

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA/LAGEMAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

CLAUDIO GINO GALLEA

PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO
DE DADOS DE SÍSMICA MONOCANAL DE EQUIPAMENTOS
COM FONTES RESSONANTES E IMPULSIVAS

Niterói – RJ - 2023

CLAUDIO GINO GALLEA

**PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE
SÍSMICA MONOCANAL DE EQUIPAMENTOS COM FONTES RESSONANTES E
IMPULSIVAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado
em Geologia e Geofísica Marinha
da Universidade Federal Fluminense, como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor. Área de concentração:
Geologia e Geofísica Marinha.

Orientador: Arthur Ayres Neto, PhD

Niterói – RJ – 2023

CLAUDIO GINO GALLEA

PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE SÍSMICA MONOCANAL COM EQUIPAMENTOS DE FONTES RESSONANTES E IMPULSIVAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor

Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha

Aprovada em 02 de Outubro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ARTHUR AYRES NETO

Data: 02/10/2023 17:15:54-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Arthur Ayres Neto, Dr (Orientador)
UFF

Documento assinado digitalmente



LUCIANO EMIDIO NEVES DA FONSECA

Data: 17/10/2023 09:06:20-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Luciano Emidio Neves da Fonseca, Dr.
UNB

LUIZ ANTONIO PEREIRA DE SOUZA:00695914820

Assinado de forma digital por LUIZ ANTONIO PEREIRA DE SOUZA:00695914820

SOUZA:00695914820

Dados: 2023.10.03 09:49:06 -03'00'

Prof. Luiz Antonio Pereira de Souza, Dr.
LAPS Consulting

Documento assinado digitalmente



MOAB PRAXEDES GOMES

Data: 04/10/2023 09:40:24-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Moab Praxedes Gomes, Dr.
UFRN

Documento assinado digitalmente



GILBERTO TAVARES DE MACEDO DIAS

Data: 18/10/2023 07:57:11-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Gilberto Tavares de Macedo Dias, Dr.
UFF

Documento assinado digitalmente
gov.br FLORA FERREIRA SOLON
Data: 03/10/2023 08:20:30-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Flora Solon, Dra
UFF

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

G166p Gallea, Claudio Gino
Programa para processamento de dados de sísmica monocanal
de equipamentos com fontes ressonantes e impulsivas / Claudio
Gino Gallea. - 2023.
119 f.: il.

Orientador: Arthur Ayres Neto Ayres Neto.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto
de Geociências, Niterói, 2023.

1. Geofísica Marinha. 2. Processamento de Sinais. 3.
Processamento de Imagem. 4. Produção intelectual. I. Ayres
Neto, Arthur Ayres Neto, orientador. II. Universidade Federal
Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

Dedico este trabalho
A minha esposa Márcia e ao meu amigo Tuca.

Agradeço aos meus mentores:

Marcus A. Gorini

Gilberto T. M. Dias

Eliane C. Alves

Alberto G. Figueiredo

Arthur Ayres Neto

E aos amigos:

Sergio Ventura

L.A.P.S.

Cesar Felix

Pensamento:

“Ogni blocco di pietra
ha una statua dentro di se
ed è compito dello scultore scoprirla”
Michelangelo Buonarrotti

(Cada bloco de pedra
possui uma estátua dentro de si
e o dever do escultor é descobri-la)

RESUMO

Os equipamentos de sísmica monocanal de alta resolução utilizando fontes impulsivas ou ressonantes aplicados a ambientes aquáticos, são amplamente utilizados no estudo das condições do subfundo para diversas finalidades acadêmicas, ambientais, de engenharia e de óleo e gás. Os softwares inclusos nestes equipamentos ou disponíveis comercialmente, possuem parâmetros fixos e procedimentos voltados para a análise básica dos dados sísmicos, não permitindo nenhum processamento além daqueles pré-definidos nos programas. Isso por vezes pode limitar a extração de dados sísmicos de interesse em situações diversas. Este programa permite executar o processamento através de novos filtros ainda não utilizados, bem como a superposição entre esses filtros, buscando alternativas de visualização dos horizontes para o intérprete. Essas várias filtragens podem ser selecionadas alternadamente durante o mapeamento dos horizontes de modo a complementar a interpretação dos refletores na seção sísmica. Finalmente, os refletores mapeados e as imagens geradas pelos vários filtros, podem ser exportados para outras finalidades. Em função do alto custo dos softwares comerciais, este programa, escrito em linguagem python, está disponibilizado em domínio público através de licença GPL permitindo eventuais incrementações futuras.

Palavras-chave: Processamento sísmico monocanal, processamento de sinais, processamento de imagens.

ABSTRACT

High-resolution single-channel seismic equipment using impulsive or resonant sources applied to aquatic environments is widely used to study subbottom conditions for various academic, environmental, engineering and oil and gas purposes. The software included in this equipment or commercially available, has fixed parameters and procedures aimed at the basic analysis of seismic data, not allowing any processing beyond those pre-defined in the programs. This can sometimes limit the extraction of seismic data of interest in different situations. This program allows processing to be carried out using new filters not yet used, as well as superposition between these filters, seeking alternatives for viewing horizons for the interpreter. These various filters can be selected alternately during horizon mapping in order to complement the interpretation of the reflectors in the seismic section. Finally, the mapped reflectors and images generated by the various filters can be exported for other purposes. Due to the high cost of commercial software, this program, written in Python, is available in the public domain through a GPL license, allowing for possible future improvements.

Keywords: Single-channel seismic processing, signal processing, image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Comparação entre resultados de 3 perfiladores (Souza, 2008).....	23
Figura 2 - Atuação do filtro de remoção de DCbias: (a) antes; (b) depois (Lyons, 2004)	25
Figura 3 - Relação Amplitude x Tempo x Frequência (Kong, 2020)	26
Figura 4 – Amplitude das frequências de alguns traços de uma linha sísmica.....	27
Figura 5 - Espectrograma indicando as maiores amplitudes	28
Figura 6 - Etapas da Filtragem de Frequência (Dondurur, 2018)	29
Figura 7 - Descrição dos 4 principais modelos de filtros de frequência (Davis, 2017)	29
Figura 8 - Distribuição das amplitudes no espectro das frequências	30
Figura 9 - Ilustração das rampas de um filtro Passa-Banda (fonte: <i>SeiSee</i> , 2013)	31
Figura 10 - Ilustração do espectro antes e depois da aplicação do Clareamento Espectral	31
Figura 11 - Janela de entrada dos parâmetros do Equalizador semi-Paramétrico.....	33
Figura 12- Exemplo de espectro resultante após o ajuste nos parâmetros da figura 11..	33
Figura 13 - Ilustração da janela deslizante na aplicação do filtro AGC (Dondurur, 2018)	35
Figura 14 - Exemplo da aplicação da curva manual de ganho (linha vermelha) sobre um traço sísmico (linha azul) e seus resultado (linha verde).....	36
Figura 15 - Funções e variáveis de cálculo do disparador STA/LTA (Trnkoczy, 1998)..	38
Figura 16 - Resultado de diferentes relações STA/LTA em comparação com dados brutos e envelopados	40
Figura 17 - Amplitude Instantânea (envelope) obtida pela Transformada de Hilbert (Zhenkun, 2014).....	41
Figura 18 - Associação temporal entre o incremento da aceleração da fase (maior inclinação da curva B) com as maiores frequências em A (menor distância entre os picos de amplitude). (Purves, 2014)	42
Figura 19 - Resultado da correlação de um pulso Chirp com ele mesmo produzindo a função Autocorrelação	43
Figura 20 - Efeito do ringing (A) sobre uma transição brusca de sinal (B)	43
Figura 21 - Klauder zero-phase wavelet (Dey, 1999)	44
Figura 22 - Wavelet de fase mínima – <i>Boomer</i> (Bousfield, 2017).....	47
Figura 23 - Wavelet de fase zero – Chirp (Bousfield - 2017)	47
Figura 24 - Wavelet Ricker (fonte: Mathematica em: https://reference.wolfram.com/language/ref/MexicanHatWavelet.html)	47
Figura 25 - Ilustração das wavelets <i>Meyer</i> (esq) e <i>Morlet</i> (dir) (fonte: Mathematica)	48
Figura 26 - Ilustração do Fluxograma Básico do programa	53
Figura 27 - EBCDIC header	54
Figura 28 - <i>Bin Header</i>	55
Figura 29 - Tela de <i>Working Window</i> sobre a tela de abertura do arquivo	56
Figura 30 - Janela de correção de <i>swell</i>	57
Figura 31 - Efeito do movimento do mar (<i>swell</i>) sobre os dados brutos.	58

Figura 32 - Efeito da aplicação da correção de <i>swell</i> através do Método 1.....	59
Figura 33 - Efeito da aplicação da correção de <i>swell</i> através do Método 2	59
Figura 34 - Janela de correção de DC.....	60
Figura 35 - Gráfico ilustrando o comportamento da média das amplitudes afastada de zero.....	60
Figura 36 - Ilustração da correção do ruído DC recalculando a média do sinal em torno de zero.....	61
Figura 37 - Janela de aplicação da correção da Divergência Esférica	61
Figura 38 - Espalhamento Esférico do som https://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-basics-pointsources.htm	62
Figura 39 - Dados originais sem correção de divergência esférica	62
Figura 40 - Efeito da correção da Divergência Esférica resultando em maior uniformidade dos sinais sísmicos	62
Figura 41 - Janela de inspeção do Espectro	63
Figura 42 - Janela do gráfico da Amplitude do Espectro presente em alguns traços da seção.....	64
Figura 43 - Espectrograma da seção sísmica completa mostrando a concentração das maiores amplitudes das frequências durante o tempo de execução da linha.....	65
Figura 44 - Janela de aplicação do Clareamento Espectral	66
Figura 45 - Seção sísmica original com os dados brutos	66
Figura 46 - Clareamento espectral utilizando o método PCA.....	67
Figura 47 - Clareamento espectral utilizando o método Cholesky	67
Figura 48 - Clareamento Espectral utilizando o método ZCA.....	67
Figura 49 - Comparação entre as frequências dos dados originais e as frequências após a aplicação do filtro de Clareamento Espectral pelo método ZCA.....	68
Figura 50 - Janela de aplicação do filtro Passa-Banda	69
Figura 51 - Ilustração da rampa (<i>Order</i>) de corte do filtro Passa-Banda (Robertson - 2018).....	70
Figura 52 - Dados brutos (<i>Raw</i>) antes da aplicação do filtro Passa-Banda	70
Figura 53 - Efeito de filtragem Passa-Banda com janela 200 - 3500 Hz	71
Figura 54 - Efeito de filtragem Passa-Banda com janela 1000 - 3500 Hz.	71
Figura 55 - Dados brutos envelopados de uma seção Chirp.....	72
Figura 56 - Filtragem 200 - 2000 Hz sobre os dados brutos da figura 53.....	72
Figura 57 - Janela da Equalização Paramétrica mostrando a definição de parâmetros de ganho nas faixas de frequência selecionadas.....	73
Figura 58 - Seção sísmica Chirp com dados brutos envelopados.....	74
Figura 59 – Resultado da atuação do filtro de ganho paramétrico com reforço nas baixas frequências.	74
Figura 60 - Janela de ganho AGC.....	75
Figura 61 - Dados brutos de entrada do filtro AGC	76
Figura 62 - Resultado da aplicação do ganho AGC sobre dados de entrada.....	76
Figura 63 - Definição da curva ganho manual de ganho (vermelho) sobre os dados originais (azul) e seu resultado (verde)	77

