sobre o transdutor gera um sinal elétrico que no receptor indica o retorno do sinal emitido (MOSHER; SIMPKIM, 1999, GOMES, 2009).

Figura 7 - Esquema mostrando os componentes básicos e o funcionamento do sistema *chirp*.



Fonte: Autor

O pulso acústico gerado pela vibração de transdutores piezoelétricos atinge um amplo espectro de frequência modulado (FM) que varia de 0,5-20 kHz (dependendo do modelo *townfish*), sendo possível obter uma resolução melhor que 10 cm e penetrações no sedimento da ordem de dezenas de metros. O sistema *chirp* são digitais e disponibilizam várias alternativas operacionais que permitem, por exemplo, o controle total do espectro de frequências e das características dos pulsos emitidos, havendo a possibilidade de aumentar a potência do sinal transmitido, aumentando consequentemente a penetração do sinal emitido que pode alcançar a ordem de 200m, a despeito da perda parcial da resolução. Por esta razão, o sistema do tipo *chirp* minimiza as limitações que são sofridas pelas as fontes ressonantes (MCGEE, 1995; GOMES, 2009).

O uso de fontes ressonante do tipo *chirp* ou de forma de onda controlada na investigação de áreas submersas tem uma série de vantagens como: a enorme facilidade operacional (grande manobrabilidade devido ao pequeno porte e são ao mesmo tempo emissores e receptores), o baixo custo de manutenção, a alta taxa de repetibilidade, eficiência (alta relação sinal/ruído) e a facilidade de ser utilizada até mesmo em grandes profundidades (SOUZA, 2006; GOMES, 2009).

A Figura 8 mostra uma fonte *chirp*, modelo X-Star (*townfish* 512i) da empresa Edge Tech, apresentando todos os seus acessórios principais como capacitores, *hidrofones*, *towcable*, transdutor e flutuadores. Estes modelos caracterizam-se pela a distância fonte-receptor ser mínima (afastamento), e, então registrar o tempo duplo da incidência normal da onda acústica gerada.

Figura 8 – Fonte acústica do tipo *chirp* (*townfish*) e seus componentes.



Fonte: Gomes, 2009

Existem diversos modelos de fontes do tipo *chirp*, eles estão associados ao veículo hidrodinâmico chamado *townfish*, cada modelo apresenta características diferentes como o espectro de frequência emitido, resolução, penetração e dimensão. O modelo *townfish* adequado é escolhido de acordo com a necessidade de penetração e resolução do levantamento. A Tabela 1 mostra as características dos três modelos de fontes do tipo *chirp* fabricados pela empresa americana *Edge Tech*.

Tabela 1 – Especificações dos modelos de fontes do tipo *chirp* da empresa EdgeTech.

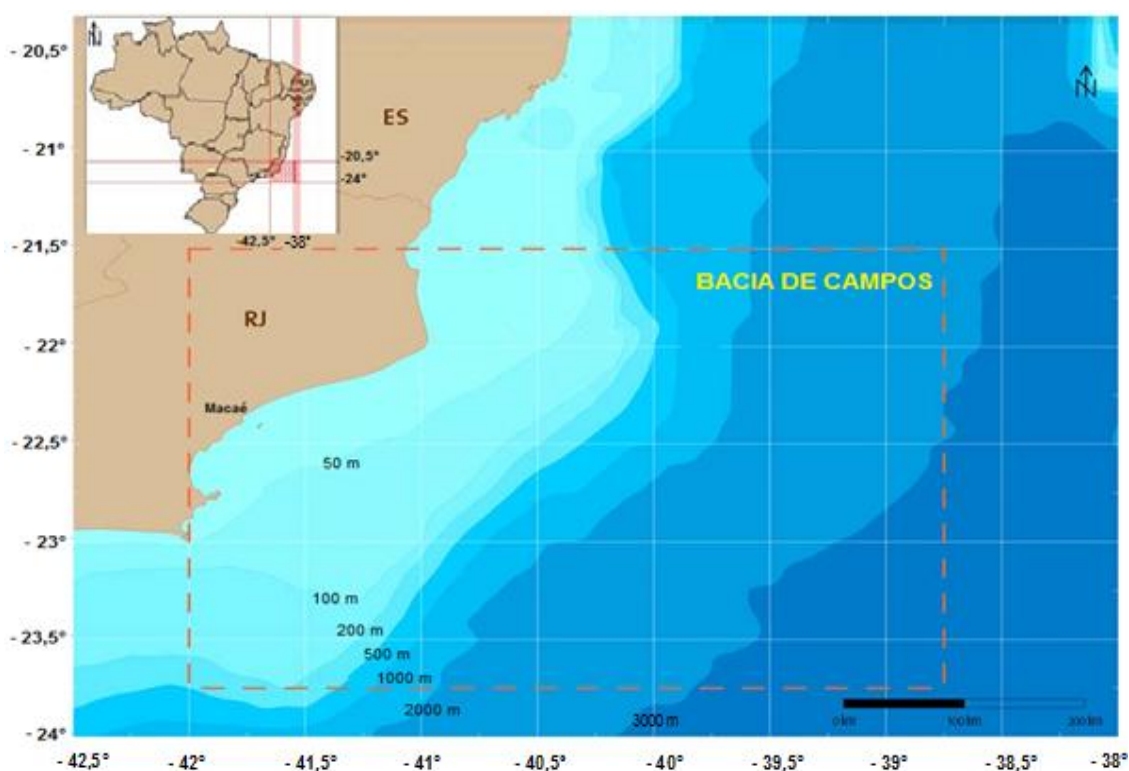
Modelo da Fonte	SB-512i	SB-216S	SB-424
Espectro de frequências	500Hz–12KHz	2-16 KHz	4-24 KHz
Resolução Vertical (depende do pulso selecionado)	8-20 cm	6-10 cm	4-8 cm
Penetração:			
Areia	20 metros	6 metros	2 metros
Grossa	200 metros	80 metros	40 metros
Argila			
Comprimento	160 cm	105 cm	77 cm
Largura	124 cm	67 cm	50 cm
Altura	47 cm	40 cm	34 cm
Peso no ar	204 Kg	76 Kg	45 Kg
Peso na água	68 Kg	32 Kg	18 Kg
Máxima profundidade	300 metros		

Fonte: EdgeTech, 2013.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Campos localiza-se no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro e estende-se até ao sul do Estado do Espírito Santo, abrange uma área de 115.800 km<sup>2</sup> até cota batimétrica de 3.000 metros. Uma pequena parte dessa área (cerca e 500 km<sup>2</sup>) encontra-se emersa no continente, conforme mostra a Figura 9. Em águas rasas, limita-se a norte com a Bacia do Espírito Santo, pelo Alto de Vitória, e a sul, com a Bacia de Santos, pelo Alto de Cabo Frio. Em águas profundas não existe separação estrutural entre as bacias de Campos e Espírito Santo e também entre Campo e Santos.

Figura 9 – Localização da Bacia de Campos.



Fonte: ANP, 2013 (modificado)

#### 3.1 GEOLOGIA DA ÁREA

A origem da Bacia de Campos, é semelhante à das demais bacias sedimentares offshore da margem continental leste brasileira, está relacionada à ruptura crustal do continente Gondwana e à formação do Oceano Atlântico Sul conforme mostra a Figura 10. A partir do Mesozoico ocorreu o rifteamento que culminou na deriva continental entre dois extensos e rígidos blocos - América do Sul

e África – e os sedimentos recobrendo as suas bacias marginais têm sido depositados desde o Jurássico até o Recente (CHANG ET AL., 1992).

Figura 10 – Abertura do oceano atlântico



Fonte: Ponte; Asmmus, 1978

A evolução tectono-sedimentar da bacia pode ser representado por três megasequências principais: uma megasequência continental, correspondente à fase rifte ocretácea; uma megasequência transicional afetada por halocinese<sup>1</sup>, com falhamentos lístricos<sup>2</sup>, relacionada ao estágio proto -oceânico, ou fase drift; e, finalmente, uma megasequência marinha franca (carbonática no início e predominantemente siliciclástica posteriormente) (DIAS ET AL., 1990).