Figura 64 - Seção sísmica original com aplicação de filtro Passa-Banda sobre a qual será aplicada a curva de ganho customizada	78
Figura 65 - Resultado da aplicação da curva de ganho manual sobre os dados da seção sísmica da figura 59.....	78
Figura 66 - Janela do filtro STA/LTA	79
Figura 67 - Dados brutos filtrados com Passa-Banda sobre os quais será aplicado o filtro STA/LTA.....	80
Figura 68 - Resultado da aplicação do filtro STA/LTA sobre os dados brutos da figura 66	80
Figura 69 - Resultado da aplicação do filtro STA/LTA sobre dados filtrados através de Clareamento Espectral e sua distribuição de frequências antes e após a aplicação do filtro.	81
Figura 70 - Janela de Aplicação da Transformada de Hilbert.....	81
Figura 71 - Dados brutos filtrados com Passa-Banda utilizados na aplicação da Transformada de Hilbert.....	82
Figura 72 - Geração da Amplitude Instantânea (envelope) sobre dados da Figura 69 ...	83
Figura 73 - Dados brutos com filtragem Passa-Banda.....	84
Figura 74 - Filtro Cosseno da Fase sobre a imagem da figura 72 gerando imagem monotônica.....	84
Figura 75 - Dados brutos filtrados com Passa_Banda	85
Figura 76 - Visualização do atributo Aceleração da Fase.....	85
Figura 77 - Janela da Convolução Chirp-Ricker.....	87
Figura 78 - Dados brutos sobre os quais foi aplicada a Convolução com a wavelet Ricker	87
Figura 79 - Efeito da Convolução entre os dados da figura 77 e a wavelet Ricker	88
Figura 80 - Espectro resultante da Convolução Chirp-Ricker mostrando distribuição de ganho nas baixas e perda nas altas frequências.....	88
Figura 81 - Klauder zero-phase wavelet (Dey, 1999)	89
Figura 82 - Deconvolução do sinal de <i>Boomer</i>	89
Figura 83 - Janela de captura do sinal de fundo.....	90
Figura 84 - Etapas de construção da wavelet para a Deconvolução do Boomer	91
Figura 85 - Dados originais filtrados com Passa-Banda para redução de ruído	92
Figura 86 - Efeito da Deconvolução utilizando a wavelet da figura 82-C sobre os dados da figura 83	92
Figura 87 - Alteração do espectro da seção com o aumento nas altas frequências, resultante da Deconvolução dos dados brutos com a soma dos sinais capturados do fundo marinho.	93
Figura 88 – Dados brutos iniciais filtrados com Passa-Banda para correção inicial.....	93
Figura 89 - Amplitude Instantânea (envelope) sobre os dados iniciais	94
Figura 90 – Aplicação da Deconvolução sobre os dados iniciais.....	94
Figura 91 - Amplitude Instantânea (envelope) sobre a Deconvolução	94
Figura 92 - Dados originais.....	95
Figura 93 - Aplicação do filtro <i>Laplace</i> sobre os dados originais acima	95

Figura 94 - Aplicação da Derivada-X sobre os dados acima reforçando as reflexões verticais.....	96
Figura 95 - Aplicação da Derivada Y sobre dados brutos acima reforçando as reflexões horizontais.....	96
Figura 96 - Aplicação do filtro <i>Wiener</i> sobre os mesmos dados brutos reforçando as baixas frequências.	96
Figura 97 - Espectro de amplitude da seção visualizada	97
Figura 98 - Dados brutos usados para a aplicação dos vários filtros a seguir	98
Figura 99 - Resultado da aplicação do Clareamento Espectral	98
Figura 100 - Resultado da aplicação do filtro Passa-Banda	98
Figura 101 - Resultado da aplicação do Equalizador Paramétrico	99
Figura 102 - Visualização da Frequência Instantâneas obtida através da Transformada Hilbert.....	99
Figura 103 - Visualização do Cosseno da fase obtida pela Transformada <i>Hilbert</i>	99
Figura 104 - Atuação do filtro <i>Laplace</i>	100
Figura 105 - Visualização da aplicação da derivada em Y	100
Figura 106 - Atuação do filtro <i>Wiener</i>.....	100
Figura 107 – Resultado da Amplitude Instantânea sobre os dados Passa-Banda com baixa clareza nas feições de interesse.....	101
Figura 108 – Aplicação do controle de ganho AGC com melhora na qualidade de alguns refletores.....	101
Figura 109 – Aumento de resolução sísmica próximo ao fundo, com a aplicação da Deconvolução sobre os dados da Amplitude Instantânea.....	102
Figura 110 – Seção com dados originais <i>Chirp</i> envelopados	102
Figura 111- Aplicação do filtra Passa-Banda sobre os dados da figura 106 com aumento na penetração, porém com perda de resolução próximo ao fundo.	103
Figura 112 – Convolução dos dados Passa-Banda com a <i>wavelet Ricker</i> mostrando aumento de resolução da camada próxima ao fundo sem perda na penetração.	103
Figura 113 – Amplitude Instantânea aplicada sobre dados filtrados com Passa-Banda	104
Figura 114 - Amplitude Instantânea aplicada sobre o Clareamento Espectral resultando em aumento de resolução.	104
Figura 115 - Filtro <i>Wiener</i> aplicado sobre os dados do Clareamento Espectral mostrando redução de ruído em toda a imagem.....	105
Figura 116 - Visualização de refletores profundos através do filtro STALTA.....	105
Figura 117 - Dados brutos filtrados com Passa-Banda	108
Figura 118 - Dados brutos com aplicação do Clareamento Espectral.....	109
Figura 119 – Dados brutos filtrados por Passa-Banda	110
Figura 120 - Aplicação do filtro STA/LTA (janela 2 x 5) sobre os dados filtrados por Passa-Banda	110
Figura 121 - Determinação dos limites do sinal da reflexão do fundo.....	112
Figura 122 - Etapas de determinação da wavelet da autocorrelação a partir da reflexão do fundo.....	112

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	18
2 - OBJETIVO	22
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1 - Ruído DC	24
3.2 - Divergência Esférica.....	25
3.3 - Análise Espectral	26
3.4 - Filtro Passa-Banda.....	28
3.6 - Equalização Paramétrica	32
3.7 - Controle Automático de Ganho (AGC).....	33
3.8 - Controle Manual de Ganho	36
3.9 - Filtro STA/LTA.....	37
3.10 - Transformada de Hilbert.....	40
3.11 - Autocorrelação	42
3.12 - Convolução / Deconvolução.....	44
3.14 - Filtro Wiener	48
4 - APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO PROGRAMA	49
4.1 - Correções (CORRECTIONS).....	50
4.2 - Filtros de frequência (FREQ FILTERS)	50
4.2.1 - Análise Espectral (SPECTRUM)	50
4.2.2 - Filtro Passa-Banda (BAND PASS)	50
4.2.3 - Equalizador Paramétrico (PARAM EQUALIZ)	50
4.2.4 - Clareamento Espectral (SPECTRAL WHITEN).....	51
4.3 - Filtros de Amplitude (AMPL FILTERS)	51
4.3.1 Controle Automático de Ganho (AGC).....	51
4.3.2 - Controle Manual de Ganho (MANUAL GAIN)	51
4.3.3 - Algoritmo STA/LTA (STA/LTA)	51
4.3.4 - Transformada de Hilbert (HILBERT).....	51
4.4 - Convolução / Deconvolução (CONV/DECONV).....	52
4.5 - Filtros de Imagem (IMAGE FILTERS)	52
4.6 - Interpretação - (INTERPRET).....	52
4.7 - Navegação - (NAVIGATION).....	52

4.8 - Resize SEG-Y	52
5 - MODUS OPERANDI	53
5.1 - Carregamento dos dados sísmicos (OPEN)	54
5.2 - Definição da Área de Trabalho (WORKING WINDOW)	55
5.3 - Correções Sobre os Dados Brutos (CORRECTIONS).....	57
5.3.1 - Correção do Efeito das Ondas (SWELL FILTER)	57
5.3.2 - Remoção de Ruído DC (DC removal)	59
5.3.3 - Correção da Divergência Esférica (SPHERICAL DIVERGENCE).....	61
5.4 - Filtros de Frequência (FREQ FILTERS)	63
5.4.1 - Análise Espectral (SPECTRUM)	63
5.4.2 - Clareamento Espectral (SPECTRAL WHITENING)	65
5.4.3 - Filtro Passa-Banda (BAND PASS)	68
5.4.4 - Equalização Paramétrica (PARAM EQUALIZ)	73
5.5 - Filtragens de Ganho.....	75
5.5.1 - Filtragem de AGC (AGC).....	75
5.5.2 - Editor Manual de Ganho (MANUAL GAIN)	76
5.5.3 - Filtro STA/LTA (STA/LTA)	78
5.5.4- Transformada de Hilbert (HILBERT).....	81
5.6 - Convolução / Deconvolução (CONV/DECONV).....	85
5.6.1 - Convolução Chirp-Ricker (CHIRP-RICKER CONVOLUTION).....	85
5.6.2 - Deconvolução Boomer (BOOMER DECONVOLUTION).....	88
5.7 - Filtros de Imagem (IMAGE FILTERS)	95
5.8 - Mapeamento de Refletores (INTERPRET)	97
5.9 - Interpretação das Feições Sísmicas	100
5.11 - Botão Help	105
5.12 – NAVEGAÇÃO (NAVIGATION).....	106
5.13 – RESIZE SEG-Y	106
6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	107
6.1 - Clareamento Espectral.....	108
6.2 - Filtro STA/LTA.....	109
6.3 – Convolução e Deconvolução dos dados	111
6.3.1 - Convolução de dados <i>Chirp</i> com <i>Wavelet Ricker</i>	111
6.3.2 - Deconvolução de Dados de Boomer	111

6.4 - Resumo da Metodologia.....	113
8 - REFERÊNCIAS	116
8.1 – Bibliotecas Python Utilizadas	116
8.1.1- NumPy.....	116
8.1.2 - Matplotlib	116
8.1.3 - SciPy.....	116
8.1.4 - Tkinter	117
8.1.5 - Pandas.....	117
8.1.6 - Obspy.....	117
8.1.7 - DXFwrite	118
8.1.8 - UTM	118
9 – BIBLIOGRAFIA	119

1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de sísmica monocanal em ambiente aquático são equipamentos utilizados para a inspeção, por método indireto, do leito marinho, fluvial ou lagunar e que permitem o mapeamento das características morfológicas e estruturais da geologia de fundo e subfundo do local de estudo.

Possuem alta gama de utilização, sendo aplicados desde a pesquisa científica e o monitoramento ambiental, passando pelo suporte a atividades de engenharia e óleo e gás, podendo geralmente ser instalados até em pequenas embarcações, necessitando de pouca infraestrutura para o seu funcionamento. Permitem entender melhor a geologia do subfundo e inverter dados sísmicos visando estimar velocidades, densidades e módulos elásticos.