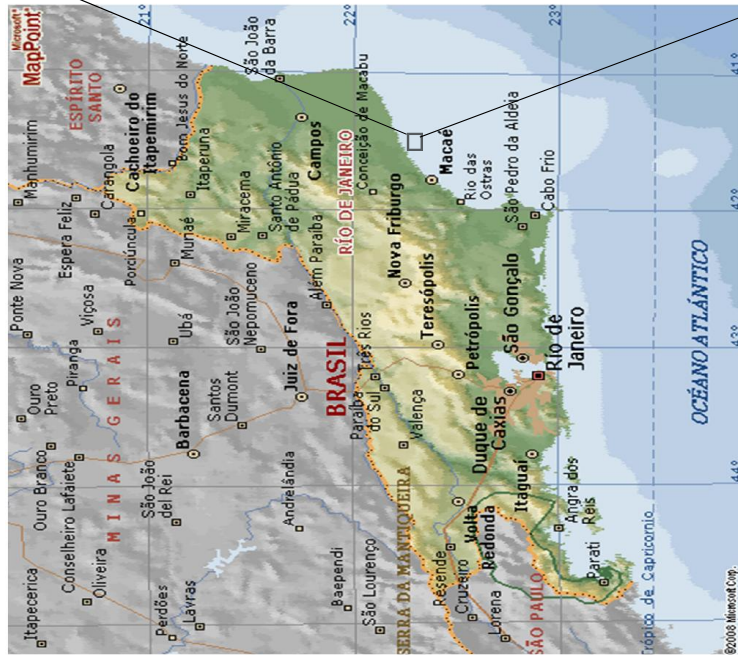
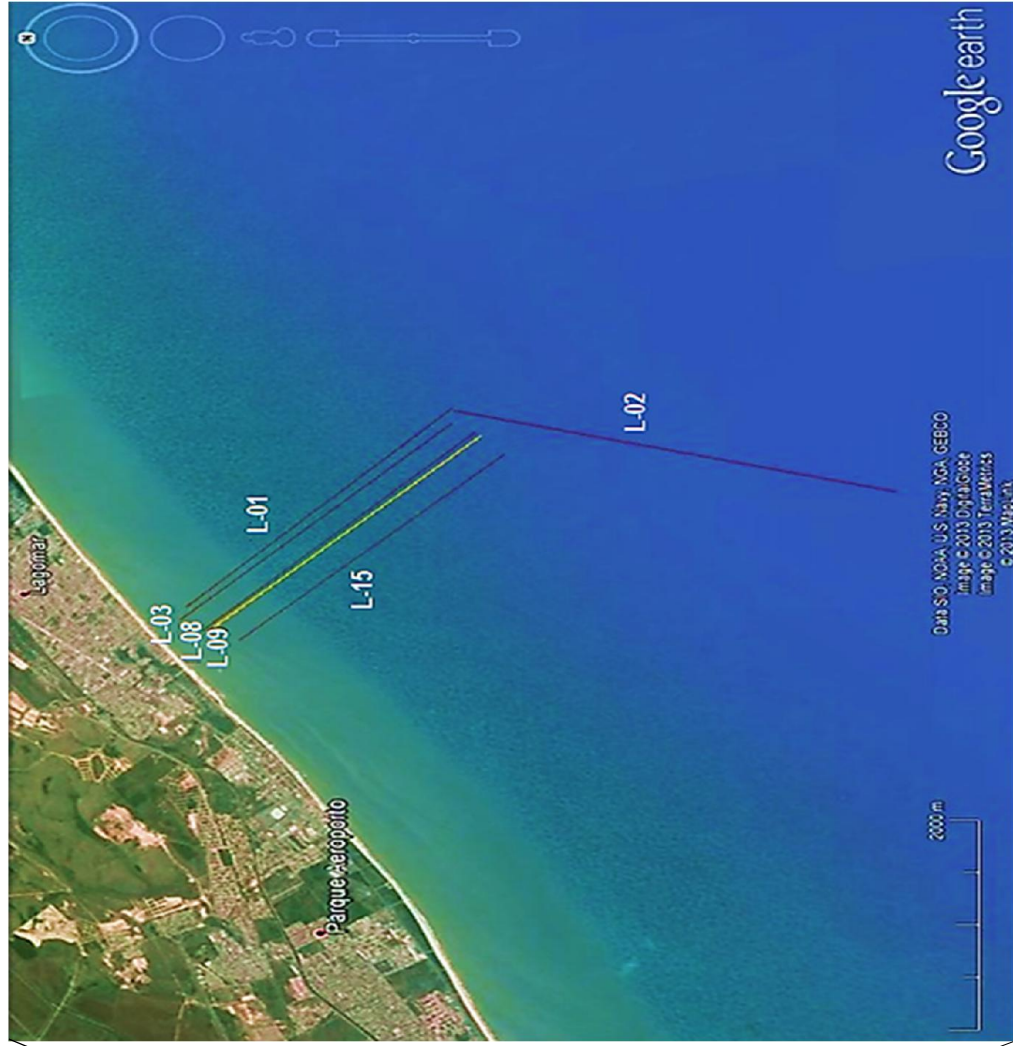
### 3.2 – AQUISIÇÃO DOS DADOS

A Linha sísmica marinha 2D utilizada nesse trabalho refere-se a uma aquisição datada no ano de 2012 e encontra-se localizada na parte offshore, ao sul da Bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro, situado às margens da cidade de Macaé e limitada pela as coordenadas: S 22°19',4247 – W 41°42',6827/ S 22°20',8175 – W 41°41',3220. Corresponde a linha 09 (destacada em amarelo) de um conjunto de linhas realizadas na aquisição sísmica (Figura 11), que teve como objetivo fornecer subsídio na construção de um porto na área.

<sup>1</sup> Movimentação do material salífero

<sup>2</sup> Falhamentos de superfície curva, em geral com a concavidade para cima, que se horizontaliza com a profundidade. O termo diz respeito somente à geometria da superfície da falha.

Figura 11 – Localização da aquisição sísmica realizada na Baía de Campos, a linha 09 utilizada no processamento encontra-se destacado em amarelo.



Fonte: Autor

A linha 09 apresenta uma extensão e 3.490 metros com um total e 13.295 tiros com recepção monocanal. A Tabela 2 abaixo mostra mais detalhes da geometria do levantamento sísmico.

Tabela 2 – Informações sobre a geometria da aquisição de dados da linha 9.

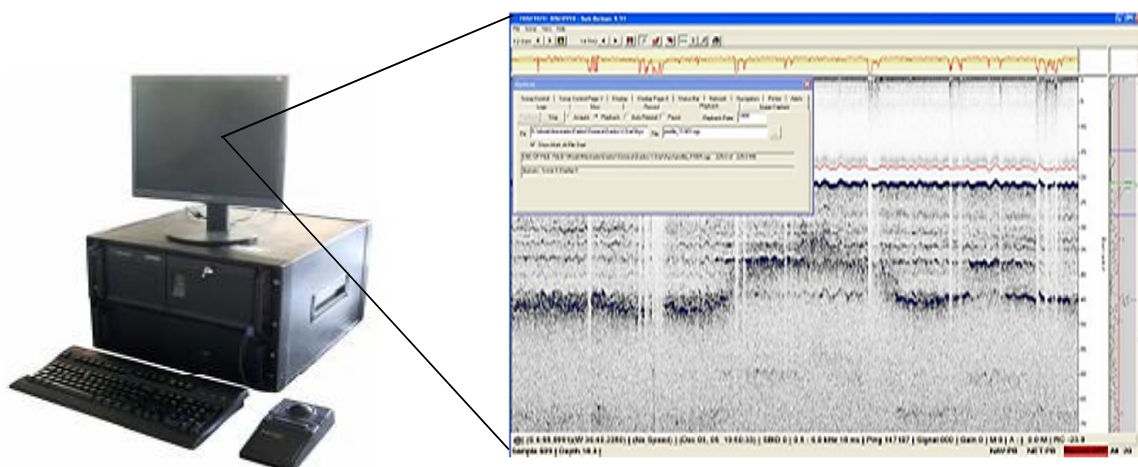
<b>INFORMAÇÃO</b>	<b>VALOR</b>
Extensão da linha	3.490m
Número de tiros	13.295
Intervalo entre tiros	0,2631 m
Intervalo de amostragem	20 ms
Profundidade da fonte	1 m
Número de receptores	1
Tempo de registro	65 ms

Fonte: Autor

Os dados sísmicos deste trabalho foram obtidos com um equipamento perfilador de subfundo X-Star (*chirp*) modelo 3200-XS, possuindo dois componentes: uma plataforma integrada computador/amplificador (*Topside processor*) e o veículo hidrodinâmico de sensores modelo 512i (*Townfish*).

O computador é utilizado durante o levantamento, integrado ao amplificador/ transformador do sinal sísmico modelo 3200XS, constituindo a plataforma *topside processor*. Desta forma, através do software *Discover Sub Botton 3.52* instalado no computador é possível visualizar, armazenar e pré –processar o dado sísmico em tempo real, conforme mostra a Figura 12. No momento que o dado é adquirido e visualizado o software permite que o operador escolha o pulso de frequência (comprimento do pulso) de melhor resposta e a escolha de algumas funções de pré-processamento como o *Time Varyng Gain* (TVG) usado para aumentar retorno do sinal ao longo do tempo, a fim de reduzir o efeitos de atenuação do sinal e o *Automatic Gain Control* (AGC), que permite amplificar o sinal das camadas mais profundas.

Figura 12 – Plataforma integrada computador/amplificador (*Topside processor*) e o software de aquisição e processamento *Discover Sub Botton 3.52*.



Fonte: Gomes, 2009 (modificado)

O veículo rebocado (*townfish*) foi o perfilador de subfundo do tipo *chirp* modelo sb 512i, na qual trata-se de projetores e *hidrofones* montados abaixo de um defletor acústico de fibra de vidro, com capacidade operacional no espectro de frequência de 0.5 a 12 kHz em pulsos FM e Wb, baixa potência, penetração entre 20-200m e a resolução vertical 8-20 cm. Apesar de serem equipados com um estabilizador hidrodinâmico e um flutuador suas dimensões e peso exigem arranjos operacionais mais complexos durante a aquisição e dados. A Figura 13 mostra o *townfish* utilizado e a operação realizada para a aquisição com o perfilador de subfundo (EDGE TECH, 2013).

Figura 13 – Modelo tipo *chirp*, modelo 3200XS, com um *townfish* modelo 512i, empresa *EdgeTech*.



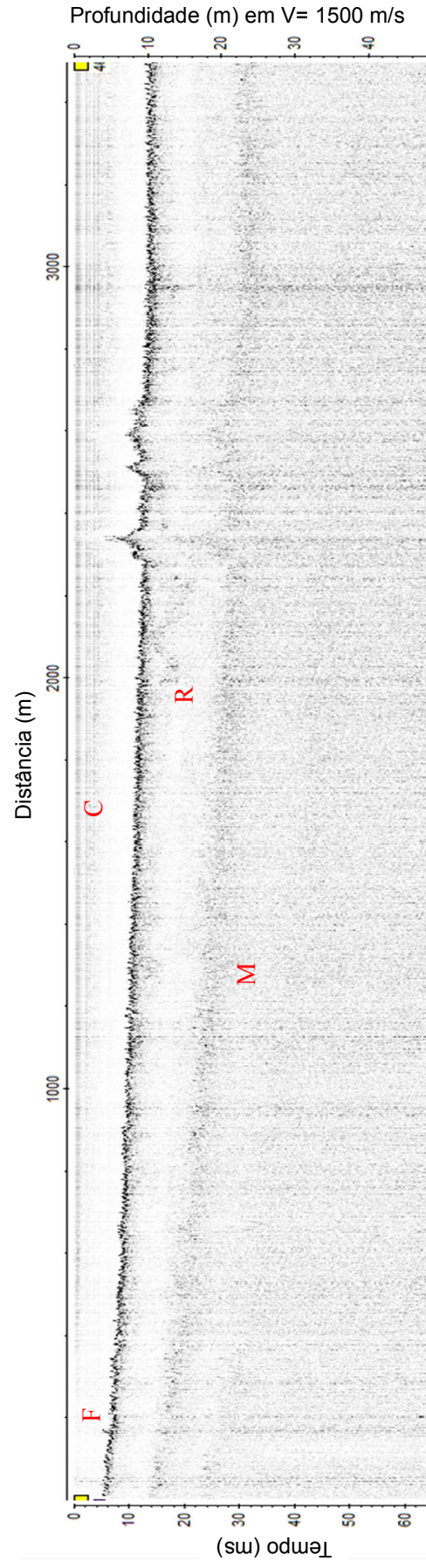
Fonte: EdgeTech, 2013

O retorno do sinal sísmico foi amplificado e registrado digitalmente através do Amplificador/Processador, sendo visualizado e pré-processado em tempo real utilizando-se o programa *Discover SB 3.52*, onde foram selecionados durante todo o levantamento pulsos com faixa de frequência de 0.7 a 12 kHz, mantendo a repetição da emissão do pulso em 20 ms, baseado na resposta da penetração do sinal (em metros).