Esses equipamentos são constituídos basicamente por unidades de emissão e recepção de ondas acústicas denominados transdutores e hidrofones, operando em faixas definidas do espectro de frequência. Os transdutores acústicos podem ser instalados lateralmente ou no casco da embarcação, abaixo da linha d'água (nos denominados sistemas *Chirp* e *Sub Bottom Profiler*) ou ainda em flutuadores do tipo catamarã contendo o sensor do emissor acústico e um tubo flexível flutuante contendo os sensores de recepção (hidrofones) do sinal regularmente espaçados, rebocados próximo a linha d'água e nas proximidades da embarcação (nos denominados sistemas *Boomer*, *Sparker*, *Bubble Gun* etc.).

Por serem perfiladores acústicos, permitem a visualização em tempo real da seção sísmica abaixo da embarcação, à medida que se movimentam sobre uma linha de levantamento previamente programada. Ajustes na geometria dos sensores e nas frequências de emissão podem ser feitos durante a fase de aquisição para a melhoria na qualidade das imagens visualizadas e gravadas a bordo. As seções resultantes das perfilagens sísmicas de reflexão monocanal, permitem a visualização do comportamento estrutural da geologia de subfundo através das variações de intensidade e na textura nas imagens das seções sísmicas resultantes.

Contudo, por serem monocanal e por conseguinte não possuírem redundância de dados sobre o mesmo ponto (CDP), característica inerente aos sistemas sísmicos multicanal, permitem somente a extração dos atributos básicos de amplitude, frequência e fase, limitando o processamento posterior dos sinais a estes atributos sísmicos.

Os equipamentos de sísmica monocanal aquática são divididos em dois tipos de acordo com as emissões do pulso sísmico: fontes impulsivas e ressonantes.

Nas fontes impulsivas, a gera o do pulso sísmico pode se dar através, por exemplo, do centelhamento de eletrodos na  gua. Esses sistemas são conhecidos como *Sparker* e notadamente atuam em potências maiores alcançando maiores profundidades de investiga o, porém com menores resolu es. Sistemas impulsivos de menor potência e melhores resolu es utilizam o deslocamento de uma membrana elástica para a produ o do pulso sísmico. Essa membrana   movimentada através da excita o de uma bobina por um pulso elétrico proveniente da descarga de um banco de capacitores elétricos a bordo. São conhecidos como sistemas *Boomer*, *Sparker*, *etc.* e operam entre frequências de 100 a 2000 Hz ([Souza](#) – 2011).

Os sistemas ressonantes utilizados na sísmica monocanal operam através da emissão do pulso acústico através das propriedades piezoelétricas de determinados cristais de minerais específicos que, quando eletricamente excitados, vibram em frequências específicas, transmitindo essa vibra o para a massa d' gua. Caracterizam-se por maiores frequências de emissão e naturalmente maiores resolu es possuindo, porém, menores penetra es nos sedimentos submersos. Essas fontes emitem um pacote de frequências simultâneas dentro de uma faixa a partir de 500 Hz determinadas pelo equipamento, produzindo um pulso de frequência modulada. Esses sistemas são conhecidos como *Sub Bottom Profiler* e *Chirp* e tiveram um grande desenvolvimento técnico nos equipamentos, podendo alcançar frequências muito altas (até 50 kHz) permitindo obter resolu es sísmicas verticais que podem alcançar ordens centimétricas ([Souza](#) – 2021).

As penetra es das ondas sísmicas nos sedimentos decorrem das frequências envolvidas, do tipo de fontes de modula o dos pulsos sísmicos (ressonante ou impulsiva) e do ambiente geológico presente. Nas menores frequências a penetra o pode alcançar mais de 100 metros e nas maiores a vários centímetros.

O processamento e a interpreta o desses dados sísmicos monocanal para as finalidades propostas dos levantamentos geofísicos, podem ser executadas através de softwares básicos fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos ou adquirido de empresas que desenvolvem softwares especificamente voltados para este fim.

As empresas que comercializam estes softwares são de dois tipos: empresas voltadas para o processamento sísmico multicanal, utilizado em levantamentos para pesquisa

petrolífera e empresas voltadas para o processamento de dados de geofísica de alta resolução (batimetria, side scan sonar e sísmica monocanal).

Os softwares de levantamentos sísmicos multicanal utilizados principalmente na indústria de óleo e gás são extremamente completos e complexos, decorrente das necessidades oriundas do foco da pesquisa e das maiores possibilidades de processamento inerentes a esse tipo de dado.

Os softwares para processamento monocanal executam um excelente trabalho, porém estão limitados aos procedimentos e filtros definidos pelo fabricante, além de seu custo. Permitem a visualização em tempo real da seção sísmica abaixo da embarcação e ajustes na geometria dos sensores e nas frequências de emissão podem ser feitos durante a fase de aquisição para a melhoria na qualidade das imagens visualizadas e gravadas a bordo. As seções resultantes visualizam o comportamento estrutural da geologia de subfundo através das variações de intensidade e na textura nas imagens resultantes. Por serem monocanal e por conseguinte não possuírem redundância de dados sobre o mesmo ponto (CDP), característica inerente aos sistemas sísmicos multicanal, permitem somente a extração dos atributos básicos de amplitude, frequência e fase, limitando o processamento posterior dos sinais a estes atributos sísmicos.

Os softwares mais adequados ao processamento sísmico destes sinais pertencem a alternativas comerciais tais como HyPack, HydroPro, SonarWiz, etc, porém envolvem a aquisição do pacote completo de processamento sísmico, sonográfico e batimétrico.

Analisando as opções [open source](#) voltadas para a visualização, interpretação e análise disponíveis encontramos algumas aplicações para o processamento e visualização de dados sísmicos, porém a maioria é focada na visualização 3D e modelagem sísmica, (OpendTeck, OpenGescience, etc) fornecendo resultados mais elaborados que os necessários para uma interpretação sísmica monocanal expedita e necessitando de melhores hardwares e placas de vídeo, sendo por vezes de difícil instalação. Gasperini et al. (2009) com o programa *SeisPhro* e Dal Forno et al. (2008) com o programa *Chircor*, ambos de código aberto, foram pioneiros no desenvolvimento de soluções alternativas aos softwares comerciais nesta interpretação sísmica expedita. A abordagem utilizada nesses dois softwares balizou a estrutura e o desenvolvimento deste programa bem como as análises e filtragens ali executadas.

A partir da análise dos sinais sísmicos emitidos por fontes ressonantes do tipo Chirp vários autores buscaram um fluxo ótimo de processamento para esses sinais de reflexão monocanal.

Quinn et al. (1998) propôs um processamento envolvendo dados chirp não correlacionados com a autocorrelação da assinatura da fonte sísmica e posterior deconvolução e filtragem. Também com dados chirp, Gomes et al. (2010) utilizou inicialmente a análise espectral e a filtragem em frequências e ganho para executar a deconvolução preditiva ao fim do processo. Teixeira (2013) utilizou outro fluxo de processamento em dados chirp com análise espectral, filtragem passa-banda e correção da divergência esférica para a obter o colapso de difrações através da migração e ajustar a morfologia das estruturas. Marino et al. (2013) buscando aumentar a continuidade lateral de refletores, ainda em dados chirp, utilizou o Clareamento Espectral para enfatizar a estratificação cruzada de depósitos sedimentares. Park et al. (2018) utilizando um chirplet ideal retirado no sinal de reflexão do fundo do mar realizou a deconvolução. Uge et al. (2018) comparou os métodos de processamento descritos por Quinn et al. (1998) e Baradello, L. (2014) em relação as características dos resultados após a migração. Santos et al. (2021) utilizando dados de um sistema Sparker em estruturas estratigráficas rasas utilizou análise espectral e filtrações de frequência e correção de ganho buscando a deconvolução preditiva e a migração Kirchhoff. King et al. (2022) avaliou técnicas de extração de wavelets de fonte chirp utilizando um filtro de aprendizado de máquina adaptativo com eficácia na deconvolução determinística. Um dos métodos produziu uma wavelet fonte ótima e produziu seções estratigráficas com alta resolução.

Os fluxos de processamento observados acima pelos vários autores indicaram caminhos diversos na busca pela melhor visualização, e definiram as principais ferramentas utilizadas na extração dos sinais sísmicos. Algumas destas foram utilizadas na construção deste programa visando a construção do melhor arranjo de processamento na busca da melhor interpretação sísmica. O programa também deveria permitir a exportação dos refletores sísmicos interpretados e das imagens filtradas para uso em outros softwares. No desenvolvimento e nos testes foram utilizados dados oriundos de fontes impulsivas (Boomer) e ressonantes (Chirp).

A linguagem de programação Python foi a escolha natural para o desenvolvimento do fluxo de processamento devido às facilidades de construção e testagem dos códigos durante as várias etapas do projeto. A literatura e a ampla variedade de funções físicas e matemáticas

disponíveis em várias [bibliotecas](#) pré-compiladas, foi outro fator relevante na escolha da linguagem.

2 - **OBJETIVO**

Os softwares voltados para o processamento monocal são mais simples e de menor custo que os necessários para o processamento multicanal, porém seus custos são muitas vezes inacessíveis para entidades de pesquisa científica e pequenas empresas. Além disso, estes softwares monocal são limitados às funções que o fabricante determina e não permitem o acréscimo de novas abordagens ao processamento sísmico. Em consequência, não foram encontradas soluções de baixo custo com um leque de filtragens alternativas para facilitar o trabalho do intérprete na análise do conteúdo destes dados sísmicos.

Em decorrência do panorama descrito acima foi analisada a possibilidade de construção de uma aplicação *open-source* para o processamento e a interpretação desses dados sísmicos monocal e que fosse estruturada numa linguagem de fácil compreensão, de modo a facilitar o entendimento do fluxo do processamento e ao mesmo tempo contivesse novas funcionalidades além daquelas já conhecidas, aumentando sua eficiência operacional.

A disponibilização do código utilizado permite, *a posteriori*, o acréscimo de novos procedimentos e alternativas ao processamento sísmico desses dados.

3 - **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A sísmica monocal de alta resolução opera em frequências superiores aos da sísmica multicanal convencional. Como ilustrado na figura 1, comparando os resultados de 3 perfiladores:

- Pinger (24 kHz) em (A),
- Chirp (2-8 kHz) em (B) e
- Boomer (0.1-1.5 kHz) em (C)

observamos que as resoluções e penetrações estão intimamente associadas às frequências utilizadas pelas fontes acústicas e fornecem resultados complementares.