Na seção sísmica foi usada a velocidade de 1500 m/s tanto para a água como para os sedimentos, com a finalidade de se registrar no dado bruto a profundidade aproximada de penetração e a espessura das diferentes camadas, considerando que os substratos perfilados, com poucas exceções, são saturados em água. Na sísmica rasa a velocidade do som na água (~1500 m/s) varia em um máximo de 4%, conforme as características do meio (temperatura, pressão e salinidade) e provocam pequenas diferenças que não trazem erros significativos nas profundidades (GOMES, 2009).

Na Figura 14 é apresentada a seção sísmica da linha 09. De acordo com a Figura 14, observa-se a topografia do fundo marinho caracterizada pelo o sinal de maior amplitude devido ao contraste de impedância água/fundo oceânico, que é registrado a partir do tempo de 4 ms, demarcado pela letra F. Além disso verifica-se o ruído gerado pela a coluna de água no tempo de registro de 2 ms demarcado pela letra C e a presença de reflexão múltipla de fundo marinho que ocorre no intervalo de 12 a 22 ms que é demarcada pela letra M. Na parte rasa é possível notar a presença de um outro refletor a partir da distância de 2000 m, demarcado pela letra R. As seções sísmicas mostradas neste trabalho apresentam um ganho automático controlado (AGC) com o intuito de realçar a seção sísmica e obter uma melhor visualização dos resultados.

Figura 14 - Seção sísmica da linha 09. Na parte rasa do levantamento verifica-se a presença de um possível refletor, demarcado pela a letra R. Na parte mais profunda verifica-se múltiplas de fundo marinho, demarcada pela a letra M. O fundo marinho é demarcado pela a letra F.



Fonte: Autor

#### **4 PROCESSAMENTO DE DADOS DE SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO**

O processamento sísmico é o conjunto de técnicas com o objetivo de aumentar a relação sinal/ruído, corrigir o dado de vários fenômenos físicos que obscurece as informações geológicas da seção sísmica e reduzir o volume de dados indesejados realçando os eventos de reflexão primária e atenuando os demais eventos, como reflexões múltiplas e outros tipos de ruídos. Tem como produto final seções sísmicas em tempo ou profundidade (DOBRIN, 1988, YILMAZ, 2001).

De uma maneira geral, o processamento de dados é um processo semiautomático, na qual a experiência do processador é de suma importância para identificar a natureza dos problemas presentes na seção e escolher os métodos mais eficazes para solucionar cada um deles. Os dados de sísmica rasa apresentam características que em muitos casos se diferenciam da sísmica convencional. Considerando sua alta resolução, seus dados brutos possuem respostas e ruídos de aquisição que derivam das relações entre as propriedades do método e o ambiente de aplicação (interação de altas frequências com o meio atravessado, ruídos da embarcação e dos flutuadores do equipamento, atenuação com a profundidade e o tipo de material, registro de chegada de múltiplas do sinal e entre outros). Em termos de processamento muitas etapas se distinguem pela logística do levantamento e pelo uso de algoritmos específicos (BRUNETTA 2005, GOMES, 2009).

Para aplicação de um fluxo de processamento aplicado a dados de alta resolução é necessário se basear em alguns critérios que diferem da sísmica convencional, como a aquisição monocal, o comportamento de uma onda de alta frequência, impedância acústica, funcionamento de filtros e tipo de ganho (GOMES, 2009).

No presente trabalho o principal objetivo é a atenuação de múltiplas de fundo marinho presentes na seção. Diante dessa problemática foi aplicado um fluxograma para o processamento sísmico bastante simplificado em que a metodologia utilizada foi a deconvolução preditiva, que atenua as múltiplas predizendo seus tempos de chegada, com base no conhecimento dos tempos de chegada dos eventos de reflexão primária relacionados. Baseado neste contexto, foi utilizado o software Reflex Win 6.0

(SANDIMEIER, 2011) que contém as ferramentas necessárias para o desenvolvimento dessa metodologia. O fluxograma de processamento aplicado é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma das etapas de processamento utilizadas neste trabalho.



Fonte: Autor

A seguir é apresentado uma descrição de cada etapa do processamento aplicado. Os comandos utilizados no Reflex Win 6.0 para a elaboração do fluxograma encontram-se no Apêndice.

### 3.1 - LEITURAS DE DADOS

Os dados brutos de sísmica rasa coletados com o perfilador sísmico X-Star foram gravados no formato de aquisição da Edge Tech, a extensão \*.JSF e no formato SEG Y, utilizando o software de aquisição e processamento *Discover SB 3.52* da marca Edge Tech. Entretanto para o processamento de dados foi escolhido o arquivo no formato \*.JSF, com o intuito de preservar o padrão original da aquisição. A variante \*.JSF elimina o padrão SEG Y EBCDIC e os cabeçalhos binários, e acrescenta uma

mensagem no início do cabeçalho de cada traço. O formato de dado consiste numa coleção de traços gravados com as seguintes componentes: 16 bytes de mensagem de cabeçalho (*message header*); 240 bytes cabeçalho do traço (*trace header*) e dado do traço (EDGE TECH, 2011).

Esta etapa do processamento consiste em carregar o dado e converter para o formato desejado, no caso deste trabalho os dados estão gravados em formato \*.JSF e foram convertidos no padrão interno do Reflex Win (taxa de 16 ou 32 bit). A partir disso pode-se visualizar o cabeçalho ou *header* do traço, que se caracteriza em uma parte do arquivo que guarda informações sobre o dado e assim gerar uma imagem do dado bruto.

### 3.2 - GEOMETRIA

A geometria consiste em inserir informações a respeito da aquisição com o propósito de fornecer ao programa (software) os parâmetros de entrada como o posicionamento de cada fonte e receptor, através de suas coordenadas (x,y), quantidades de tiros, quantidade de receptores, afastamento dos tiros e etc. As informações de entrada sobre a geometria dos dados são armazenadas no cabeçalho (*header*) de cada traço sísmico, e permite, com isso, que as etapas posteriores do processamento possam ser realizadas. Esta etapa requer uma atenção redobrada, haja vista que muitos problemas de processamento estão relacionados à erros na geometria do levantamento.

Apesar dos dados de geometria serem alimentados com os valores de coordenadas obtidas no levantamento, os dados de sísmica rasa apresentam algumas particularidades como a não coincidência do registro do dado sísmico com a emissão do sinal do GPS, denominado erro de latência que ocasiona em uma imprecisão no georreferenciamento. Além disso, é comum ocorrer uma variação na distância entre os traços, devido a velocidade da embarcação não ser constante na escala de tempo de registro dos traços sísmicos e a medida ser feita de forma contínua. Entretanto, a distância entre o transdutor e a antena do GPS é automaticamente corrigidos através do programa *Discover* durante o levantamento e a distância entre os traços é calculado pelo o programa Reflex Win (GOMES, 2009).

### 3.3 - EDIÇÃO DE TRAÇOS

Etapa que corresponde ao tratamento preliminar aplicado aos registros de reflexão sísmica, através da análise e eliminação dos traços sísmicos que apresentam comportamento anômalo ou ruidoso que prejudicam na qualidade da seção sísmica. Comumente é realizado após o carregamento da geometria e inclui basicamente: a eliminação de traços ruidosos e a recuperação de ganho. Esta operação foi utilizada para remover os traços ruidosos encontrados na camada d'água, visto que o interesse do trabalho é apenas identificar os refletores em subsuperfície. Com isso é possível obter uma otimização de tempo e precisão do processamento e minimização da saturação visual. A remoção da lamina d'água na seção sísmica foi realizado através do *muting*.

### 3.4 - ANALISE ESPECTRAL

A análise espectral é realizada através do uso de uma ferramenta matemática conhecida como Transformada de Fourier, capaz de transformar um conjunto de dados no domínio do tempo para o domínio da frequência e fazer uma análise do espectro de frequência e de amplitude que é fornecida através da Transformada de Fourier Direta da equação 1.

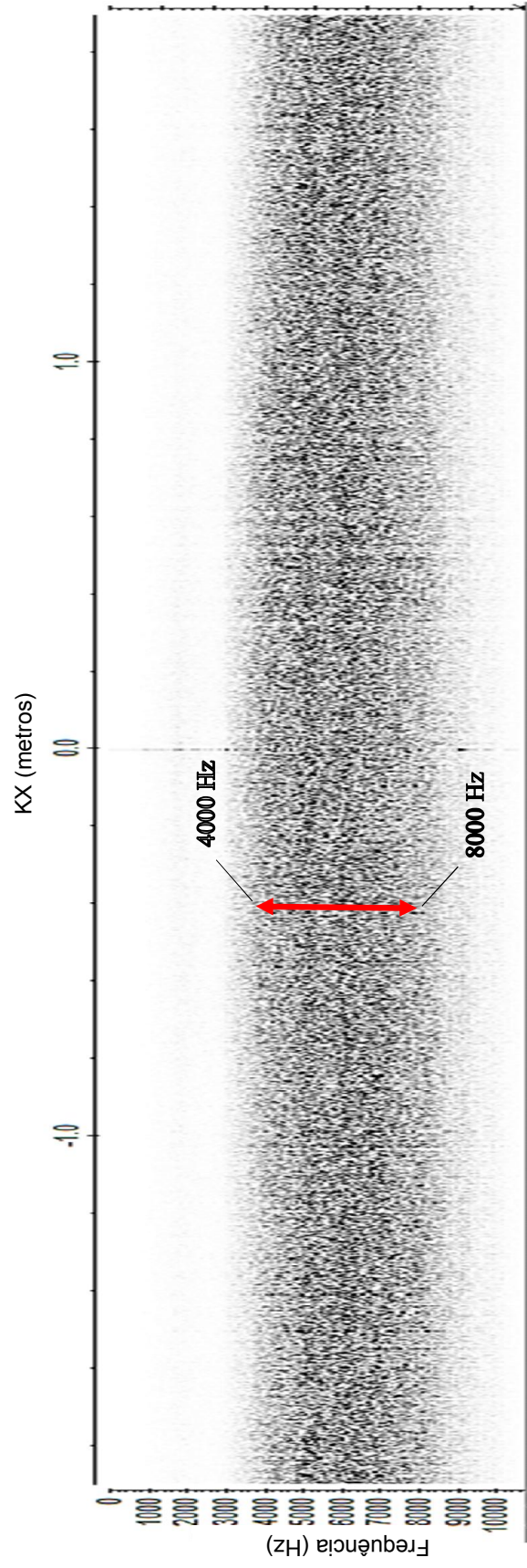
$$U(\omega, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) e^{i(\omega t - kx)} dt dx \quad (\text{TFD}) \quad (1)$$

na qual,  $U(\omega, k)$  é a Transformada de Fourier do campo no domínio de frequência ( $\omega$ ) e número de onda ( $k$ ) de  $u(x, t)$  que é o campo no domínio do tempo e espaço.

A identificação de ruídos pode ser feitas visualmente ou por análise espectral. A análise espectral marca o início dos processos voltados para correção de amplitudes no dado sísmico. Através da visualização do espectro f-k, ou seja, frequência X número de onda é possível obter uma aplicação mais acurada das correções de amplitude no dado que contribui para a seleção de parâmetros para a aplicação de filtros (GOMES, 2009).

Esta operação nos possibilita determinar a banda de frequência que deve ser preservada. Assim, a partir da análise do espectro f-k (Figura 16), podemos observar que a faixa de frequência dominante da seção encontra-se no intervalo entre 4000 e 8000 kHz. Esses valores de frequência que predominam na seção estarão com maiores valores de amplitude e onde encontram-se o sinal de interesse. Posteriormente, as frequências fora do intervalo de interesse são excluídas por um filtro passa-banda.

Figura 16 – Visualização do espectro no domínio f-k (frequência x número de onda), mostrando a frequência predominante entre 4 a 8 KHz.



Fonte: Autor

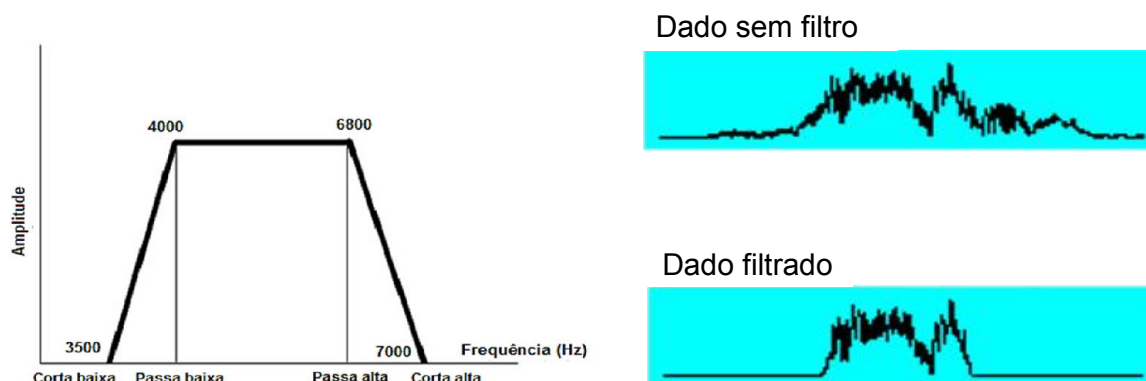
### 3.5 - FILTROS E GANHOS

A aplicação de filtros e ganhos é de fundamental importância no processamento de dados geofísicos para melhorar a razão sinal/ruído, ou por outro lado, melhorar as características do sinal através da eliminação de alguns dos ruídos e corrigir a atenuação do sinal.

A filtragem digital visa suprimir os ruídos como por exemplo, a geração termal de ruído pelo movimento randômico das moléculas de água, ondas incidentes, ruídos de fluxo para sistemas rebocados, ruído do próprio motor da embarcação e entre outros. Para isso utiliza-se o filtro passa-banda que consiste em limitar o dado sísmico a um determinado intervalo de frequências, com o intuito de remover dos traços as frequências muito baixas associadas aos eventos superficiais de alta energia, bem como as frequências muito altas originadas por interferências, preservando desta forma apenas o intervalo de frequência correspondente ao sinal de interesse (GOMES, 2009).

Para tal, são necessários 4 valores de frequência: frequência baixa de corte, frequência baixa de passagem, frequência alta de passagem e frequência alta de corte, conforme podemos observar na Figura 17. A escolha de parâmetros para a confecção do filtro banda passa-banda é possível através da análise espectral que foi descrita anteriormente, através da Figura 16, podemos identificar a faixa de frequência de maior amplitude onde se concentra o sinal de interesse correspondente aos eventos de reflexão. Esta etapa requer uma atenção redobrada, pois sinais de interesse também podem ser perdidos se não for feita uma boa análise dos parâmetros.

Figura 17 - Configuração do filtro passa-banda e espectro de frequência do traço 1 mostrando o antes e depois do filtro.



Fonte: Autor

A correção de amplitude dos traços sísmicos é usado como um procedimento utilizado contra os fatores que contribuem para perda de energia e atenuação do sinal sísmico. Dentre os fatores destacam-se a divergência esférica ou espalhamento geométrico e a absorção (YILMAZ, 2001).

O espalhamento geométrico refere-se à atenuação da amplitude do sinal pela expansão da frente de onda sísmica conforme sua propagação em subsuperfície. Considerando que o ponto de tiro é normalmente uma fonte de onda esférica, o decaimento do sinal relacionado a expansão da frente de onda em meios homogêneos pode ser justificada pelo fato da densidade de energia ser inversamente proporcional ao quadrado do raio de frente de onda, ou seja, decai proporcionalmente a  $r^{-2}$  conforme mostra a equação 2 e a amplitude da onda sísmica ser proporcional à raiz quadrada da densidade ou intensidade de energia conforme equação 3 ou seja decai proporcionalmente a  $r^{-1}$  (YILMAZ, 2001).

$$E \propto \frac{1}{r^2} = r^{-2} \quad (2)$$

$$A \propto \sqrt{\frac{1}{r^2}} = r^{-1} \quad (3)$$

na qual,  $E$  – é a densidade de energia;  $A$  – é a amplitude do sinal sísmico;  $r$  – é o raio da frente de onda e  $\propto$  – é o símbolo de proporcionalidade.

Entretanto, em meios não homogêneos como o da subsuperfície da terra, o decaimento de amplitude não terá um comportamento linear como foi visto no caso de meios homogêneos ( $v=\text{constante}$ ). Por outro lado, a velocidade geralmente aumenta com a profundidade, que faz com que ocorra uma divergência e uma atenuação de amplitude maior e mais rápida quando comparados a meios de velocidade constante. Neste contexto, podemos observar que a fonte inicial da fonte muda de acordo com a variável de tempo que se propaga no meio. As perdas por absorção também promovem a atenuação da densidade de energia da onda sísmica e está relacionado à transformação de energia ondulatória em calor. O efeito é similar ao da divergência esférica, a principal diferença é que nas perdas por absorção ocorre também uma perda gradual das frequências mais altas, e, conseqüentemente, uma diminuição da resolução (YILMAZ, 2001).

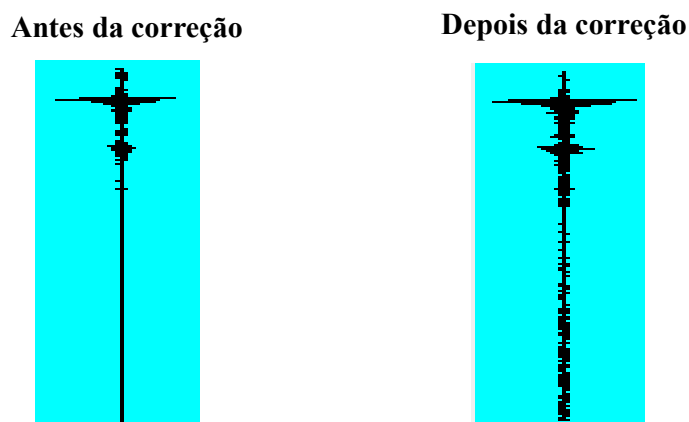
Diante disso, foi aplicada na seção sísmica dois procedimentos, a correção de divergência esférica e o AGC. A correção de divergência esférica tem como objetivo compensar as perdas de amplitudes do sinal por efeito do espalhamento geométrico ou divergência esférica. A compensação do espalhamento geométrico aplicado é proporcional a raiz quadrada do tempo, conforme mostra a equação 4.

$$\text{CDG} \propto \sqrt{t} , \quad (4)$$

Em que, CDG – é a correção de divergência esférica ou espalhamento geométrico;  
 $\alpha$  – símbolo de proporcionalidade e  $t$  é o tempo.