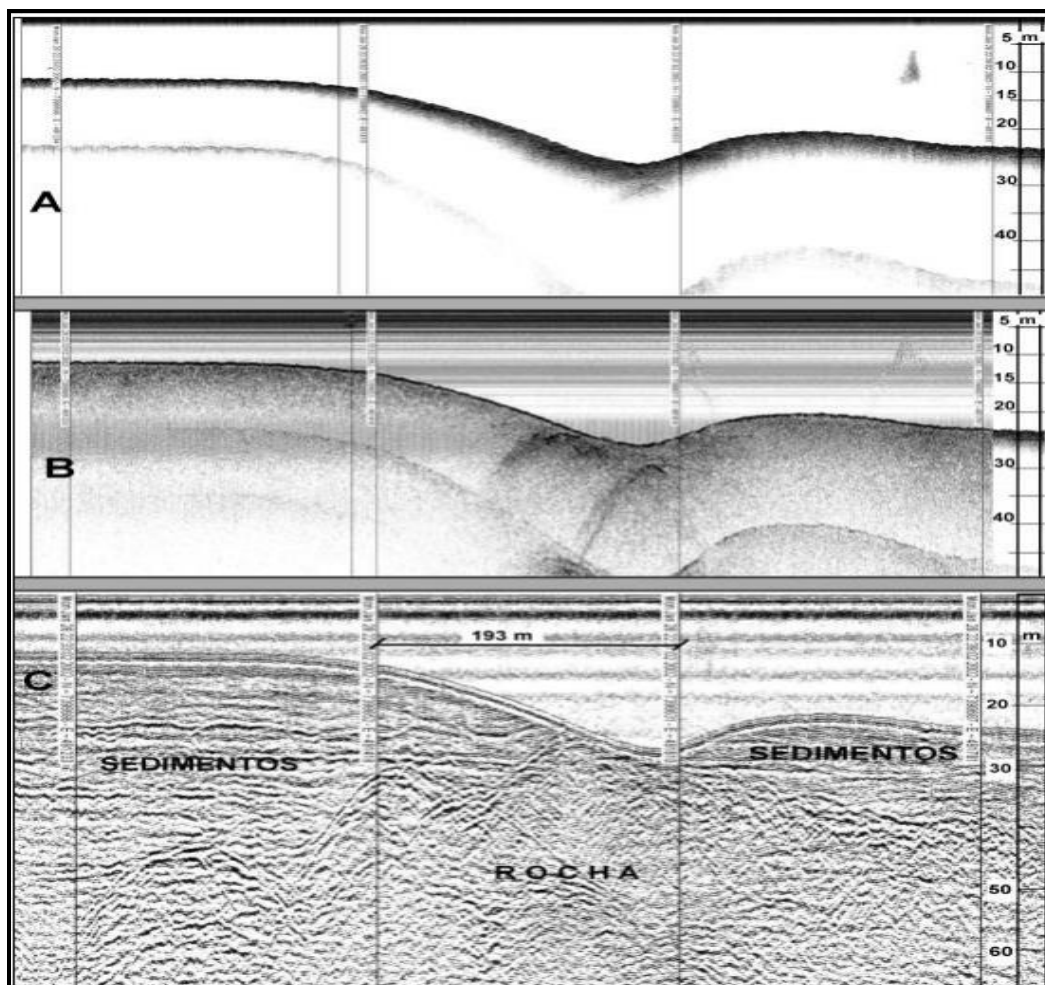


Figura 1 Comparação entre resultados de 3 perfiladores ([Souza, 2008](#))

Desse modo as frequências de operação determinam a escolha do equipamento adequado para o objetivo do levantamento e por isso são o atributo principal a ser utilizado no processamento dos sinais retornados visando a extração da informação com a melhor qualidade possível. Assim, as frequências presentes nos dados devem ser trabalhadas através dos filtros disponíveis, buscando aumentar a relação sinal/ruído nos dados sísmicos retornados.

No programa, os filtros de frequência disponíveis são o Passa-Banda, a Equalização Paramétrica e o Clareamento Espectral.

Também podem ser executadas correções nos dados brutos tais como a Redução de Ruído DC, a Correção da Divergência Esférica e a Remoção do Efeito das Ondas (Swell).

Após a extração das frequências presentes e a remoção de ruídos instrumentais, geométricos e ambientais, aplicam-se os ganhos de amplitude nos sinais filtrados: AGC, STA/LTA e Ganho Manual. Para dados analíticos a aplicação da Transformada de Hilbert permite também a extração das Amplitude, Frequência e Fase Instantânea.

Para dados envelopados é possível somente aplicar a Convolução com a Wavelet Ricker. Os dados analíticos permitem a Convolução e a Deconvolução dos dados sísmicos.

As etapas descritas no Item 3 (Fundamentação Teórica) obedecem às características físicas inerentes a cada processamento efetuado cuja descrição está resumida abaixo.

3.1 - Ruído DC

Considerando que o ambiente onde ocorre a aquisição sísmica é naturalmente ruidoso e que um dos principais objetivos do processamento dos dados sísmicos é aumentar a relação sinal/ruído, temos de investigar inicialmente a possibilidade de redução do ruído eletrônico produzido pelos equipamentos. Um desses fenômenos é conhecido como ruído DC.

A presença de ruído DC está associado a imperfeições do conversor Analógico/Digital (A/D) durante a conversão dos dados oriundos do transdutor na recepção do sinal sísmico.

Essa conversão pode conter o chamado *DCbias* que se caracteriza por um desvio na média das amostras de tempo que, por definição, deve ser zero. Um nível de polarização DC diferente de zero em sinais sísmicos é particularmente problemático na concatenação de dois traços sísmicos, dificultando o mapeamento da continuidade dos refletores.

Devido ao fato de os dados do traço sísmico serem sequências de comprimento fixo, a remoção de DC é direta, bastando apenas calcular a média de N amostras de tempo e subtrair esse valor médio de cada amostra original do traço para produzir uma nova sequência de tempo cuja polarização DC será extremamente pequena. A figura 2 abaixo ilustra o efeito e sua remoção.

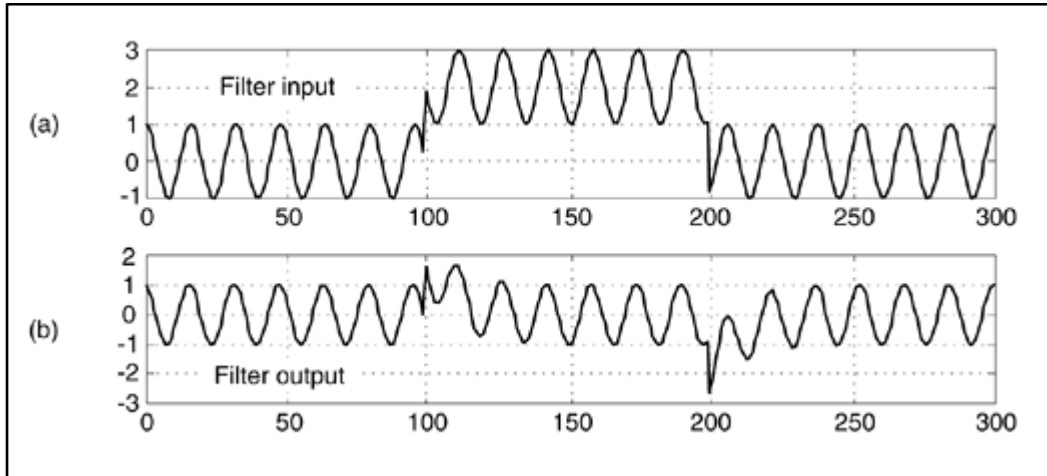


Figura 2 - Atuação do filtro de remoção de DCbias: (a) antes; (b) depois (Lyons, 2004)

3.2 - Divergência Esférica

A geometria do sistema de aquisição sísmica monocanal é conhecida como zero-offset implicando que a emissão e a recepção dos sinais sísmicos são feitas no mesmo ponto. Durante a emissão do pulso sísmico, à medida que a frente de onda se expande, a energia é distribuída por uma área mais ampla e a amplitude decai com a distância da fonte.

Considerando um meio isotrópico e homogêneo e uma onda de propagação esférica, a intensidade de energia é inversamente proporcional ao quadrado do raio da frente de onda estabelecido pela lei da conservação de energia dada pela fórmula a seguir:

$$\rho \propto \frac{1}{r^2}$$

sendo ρ a intensidade de energia por unidade de superfície e r o raio da frente de onda. Como a amplitude A da onda é proporcional a raiz quadrada da intensidade de energia, tem-se:

$$A \propto \frac{1}{r} \quad \text{ou} \quad A \propto \frac{1}{vt}$$

sendo v a velocidade da onda no meio e t o tempo de propagação.

Esse decaimento de amplitude por área é conhecido como Divergência Esférica e pode ser compensado no processamento sísmico através da correção da divergência esférica (ou espalhamento esférico) onde se tenta recuperar ao máximo essa energia perdida, de forma a assemelhar-se com a amplitude da energia da onda original.

Devido a maior atenuação das altas frequências presentes na sísmica de alta resolução, característica deste tipo de levantamento, a divergência esférica torna-se mais relevante em levantamentos em regiões mais rasas ([Rodrigues, M.C.-2019](#))

3.3 - Análise Espectral

O retorno do sinal sísmico emitido possui três componentes principais: a amplitude, a frequência e a fase. A amplitude é visualizada na imagem da seção sísmica. A frequência e a fase são usadas para o aprimoramento da amplitude através de filtros para ressaltar ou suprimir frequências ou fases indesejadas. A visualização da frequência é uma importante ferramenta de análise do traço sísmico.

A análise espectral é uma técnica que estima a potência sendo a potência igual a energia por unidade de tempo, expressa como o quadrado médio da amplitude do sinal. de um sinal em frequências diferentes. <https://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/dataview/tutorials/sonogram.html>

Um traço sísmico se compõe de uma sequência discreta de valores definidos pela taxa de amostragem do conversor analógico-digital (AC-DC). Esses, dados são passados pelo algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT).

A transformada de Fourier permite a mudança do sinal do domínio do tempo (Tempo x Amplitude) para o domínio da frequência, podendo ser visualizado num plano Frequência versus Amplitude (Figura 3).

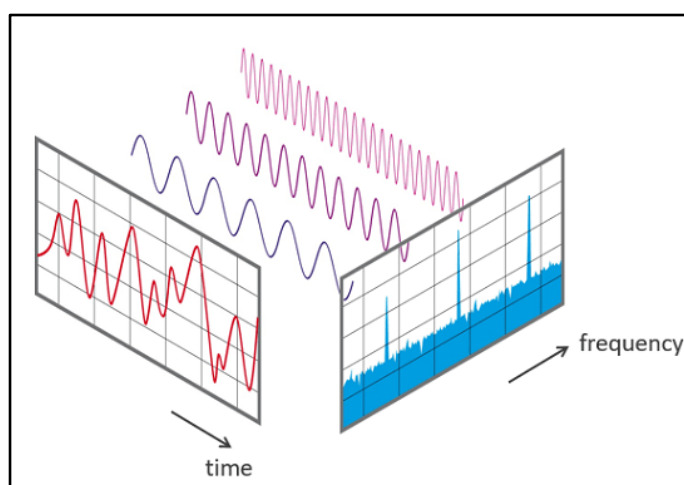


Figura 3 - Relação Amplitude x Tempo x Frequência (Kong, 2020)

O algoritmo produz um conjunto de bandas de frequência igualmente espaçadas em uma faixa de 0 (DC) até a frequência de Nyquist (metade da frequência de amostragem) e nos diz quanta potência existe dentro de cada uma dessas bandas.

A análise espectral padrão combina todas as amostras no sinal e produz um único gráfico 2D mostrando a potência média. Isso não nos diz nada sobre quaisquer mudanças na frequência do sinal, apenas fornece a potência do perfil de frequência de todo o sinal (Figura 4).