A partir da Figura 18, podemos observar através de um traço sísmico da seção o resultado da aplicação da correção de espalhamento geométrico, onde é possível observar que nas parte onde há maiores tempos de registro (maiores profundidades), em que o sinal se encontrava mais atenuado foram amplificados

Figura 18 – Comparação do traço sísmico, antes e depois da aplicação da correção de divergência esférica.

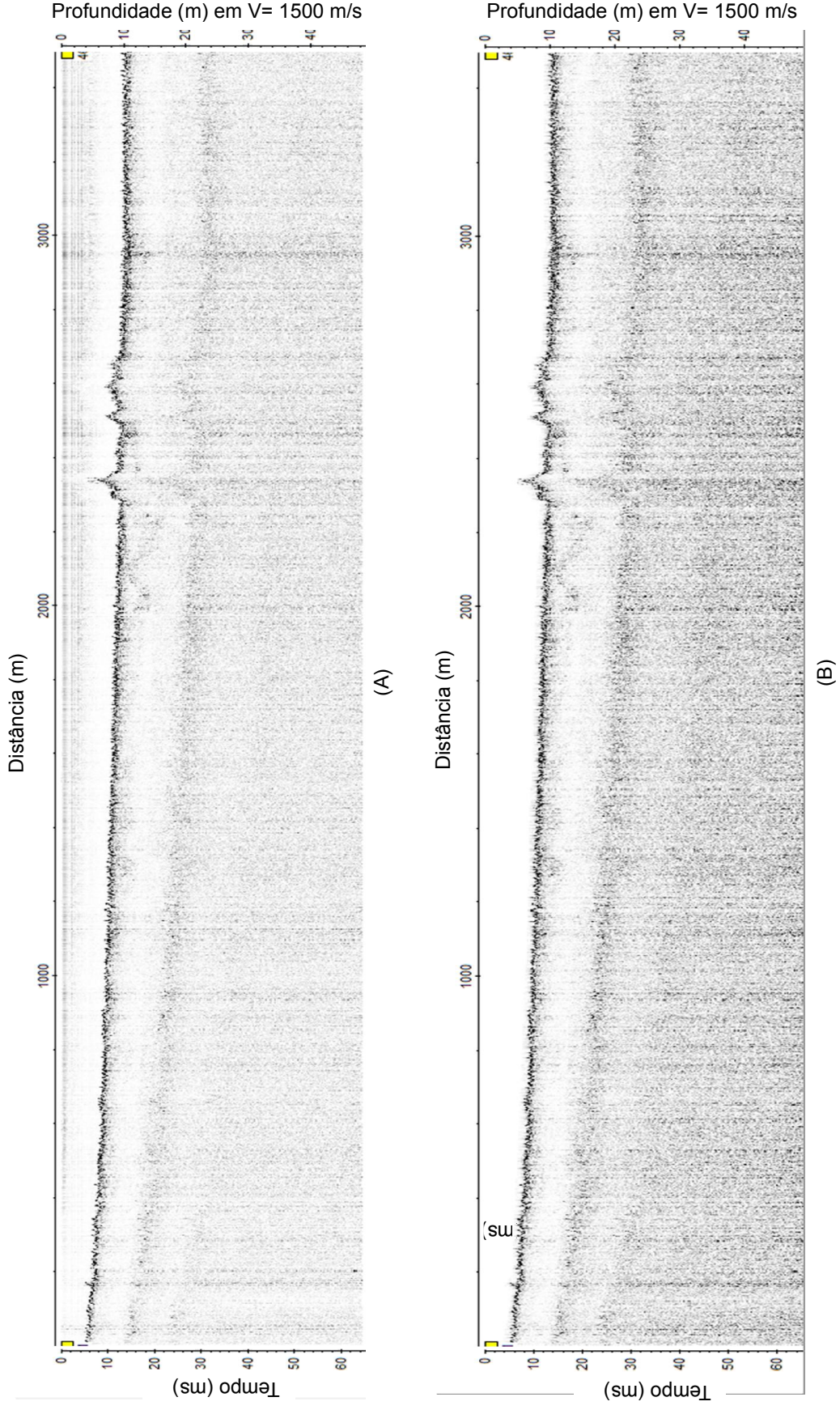


Fonte: Autor

O AGC é um procedimento que atua atribuindo um ganho nas zonas de baixa amplitude da seção e é utilizado apenas para fins de exibição de resultados, visto que quando aplicado, as amplitudes do sinal original são perdidas. Esta técnica envolve a definição do comprimento de uma janela móvel de tempo, o cálculo da média de amplitude dentro da janela e a aplicação de um escalar em cada amostra do traço sísmico (YILMAZ, 2001).

A Figura 19 mostra a visualização da seção sísmica após a aplicação do filtro banda passante e o compensador de divergência geométrica. Podemos observar que a aplicação de um filtro para retirar ruídos associados a altas e baixas frequências não obteve resultados esperados, fato que pode ter ocorrido em virtude do espectro de frequência do ruído ser similar ao do sinal correspondente às reflexões primárias (sinal de interesse), o que tornou a aplicação do filtro inviável. Pode-se notar que ao compararmos a seção bruta (figura 19-a) com a seção filtrada (figura 19-b), não é possível identificar uma melhora significativa. No entanto a aplicação da função responsável por compensar a amplitude atenuada por conta da divergência esférica obteve resultados satisfatórios, nota-se que a região mais profunda foi realçada. Contudo, não foi possível identificar refletores sísmicos nessa região e eventos indesejáveis como a múltipla de fundo marinho foram realçadas.

Figura 19 – Visualização da seção sísmica (a) semo processamento e (b) com o processamento, que constituiu na aplicação de filtros e correção de amplitude.



Fonte: Autor

### 3.6 – DECONVOLUÇÃO PREDITIVA

A deconvolução preditiva é normalmente empregada no processamento de dados sísmicos com o objetivo de comprimir o pulso sísmico ou prever e “suprimir” reflexões múltiplas. O primeiro objetivo é alcançado utilizando-se o operador de erro de predição unitária que corresponde ao filtro inverso de Wiener-Levinson. Para a predição e atenuação de reflexões múltiplas, utiliza-se o filtro preditivo que atua deslocado no tempo à uma distância de predição ( $\alpha$ ) ao longo do traço sísmico. O filtro preditivo estima eventos periódicos, como múltiplas no sismograma, permitindo assim que a componente estimada seja removida (YILMAZ, 2011).

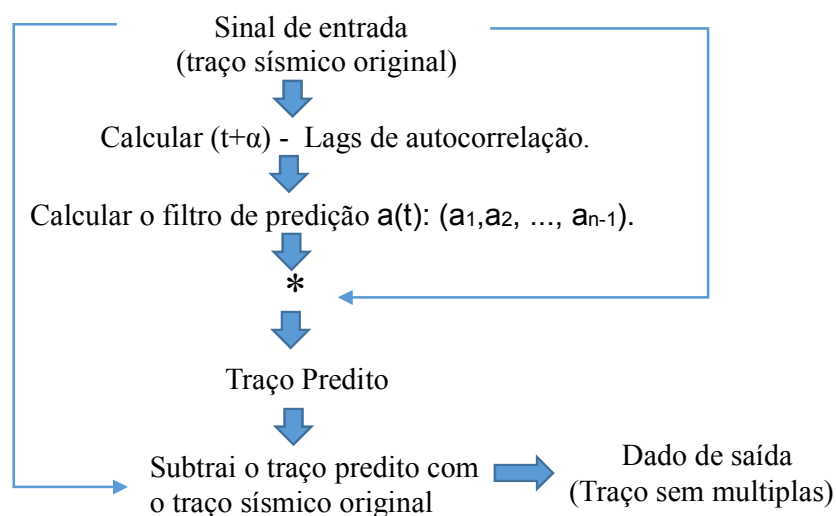
Este processo é baseado no algoritmo de recursão de Levinson (método do filtro de Wiener) para equação de sistema linear com a estrutura de Toeplitz. O filtro atua em cada traço independentemente. Para cada traço, a autocorrelação sobre um número de amostras predefinido e a correlação cruzada entre o dado de entrada  $x(t)$  e a saída desejada  $x(t+\alpha)$  são calculados. Essas correlações correspondem a entrada do algoritmo de Levinson, que calcula recursivamente o filtro de deconvolução do traço obtida da relação abaixo (YILMAZ, 2001).

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \cdots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \cdots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \cdots & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\alpha \\ r_{\alpha+1} \\ r_{\alpha+2} \\ \vdots \\ r_{\alpha+n-1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

em que:  $n$ , é o comprimento do filtro;  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{n-1}$ , é a autocorrelação da wavelet básica (dado de entrada);  $\alpha$  é o *lag* de predição;  $r_\alpha, r_{\alpha+1}, r_{\alpha+2}, \dots, r_{\alpha+n-1}$  é a correlação cruzada da saída desejada e da wavelet básica e  $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$  são os coeficientes do filtro.

Em seguida, aplica-se o filtro preditivo  $a(t)$ :  $(a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$  mediante a convolução com o traço sísmico original (sinal de entrada), obtendo-se uma amostra predita no tempo  $t + \alpha$ , que é subtraída com o traço original, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 - Esquema dos procedimentos da deconvolução preditiva.



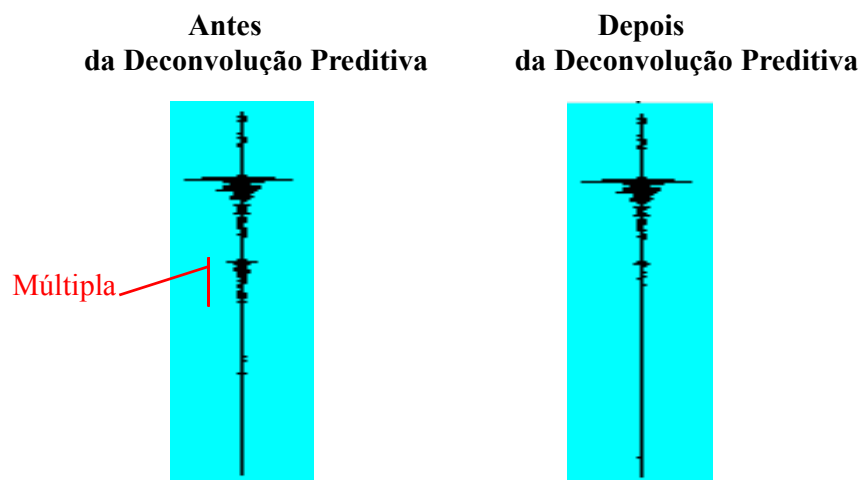
Fonte: Yilmaz, 2001

A partir da deconvolução preditiva é possível atenuar os efeitos das múltiplas predizendo seus tempos de chegada, com base no conhecimento dos tempos de chegada dos eventos de reflexão primária relacionados, para isto, a análise é realizada através de quatro variáveis: início e fim da autocorrelação (*autocorrel. start*; *autocorrel. end (ms)*), comprimento da janela do filtro (*filter length*) e intervalo de predição da múltipla (*lag*).