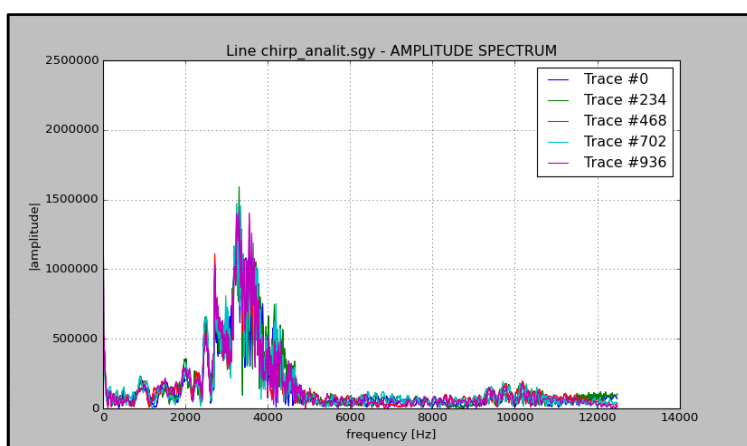


Figura 4 – Amplitude das frequências de alguns traços de uma linha sísmica

No entanto, às vezes estamos interessados em saber como a frequência muda com o tempo dentro do sinal. Neste caso, o sinal é dividido em pedaços sucessivos que são analisados em série para produzir um gráfico de Frequência versus Potência versus Tempo conhecido como Espectrograma.

Na sísmica monocanal pode ser utilizado para o mapeamento da variação da intensidade das frequências ao longo da seção sísmica. <https://pnsn.org/spectrograms/what-is-a-spectrogram>

Geralmente são exibidos como um gráfico 2D de frequência versus tempo, com a potência (a dimensão Z) sendo codificada por cores (Figura 5).

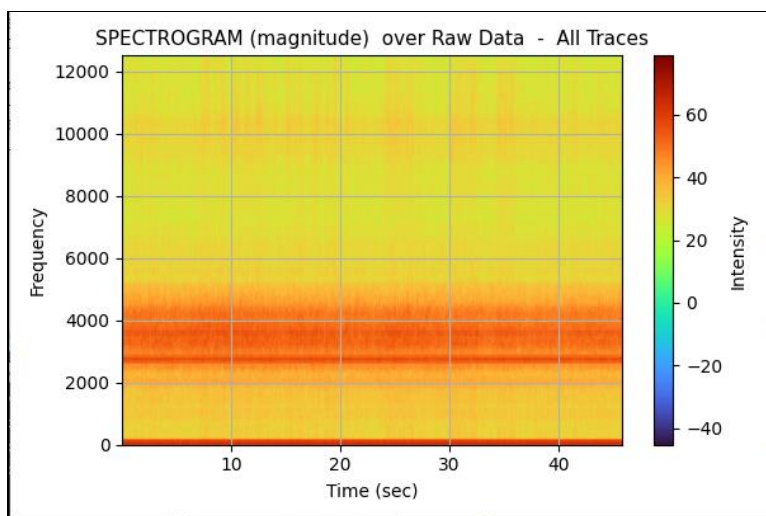


Figura 5 - Espectrograma indicando as maiores amplitudes de frequência ao longo da seção sísmica

3.4 - Filtro Passa-Banda

Uma das opções de filtragem no domínio da frequência envolve a multiplicação do espectro de amplitude do traço sísmico de entrada por um operador de filtro. Esse procedimento é descrito na Figura 6 onde temos a amplitude do dado bruto convolvida com um operador de filtro resultando num espectro de amplitude filtrado.

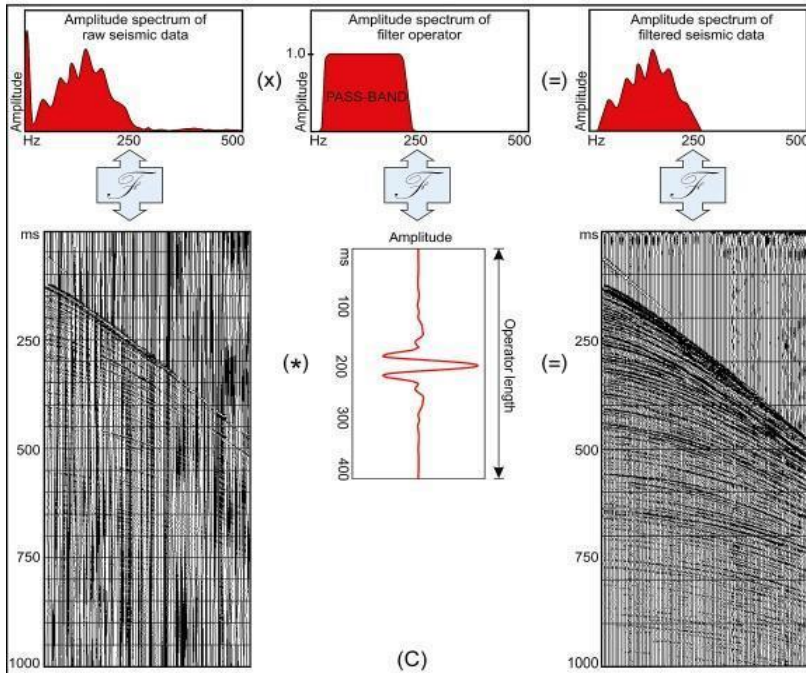


Figura 6 - Etapas da Filtragem de Frequência (Dondurur, 2018)

Os operadores de filtro podem ser de vários tipos: filtro Passa-Baixas, Passa-Altas, Passa-Banda e filtro Notch. O filtro mais utilizado é o filtro Passa-Banda pela sua versatilidade na seleção das frequências úteis e na supressão das frequências indesejadas (Figura 7)

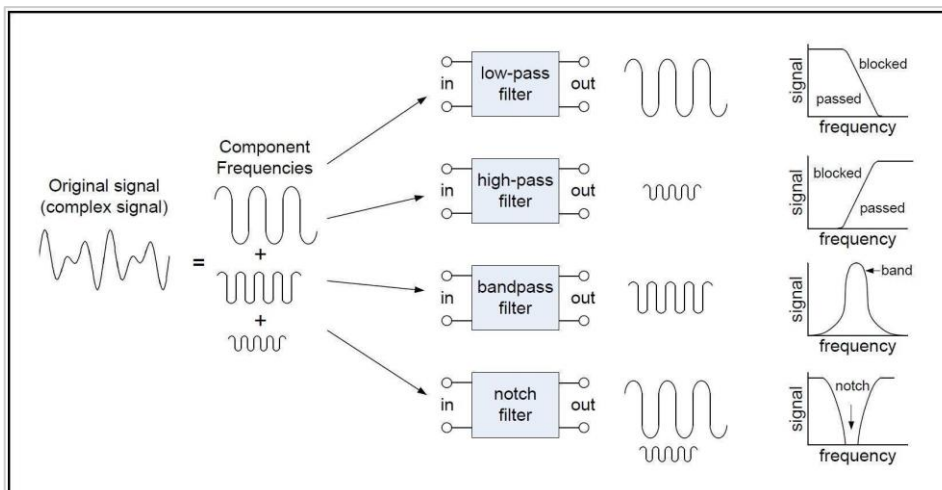


Figura 7 - Descrição dos 4 principais modelos de filtros de frequência (Davis, 2017)

No caso do filtro Passa-Banda, após sua aplicação, o traço de saída conterá amplitudes apenas na banda de frequência do operador do filtro. A filtragem não afeta o espectro de fase; apenas o espectro de amplitude torna-se limitado em banda. Se a banda de passagem aumentar

no domínio da frequência, o operador do filtro no domínio do tempo se estreitará e, conterà um menor número de coeficientes de filtro diferentes de zero, o que torna a operação do filtro computacionalmente mais rápida.

Assim, uma vez determinadas as frequências de interesse na seção sísmica através da visualização do espectro dos traços e suas amplitudes relativas (Figura 8), pode-se definir a janela de um filtro Passa-Banda para inclusão dessas frequências escolhidas e supressão das frequências com baixa relação sinal/ruído.

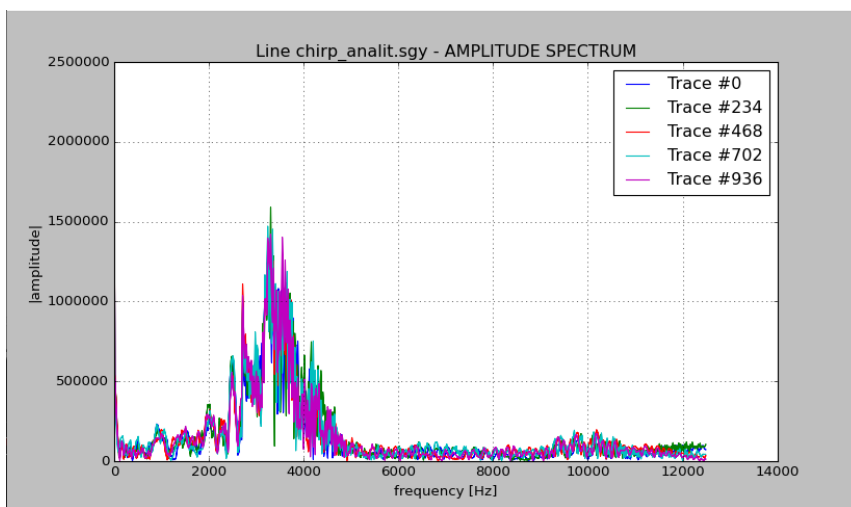


Figura 8 - Distribuição das amplitudes no espectro das frequências

Nessa janela de passagem entre duas frequências determinadas, os limites dessa janela não são verticais, mas possuem duas rampas, uma na entrada e outra na saída. A inclinação dessas rampas é definida pelo valor da ordem da função Passa-Banda sendo o maior valor associado a maior verticalização da rampa (Figura 9).

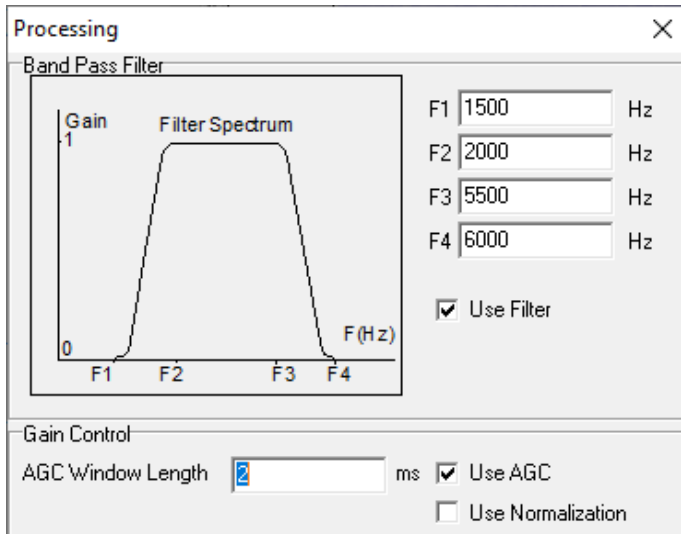


Figura 9 - Ilustração das rampas de um filtro Passa-Banda (fonte: [SeiSee](#), 2013)

3.5 - Clareamento Espectral

O objetivo do Clareamento Espectral é aumentar o equilíbrio na amplitude das frequências para obter uma maior resolução. A forma mais comum de branqueamento espectral é dividir o conjunto de dados em várias bandas de frequência estreitas através de filtragem Passa-Banda, equalizando as seções por AGC (ou alguma outra função de escala) e somando as seções resultantes.

O clareamento espectral é geralmente uma tentativa de tornar o espectro do sinal "mais uniforme" tornando a autocorrelação do sinal "mais estreita" e mais próxima de um delta de *Kronecker*, para sinais de tempo discreto ([Claudino – 2020](#)). Isso pode ajudar na visualização das frequências com baixa amplitude melhorando a resolução de toda a seção sísmica (Figura 10)

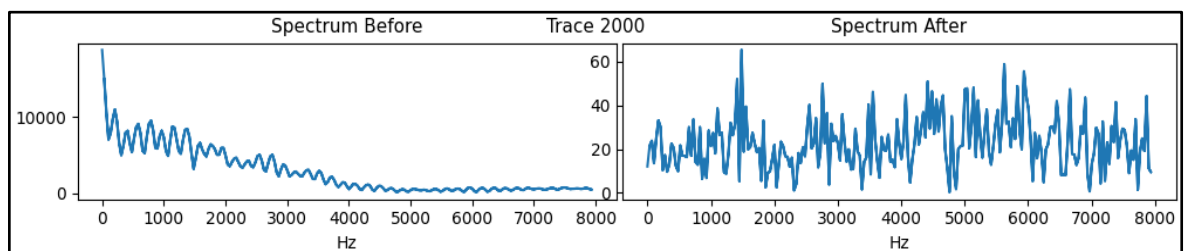


Figura 10 - Ilustração do espectro antes e depois da aplicação do Clareamento Espectral

Pode ser utilizado antes de filtros de frequência e de correlações com dados brutos de sistemas impulsivos (*Boomer*) e ressonantes (*Chirp*) para incrementar frequências de menor amplitude na seção sísmica.

3.6 - Equalização Paramétrica

A equalização paramétrica sísmica é uma técnica usada no processamento e interpretação sísmica para modificar o ganho de faixas específicas de frequência nos dados sísmicos, permitindo enfatizar ou não certos recursos ou características da geologia de subsuperfície.

A equalização paramétrica sísmica é normalmente realizada no domínio da frequência, usando técnicas como Transformadas de Fourier ou Transformadas Wavelet para converter os dados sísmicos do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo que o filtro ou técnica de processamento seja aplicado diretamente aos componentes de frequência dos dados sísmicos, em vez das amostras de tempo ([Välimäki 2016](#)).

Um equalizador paramétrico, é dividido em faixas de frequência e cada uma das quais pode implementar uma função de filtro de segunda ordem (low-pass, high-pass, band-pass e notch). Isso envolve três ajustes:

- 1 - Seleção dos canais de frequência central (em Hz);
- 2 - Ajuste do valor Q que determina a nitidez da largura de banda e nível;
- 3 - Controle de ganho que determina o quanto essas frequências são aumentadas ou diminuídas em relação à frequência central selecionada.

Em um equalizador como o utilizado no programa, a largura entre duas bandas pode ser ajustada em 9 canais e o ganho pode ser estabelecido para cada uma dessas bandas. Este algoritmo não possui o ajuste do fator Q sendo por isso considerado semi-paramétrico (Figura11).

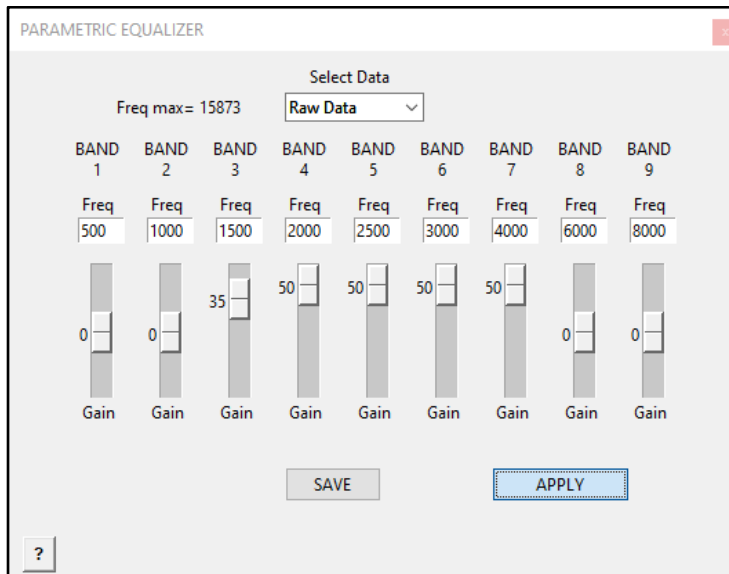


Figura 11 - Janela de entrada dos parâmetros do Equalizador semi-Paramétrico.

Uma descrição completa de um equalizador gráfico pode ser obtida em <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/graphiceq-system-object.html>

Este procedimento permite a incrementar, suprimir ou manter inalteradas as amplitudes de algumas faixas de frequências pré-selecionadas, de modo a modificar o ganho de amplitude do sinal em frequências de interesse. Como exemplo, os parâmetros exemplificados da figura 11, definem um ajuste de ganho nas frequências acima de 1kHz e seu espectro resultante está ilustrado na figura 12.

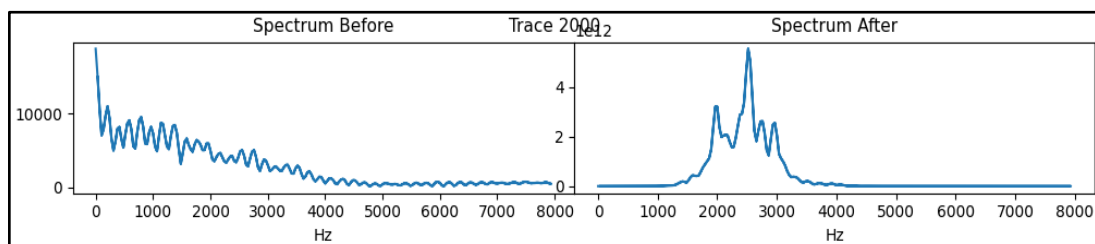


Figura 12- Exemplo de espectro resultante após o ajuste nos parâmetros da figura

11

3.7 - Controle Automático de Ganho (AGC)

O Controle Automático de Ganho (AGC) é um dos métodos de recuperação de ganho mais comuns no processamento sísmico. O AGC é aplicado aos dados sísmicos traço a traço usando uma janela de tempo deslizando.

A Fig. 13 mostra o princípio de aplicação do AGC. Uma janela com um comprimento de Δt é selecionada (Figura 13A), e esta janela é progressivamente movida para baixo ao longo do eixo do tempo amostra por amostra (Figuras 13B e 13C).

Aqui, Δt também é conhecido como comprimento do operador AGC. A cada movimentação da janela um fator de escala é calculado usando as amplitudes dentro da janela de tempo especificada.

Esse escalar, pode ser igual ao inverso da raiz quadrada média (RMS), média ou valor de amplitude mediana da janela de tempo, com o valor da amplitude sendo calculado no centro da janela.

Em seguida, a janela é movida por uma amostra e um novo escalar é calculado e aplicado à amostra central da janela. No início e no final do traçado, no entanto, não haverá amostras de amplitude suficientes para atender ao comprimento da janela AGC. Portanto, o comprimento do operador começa com um valor pequeno no início e aumenta à medida que é movido para baixo ao longo do traço, até que o comprimento total da janela seja atingido, permanece constante neste comprimento total do operador até atingir o final do traço, e então começa a diminuir progressivamente para comprimentos menores no final do traço.

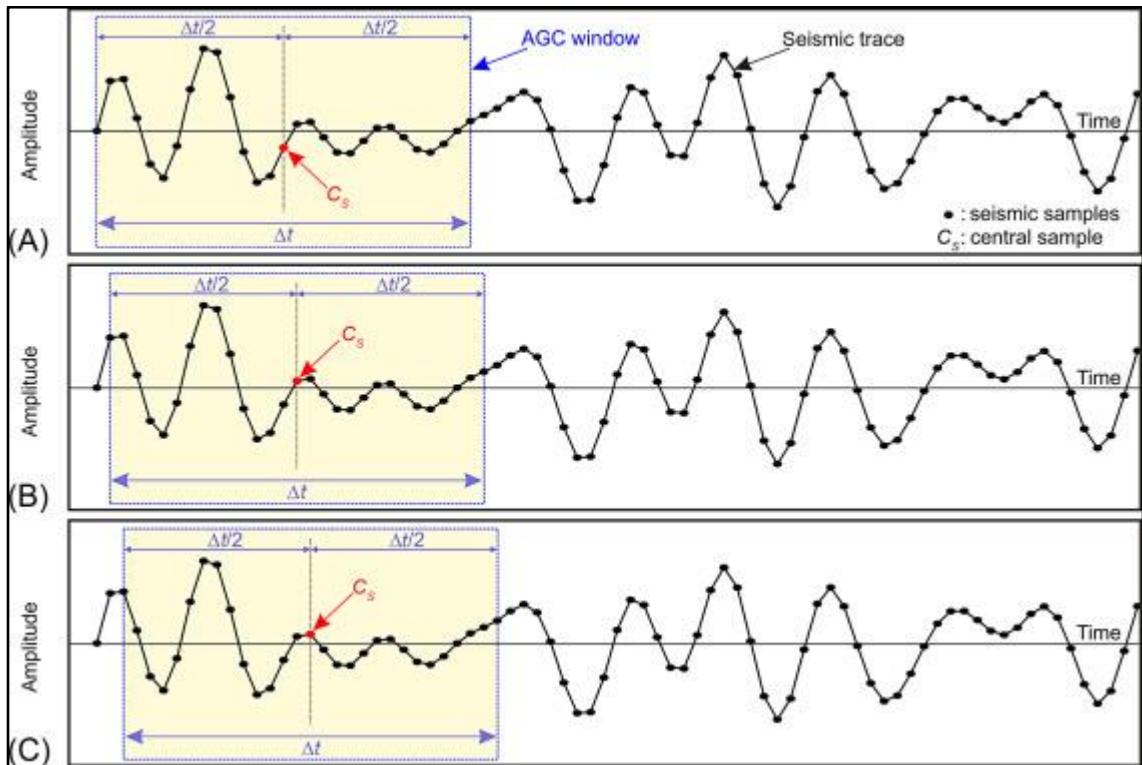


Figura 13 - Ilustração da janela deslizante na aplicação do filtro AGC (Dondurur, 2018)

Outros métodos de aplicação do AGC envolvem a Convolução do sinal com um vetor de pesos de comprimento igual à largura da janela, e o método Robust AGC onde as amostras mínimas e máximas dentro de uma janela são excluídas antes de calcular a média. Neste método, os extremos de amplitude são preservados (Dondurur, 2018).

3.8 - Controle Manual de Ganho

O Controle Manual de Ganho de Amplitude é uma ferramenta usada para ajustar as amplitudes dos dados sísmicos de acordo com uma curva de ganho customizada pelo usuário a fim de aumentar ou diminuir a ênfase de características específicas da geologia de subsuperfície.

O ganho sísmico manual é realizado no domínio do tempo (Time Variable Gain), sendo frequentemente utilizado em combinação com outras técnicas, de redução de ruído, para melhorar a qualidade e clareza dos dados. Ele pode ser usado para corrigir variações nas amplitudes das ondas sísmicas, visando realçar seu contraste.

Esse filtro permite ao usuário a criação de uma curva de ganho personalizada para corrigir distorções de ganho que não tiveram êxito em processos anteriores. O processo envolve a digitalização dos vértices (linha vermelha) de uma curva de ganho sobre o traço sísmico analisado (linha azul) de modo a incrementar ou decrementar a amplitude desse traço. O resultado é visualizado em forma de um traço resultante (linha verde) e seu novo ganho é aplicado na imagem sísmica correspondente (Figura14).