A eficácia do método depende do número de elementos do filtro e da distância de predição escolhidos. Para isso, os parâmetros de início e fim de autocorrelação correspondem ao tempo pouco depois do tempo zero e um pouco antes do tempo final de registro. O tempo de registro é de 65 ms, então utilizou-se para a autocorrelação o tempo inicial de 4ms e o final de 50 ms. Para o comprimento do filtro é utilizado um tempo de predição pouco maior que o período da múltipla que se deseja suprimir, foi escolhido o valor de 25 ms, diante da ocorrência da múltipla que ocorre a partir dos 15 ms. Por fim o parâmetro *lag* ou distancia de predição utiliza-se um valor um pouco menor que o período da múltipla, no qual se iniciou em 12 ms.

A partir da Figura 21, podemos visualizar através de um traço sísmico da seção o resultado da aplicação da deconvolução preditiva, onde é possível observar a atenuação de parte do sinal relacionado a múltipla.

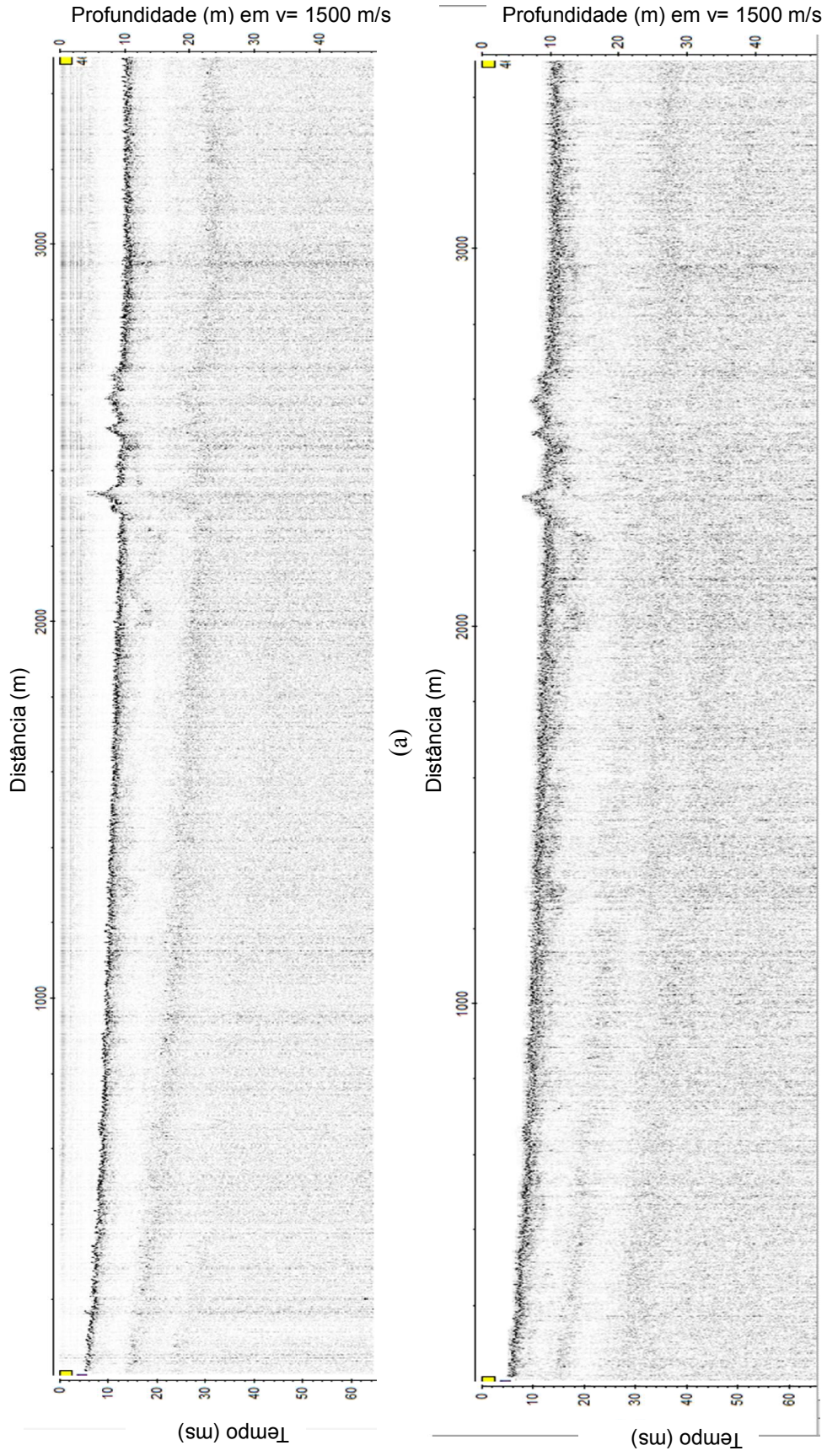
Figura 21 - Comparação do traço sísmico, antes e depois da aplicação da deconvolução preditiva.



Fonte: Autor

A seção sísmica após a aplicação da deconvolução preditiva pode ser visualizados na Figura 22, através da comparação entre o dado bruto e o dado processado, verifica-se uma melhora na resolução da imagem, principalmente para eventos na porção rasa da seção até o tempo de registro de 20 ms. De acordo com a imagem, é possível observar que em regiões em que as múltiplas encontram-se com uma maior inclinação, a deconvolução preditiva se mostrou ineficaz, não sendo possível a atenuação desses eventos. No entanto, podemos notar que a maior parte da múltipla que se encontrava na seção a partir do tempo de registro de 14 ms foi suprimida, obtendo dessa forma um resultado satisfatório. Na parte profunda da seção não foi encontrado nenhum evento de reflexão, devido à forte atenuação do sinal e possivelmente pelo o baixo contraste de impedância encontrado nas interfaces dessa região.

Figura 22 – Visualização da seção sísmica: (a) sem processamento (b) com o processamento após a aplicação da deconvolução preditiva.



(b)

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi proposto um fluxo de processamento de dados de sísmica rasa para a suavização de múltiplas de fundo marinho em um dado real 2D da bacia de Campos, diferente do dado sísmico convencional, o dado sísmico de alta resolução apresentado neste trabalho é monocanal e apresenta altas frequências da ordem de 0,7 a 12 KHz.

Para este tipo de dado, a aplicação do fluxo de processamento mostrou-se de suma importância para a melhoria da qualidade da seção sísmica, através do fluxo foi possível melhorar a razão sinal/ruído e atenuar uma grande parte da reflexão múltipla presente na seção.

De acordo com os resultados, observamos que a aplicação do filtro banda-passante não obteve um bom desempenho, em virtude desse dado possuir ruídos que estão na mesma faixa de frequência do sinal de interesse. Já a correção de amplitude devido atenuação por divergência esférica obteve bons resultados, as partes mais profunda da seção foi realçado, no entanto não foi identificado nenhum refletor sísmico.

Na etapa em que foi aplicado a deconvolução preditiva no intuito de atenuar as reflexões múltiplas, foi possível concluir que essa metodologia mostrou-se bastante eficiente, pois a maior parte da múltipla presente na seção foi atenuada, apesar de ter sido encontrado certas limitações nas partes em que as múltiplas possuem uma maior inclinação, já que não ocorreu uma atenuação satisfatória nessa região.

Para estudos posteriores sugere-se aprimorar o fluxo de processamento através da abordagem de alguns problemas como:

- A aplicação de filtros que melhorem a relação sinal/ruído, de modo a suavizar a seção sísmica.
- A aplicação de metodologias que recuperem o sinal sísmico que é atenuado em profundidade, de modo que seja possível a identificação de refletores sísmicos.

## REFERÊNCIAS

ANP. **Banco de Dados de Exploração e Produção**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: Ministério das Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.bdep.gov.br/>>. Acesso em: 29/11/2013.

APPLIED ACOUSTICS. **Sub-Bottom-Profiling**. Disponível em: <<http://www.appliedacoustics.com/>>. Acesso em: 29/11/2013

AYRES NETO, A.. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 3, p. 241-255, 2000

BRUNETTA, R.. **O processamento da sísmica de reflexão rasa – desafios encontrados no estudo de modelos análogos a reservatórios fraturados**. Dissertação ( Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005

CHANG, H. K., KOWSMANM, R.O., FIGUEIREDO, A. M. F. **New Concepts on the Development of East Brazil Marginal Basins**. Episodes, 11: p. 194-202, 1988

DIAS, J. L. *et al.* Aspectos de evolução tecno-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na acia de Campos. In: RAJAGABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Ed.). **Origem e evolução das bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DIVEN, 1990. p. 330-360,

DOBRIN, M. B.. **Introduction to Geophysical Prospecting**. 3. ed. New York: MacGraw-Hill, 1988.

EDGE TECH. **Technical & User's Manual. Discover Sub-Bottom Profiler Processor Software and 3200-XS Sub-bottom Profiling System**. Revisão: 1.13 / Setembro 2011. Disponível em: < <http://www.edgetech.com/>>. Acesso em: 02/12/2013.

EDGE TECH. **Sub-Bottom-Profiling-Systems**. Disponível em: < <http://www.edgetech.com/>>. Acesso em: 02/12/2013.