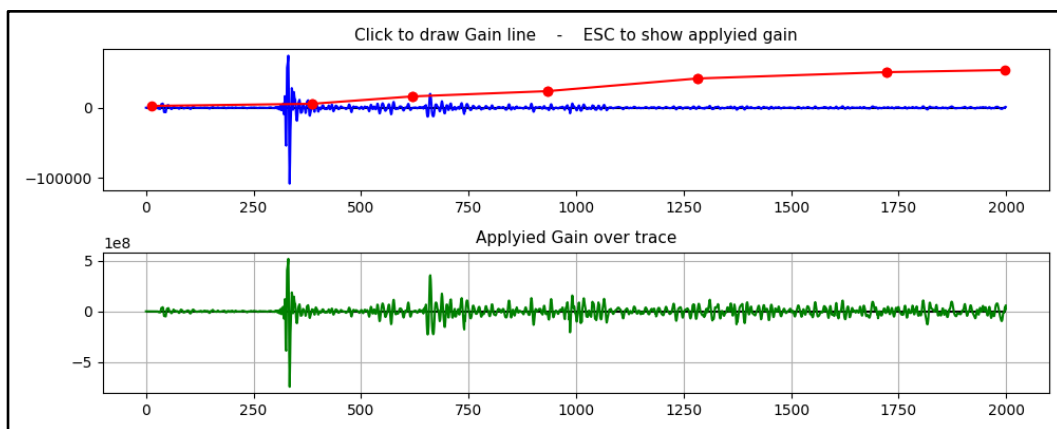


Figura 14 - Exemplo da aplicação da curva manual de ganho (linha vermelha) sobre um traço sísmico (linha azul) e seus resultado (linha verde)

3.9 - Filtro STA/LTA

O nome do filtro relaciona-se ao algoritmo utilizado que utiliza a relação Short Time Average / Long Time Average. Este algoritmo é utilizado em estações de redes sismográficas terrestres e foi projetado pelos sismólogos para otimizar a gravação de eventos sísmicos de modo a evitar o armazenamento de eventos não correlacionados, normalmente associados a ruídos antrópicos.

O algoritmo de disparo mais utilizado atualmente é denominado STA/LTA. Ele opera calculando continuamente os valores médios da amplitude absoluta de um sinal sísmico em duas janelas de tempo móvel consecutivas. A janela de tempo curta (STA) é sensível a eventos sísmicos, enquanto a janela de tempo longo (LTA) fornece informações sobre a amplitude temporal do ruído sísmico no local. Quando a proporção de ambos atinge um valor predefinido, um evento é “declarado” e os dados começam a ser registrados em arquivo ([Trnkoczy, 1998](#)).

A captura bem-sucedida de eventos depende das configurações adequadas dos parâmetros de disparo. Este algoritmo é geralmente utilizado em aplicações de movimento fraco para tentar registrar o máximo possível de eventos sísmicos.

A janela média de curta duração (STA) mede o valor instantâneo de um sinal sísmico ou seu envelope. A de longa duração (LTA) cuida da amplitude média atual do ruído. Para melhor compreensão, a Figura 15 mostra um evento local típico e as variáveis de gatilho (simplificadas) durante o disparo STA/LTA.

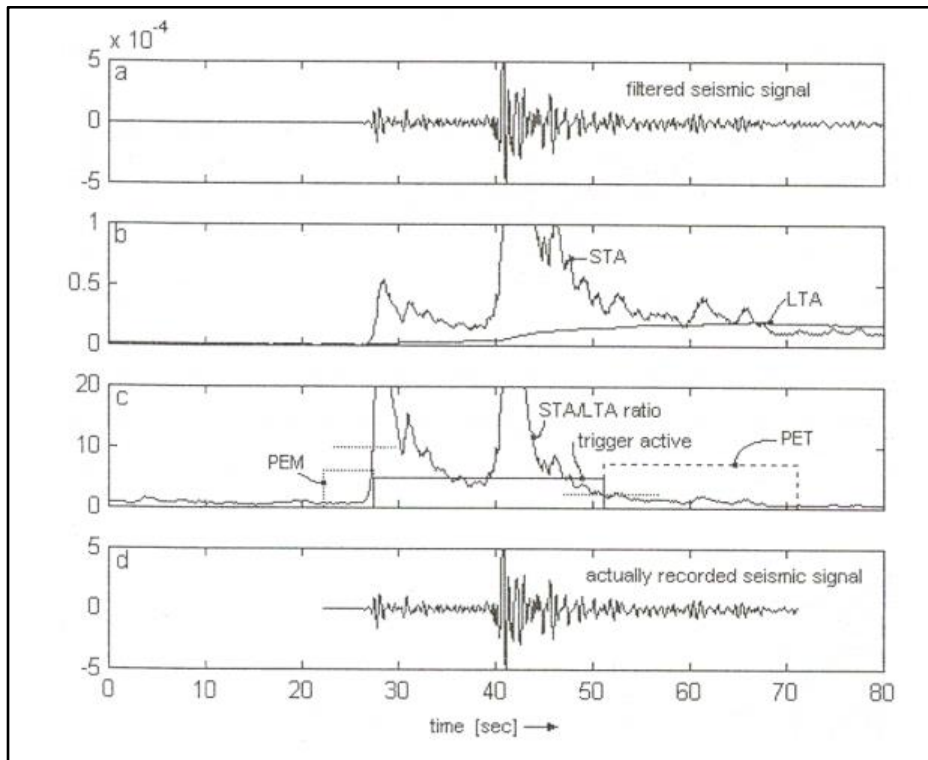


Figura 15 - Funções e variáveis de cálculo do disparador STA/LTA (Trnkoczy, 1998)

Na figura acima o gráfico (a), mostra um sinal sísmico contínuo de entrada (filtrado); o gráfico (b), mostra um sinal absoluto médio nas janelas STA e LTA, à medida que se movem no tempo em direção ao lado direito do gráfico; o gráfico (c), mostra a proporção de ambos. Além disso, mostra o estado ativo do trigger (retângulo de linha sólida), o tempo pós-evento (PET) e o tempo pré-evento (PEM) (retângulos de linha pontilhada) são também mostrados. O gráfico (d) mostra a determinação do evento sísmico.

O parâmetro de disparo do STA/LTA e as configurações dos parâmetros associados dependem do objetivo da aplicação, da condição de ruído sísmico no local, das propriedades dos sinais sísmicos em um determinado local e do tipo de sensor utilizado.

Segundo Trnkoczy (1998) todos esses problemas variam amplamente entre os locais sísmicos e obviamente, não existe uma regra geral e única para defini-los. Cada site sísmico requer algum estudo, uma vez que apenas a experiência prática permite a determinação de configurações de disparo realmente ideais.

Considerando o valor de disparo de um evento STA/LTA em um traço sísmico como um valor de amplitude, foi executado o mapeamento dessas amplitudes numa seção sísmica, sendo considerados como parâmetros de disparo a largura das janelas STA e LTA.

Analisando o comportamento do algoritmo sobre um traço sísmico analítico bruto (linha vermelha) e envelopado (linha verde) pudemos observar o comportamento do perfil sísmico resultante em relação a variação na largura das janelas STA e LTA (Figura 16).

Podemos observar que a relação entre as janelas STA e LTA determina a resolução do traço sísmico (linha azul) se comparado ao traço sísmico envelopado.

Os menores valores em STA e LTA fornecem mais detalhes dos refletores que são observados também nos dados brutos e envelopados.

Foram executados vários testes deste algoritmo sobre dados impulsivos e ressonantes em várias configurações geológicas de fundo, porém até agora não foi conseguida uma quantificação precisa entre as relações STA/LTA sendo, até o momento, consideradas empíricas.

O algoritmo utilizado foi obtido na biblioteca ObsPy, sendo utilizado no processamento de dados sismológicos.

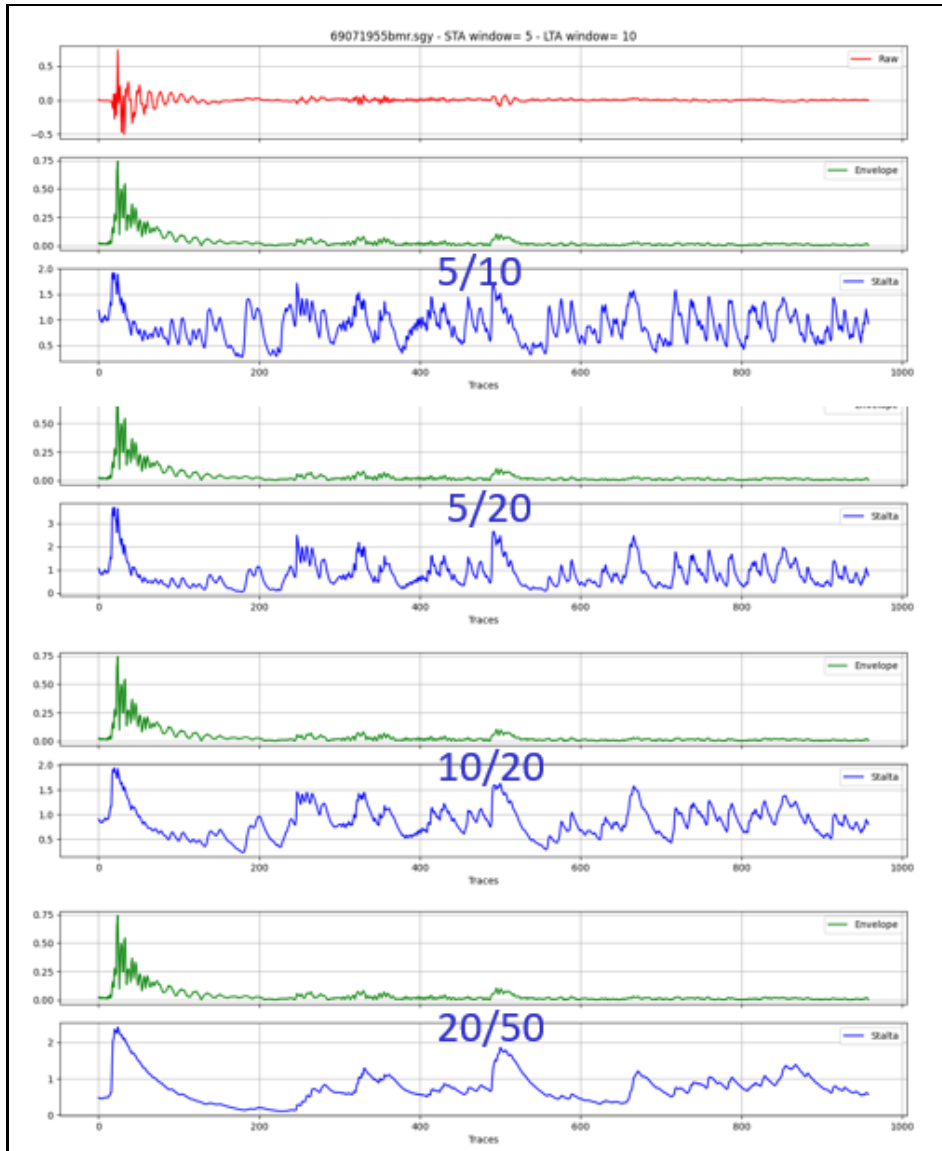


Figura 16 - Resultado de diferentes relações STA/LTA em comparação com dados brutos e envelopados.