FOSTER, D.S.; POPPE, J.L. **High Resolution Seismic-Reflection Surveys on the Nearshore of Outer**. Massachusetts: USGS, 2003. (Open File Report 03-235).

GOMES, M. P. **Aquisição, Processamento e Análise de dados de sísmica de alta resolução na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte: Vale Inciso do Rio Açu**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009

KRAMER, F.S.; PETERSON, R.A.; WALTER, W.C. **Seismic Energy Sources**. Tulsa: Handbook. United Geophysical Corporation, p.50, 1968

Mc GEE, T. M. . High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes. Part B: Digitizing analogue seismic signals: **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 287-296, 1995

MOSHER, D. C.; SIMPKIN, P. G.. Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition. **Geosci. Can.** 26, p. 174–187. 1999

PONTE, O.H.; ASMUS, H.E. **Geological framework of the Brazilian continental margin**.. 1.Ed. [S.l.]: Geologische Rundschau, 1978

SANDMEIR, K. J. **Manual do software REFLEX WIN –version 6.0**. Karlsruhe: [s.n.], 2011.

SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação, em Oceanografia Química e Geológica, Instituto Oceanográfico/USP, 2006

TÓTH, T.; VIDA, R.; HORVÁTH, F. Shallow-water single and multichannel seismic profiling in a riverine environment. **Lead. Edge**, p.1691-1695, nov. 1997.

TRABANT, P. K.. **Applied High-resolution geophysical Methods**. Boston, MA,: International Human Resources Development Corporation. 1984

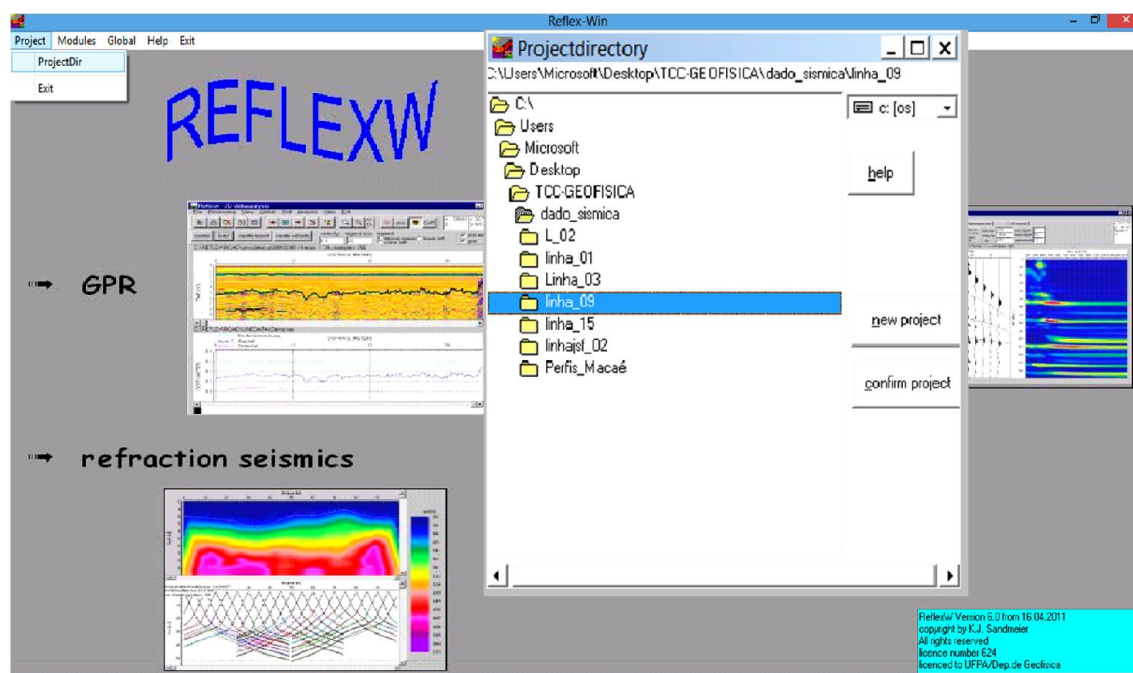
WESCHENFELDER, J.; CORREA, I. C. S.; ALIOTA, S. Elementos arquiteturais do substrato da lagoa dos patos revelados pela a sísmica de alta resolução, **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 32, n. 32, p. 57-67, 2005

YILMAZ, O. **Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data**. 2. ed. [S.l.]: SEG: Society Exploration Geophysicists, 2001.


## APÊNDICE

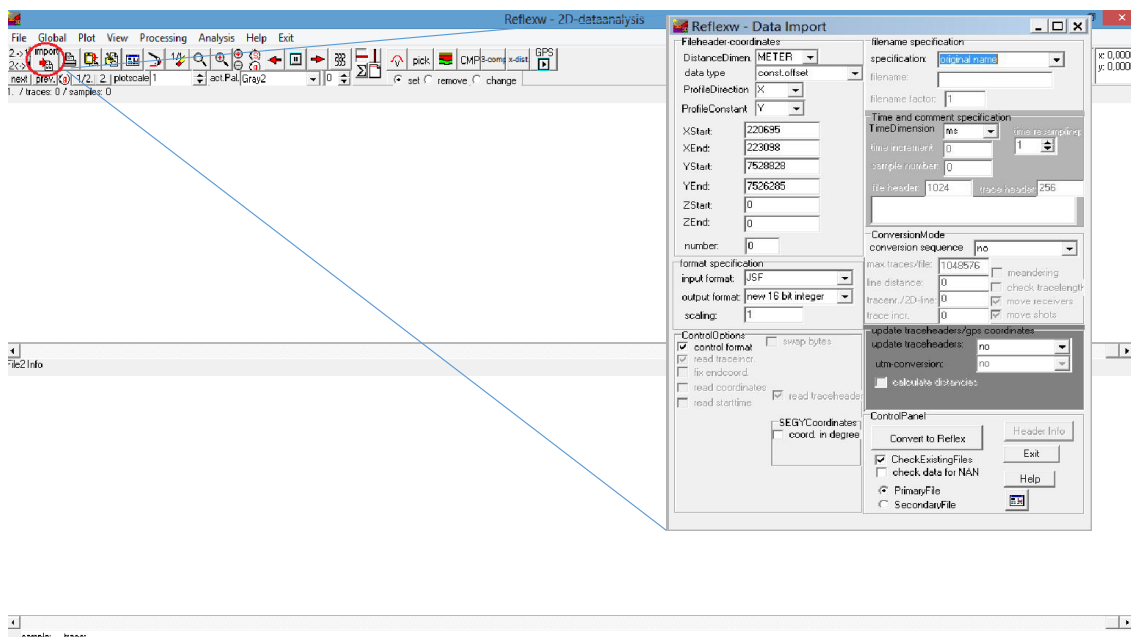
### Etapas do Processamento sísmico realizado através do programa Reflex Win.


1. Abrir o programa e criar um projeto base através da opção *Project* → *ProjectDirectory* no menu principal (figura 01), sugerir a partição a ser direcionada e criar um novo projeto.

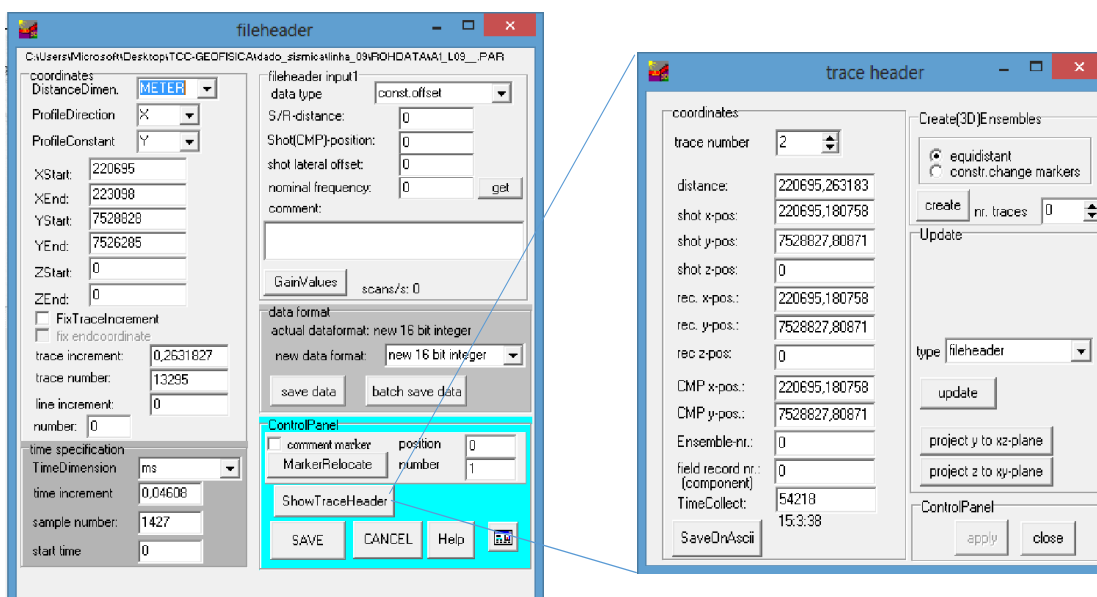


2. No mesmo menu seleciona-se o módulo *2D Data Analysis*, na qual inicia-se a área de trabalho do Reflex Win. Sendo assim efetua-se a conversão do dado em SEG Y para o formato padrão do programa através da janela *Data Import* no menu *File* →

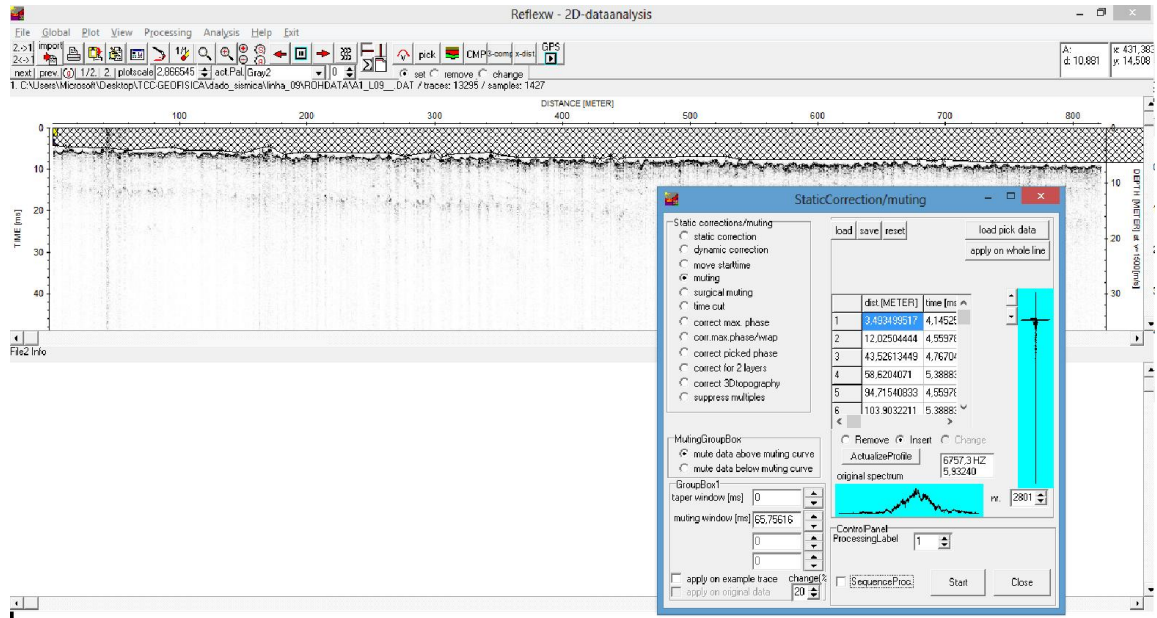
*Import* ou pelo o atalho .



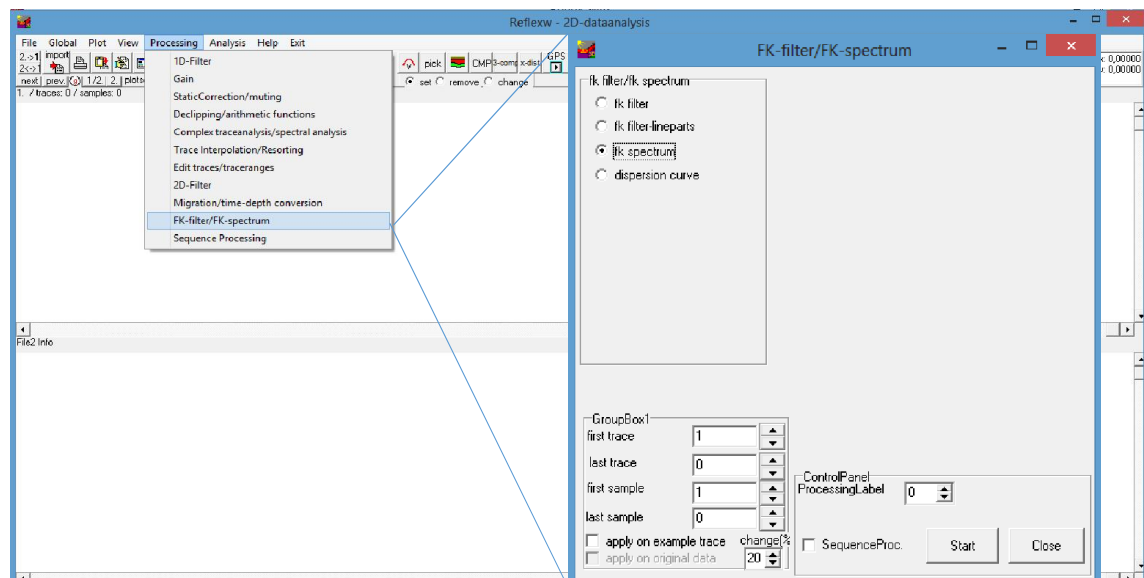
3. Para a construção da geometria utiliza-se o módulo *Edit File Header*, através da direção *file* → *edit file header* ou através do atalho .



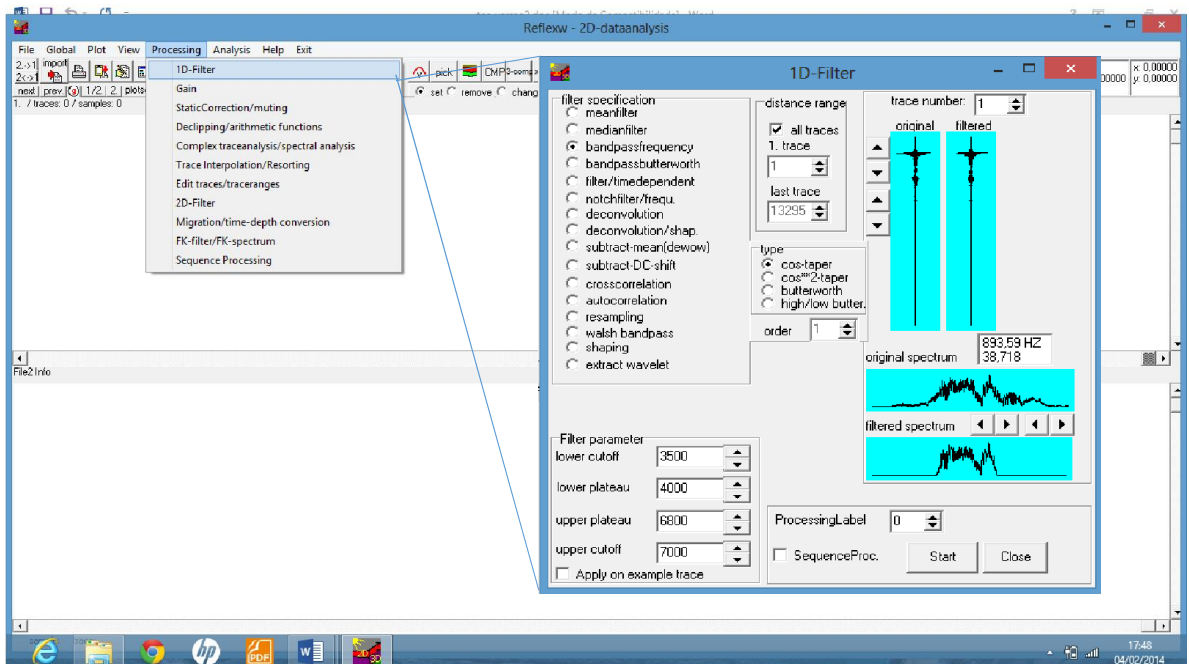
4. A remoção da lamina d'água na seção sísmica foi realizado através do muting pelo o menu *prossencing* → *static correction/muting*.



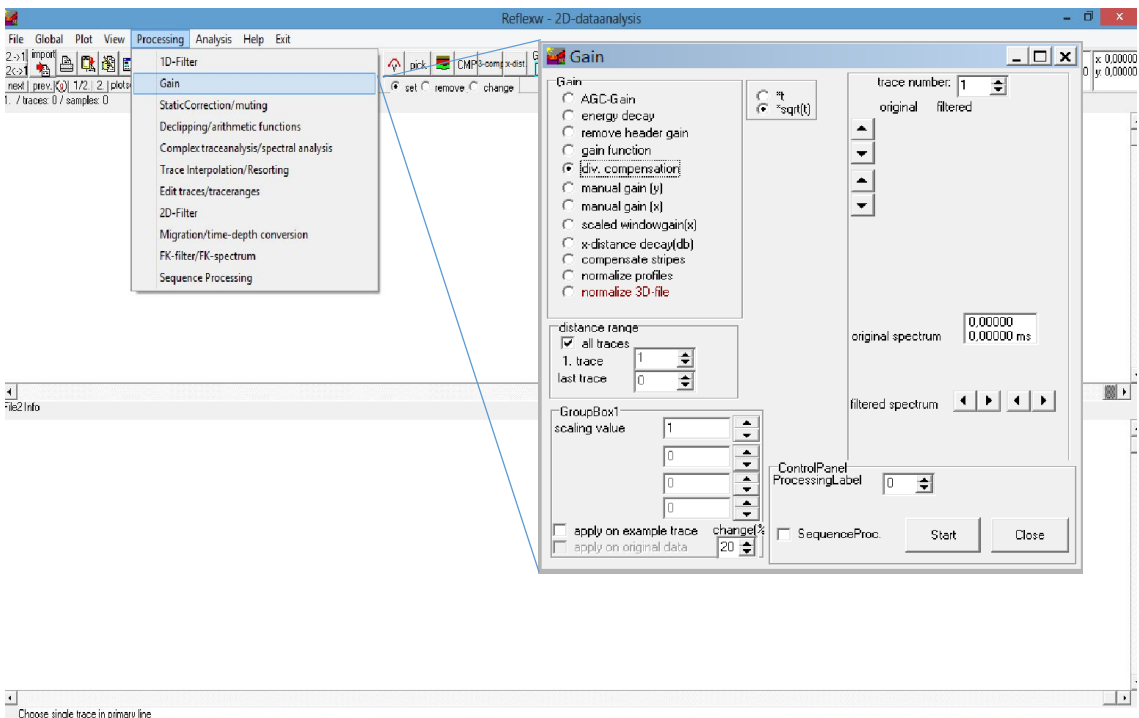
5. Para a visualização do espectro f-k é utilizado os seguintes comandos do programa: *processing* → *f-k filter / f-k spectrum* → *f-k spectrum*, conforme mostra a figura...



6. Para a confecção do filtro utilizou-se os comandos *processing* → *1D-filter* → *Bandpassfrequency*



7. Para a correção de amplitude do sinal é utilizado o compensador de divergência esférica através do caminho *processing* → *gain* → *div. Compensation*.



8. Para efetuar o processo de deconvolução no programa foi realizado a seguinte direção: *processing* → *1D – Filter* → *Deconvolution/shap predictive*.