3.10 - Transformada de Hilbert

A transformada de Fourier permite a aplicação de filtros capazes de separar sinais, baseados em suas frequências. Contudo, existem ocasiões em que a separação de sinais baseados em suas fases é mais apropriada. Para esta última aplicação, a transformada de Hilbert é a mais conveniente e possui aplicações importantes podendo ser utilizada para extrair a amplitude instantânea (envelope) e a frequência instantânea de um sinal.

A transformada é definida como a Convolução de um sinal com um kernel especial ou resposta ao impulso, conhecida como kernel de Hilbert. Quando um sinal sísmico é convolvido com o kernel de Hilbert, o sinal resultante tem uma resposta de frequência que é negativa da resposta de frequência do sinal original, mas sem mudança de fase, reforçando a amplitude do sinal ([Sette, 2017](#)).

A transformada de Hilbert fornece na saída a Amplitude Instantânea, a Frequência Instantânea e a Fase instantânea. A Amplitude Instantânea é conhecida pelo acrônimo de Envelope.

No processamento de seções sísmicas, o atributo Envelope (Amplitude Instantânea) acarreta um maior contraste dos refletores em detrimento de feições mais sutis conforme pode ser observado pela comparação entre o traço sísmico analítico (a) e o seu envelope (c) da figura 17. Da Fase Instantânea, podemos extrair o atributo Cosseno da Fase que, por não possuir informações de amplitude, atua como um filtro de ganho.

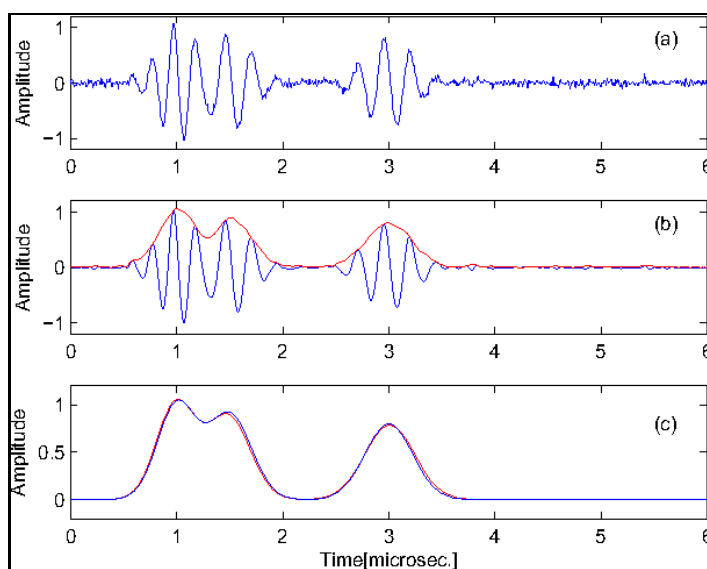


Figura 17 - Amplitude Instantânea (envelope) obtida pela Transformada de Hilbert
([Zhenkun, 2014](#))

Finalmente, a Frequência Instantânea que fornece as anomalias de baixa frequência, podendo ser usada para derivar a aceleração da fase que destaca as regiões com rápido aumento da frequência, melhorando a resolução de camadas finas ([Cecílio, 2019](#)).

Na figura 18 é possível observar que a aceleração da fase, entre os tempos de 2300 e 2350, determinada pela maior inclinação da curva em **b**, associada às regiões de maiores frequências (estreitamento do intervalo entre os picos de amplitude) em **a**.

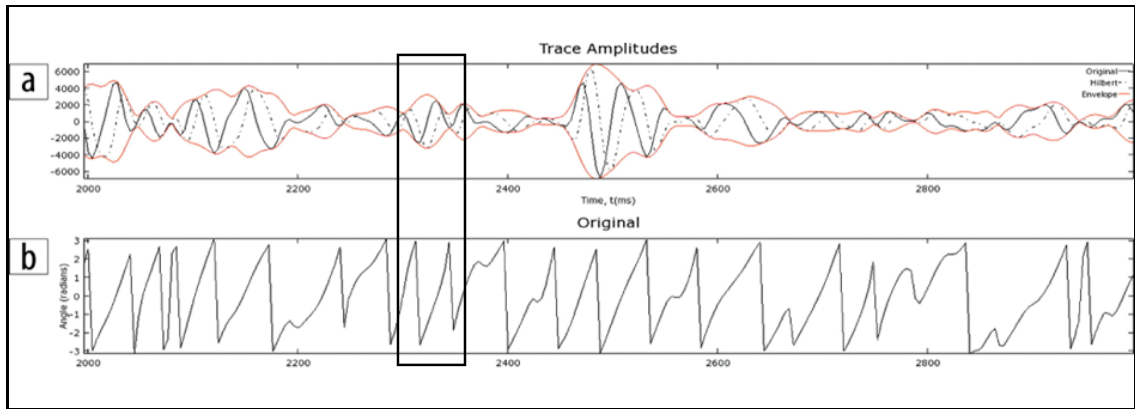


Figura 18 - Associação temporal entre o incremento da aceleração da fase (maior inclinação da curva B) com as maiores frequências em A (menor distância entre os picos de amplitude). (Purves, 2014)

3.11 - Autocorrelação

A correlação sísmica envolve a medição da semelhança entre as formas de onda dos dados sísmicos em diferentes intervalos de tempo ou deslocamentos. Já a autocorrelação sísmica, é a correlação de uma série temporal com ela mesma. É uma técnica usada em geofísica para analisar as propriedades dos sedimentos subsuperficiais através das reflexões de ondas sísmicas. Em outras palavras, mede a semelhança do sinal em diferentes tempos de atraso (Yilmaz-2001).

A correlação máxima ocorre na defasagem zero, uma propriedade importante da autocorrelação. Além disso, a função de autocorrelação é simétrica sendo uma propriedade de uma série em tempo real e, portanto, apenas um lado da autocorrelação precisa ser calculado (Box, Jenkins, & Reinsel, 1994).

Em sísmica monocanal pode ser usada para melhorar a rela o sinal-ruído e reduzir os efeitos de interferências, bem como ajudar na identifica o da presença de fei es de falhas e fraturas.

A fun o de autocorrela o resultante   então plotada como uma fun o de intervalo de tempo ou deslocamento, com valores mais altos indicando correla es mais fortes e valores mais baixos indicando correla es mais fracas.

Em sistemas ressonantes do tipo Chirp onde as frequências-limites e a forma da onda são definidas no equipamento, a fun o de autocorrela o pode ser definida a partir dos parâmetros do sinal presentes no header do arquivo SEG-Y ou em seu manual técnico (Figura 19).

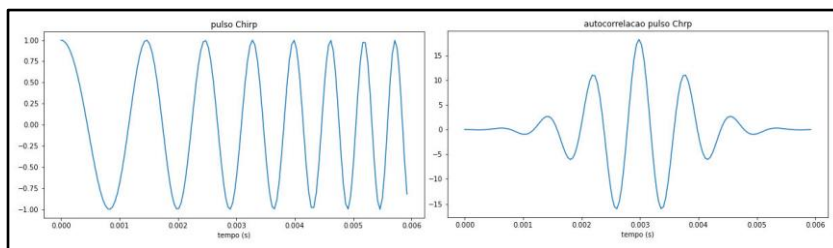


Figura 19 - Resultado da correla o de um pulso Chirp com ele mesmo produzindo a fun o Autocorrela o

Em sistemas impulsivos do tipo Boomer a determina o da fun o de autocorrela o   dificultada pela ausência de uniformidade nos pulsos sísmicos, tanto no tempo quanto na amplitude e na forma da onda sísmica. Além disso ocorre um artefato denominado *ringing* caracterizado por ecos fantasmas que acompanham uma transi o brusca do sinal, como por exemplo a reflexão do fundo (Allen, 2004). A figura 20 ilustra a visualiza o deste efeito em A e sua remo o em B.



Figura 20 - Efeito do *ringing* (A) sobre uma transi o brusca de sinal (B)

Baseado nestas limitações, [Chanko Park](#) et al, utilizaram uma abordagem de construir uma wavelet a partir da captura do primeiro sinal do fundo. Isto é feito através da delimitação de uma janela contendo alguns sinais de retorno do fundo, preferencialmente paralelos, que serão somados de modo a construir um pulso sintético que será utilizado na autocorrelação visando conseguir a melhor wavelet da autocorrelação dos pulsos somados, ou seja, alcançar uma wavelet Klauder de fase zero ideal da figura 21 abaixo.

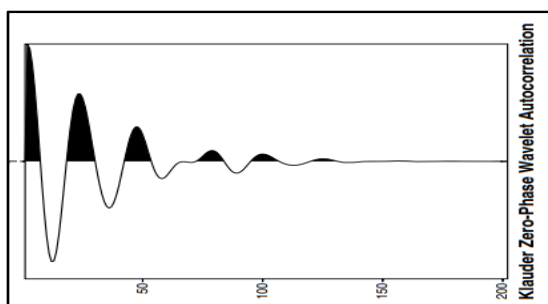


Figura 21 - Klauder zero-phase wavelet ([Dey, 1999](#))

Uma vez obtida a wavelet do sinal de fundo da seção, será possível executar a Deconvolução que visa remover os efeitos do pulso boomer sobre as reflexões das camadas geológicas (*ringing*) buscando melhores resoluções da imagem sísmica.

3.12 - Convolução / Deconvolução

A Convolução é a combinação matemática de dois sinais para obter um terceiro sinal modificado. É simplesmente uma operação de somatório do produto entre duas funções, ao longo da região em que elas se sobrepõem, em razão do deslocamento existente entre elas.

A Convolução no domínio do tempo é representada no domínio da frequência através da multiplicação dos espectros de amplitude e adicionando-se os espectros de fase.

A Convolução é um processo útil porque descreve com precisão alguns efeitos que ocorrem amplamente em medições científicas, como a influência de um filtro de frequência em um sinal elétrico ou da influência dos sedimentos durante a passagem de um pulso acústico.

Em sísmica, a Convolução é usada para modelar os efeitos dos materiais do subsolo nas ondas sísmicas à medida que se propagam pela Terra. Envolve a interação entre a forma

de onda emitida pela fonte sísmica com um perfil de variação da refletividade dos materiais do subsolo em diferentes profundidades.

É normalmente utilizada para gerar dados sísmicos sintéticos, que podem ser comparados a dados sísmicos reais para entender melhor a geologia do subsolo e identificar recursos tais como reservatórios, falhas e fraturas. Também pode ser usada para projetar e otimizar geometrias de pesquisa sísmica e inverter dados sísmicos visando estimar propriedades de subsuperfície, como velocidade, densidade e módulos elásticos.

Na Convolução sísmica monocanal, essa Convolução é realizada com um único traço ou canal sísmico, em vez de sobre um conjunto de dados multicanal. Isso é normalmente feito pela Convolução da forma de onda da fonte com uma série de refletividade que foi dimensionada para corresponder à geometria fonte-receptor e à velocidade dos materiais do subsolo.

Pode ser usada para gerar dados sintéticos que se aproximam das características dos dados sísmicos reais, incluindo as amplitudes, fases e conteúdo de frequência das ondas sísmicas. Também pode ser usado para projetar e otimizar pesquisas sísmicas, bem como para inverter dados sísmicos para estimar propriedades de subsuperfície.

Na animação abaixo temos a Convolução de um sinal quadrado $f(x)$ azul com um pulso $g(x)$ laranja resultando na Convolução $(f * g)(t)$ - (pulso verde) que pode ser exemplificado como um pulso sísmico laranja passando por uma camada sedimentar azul resultando numa camada sedimentar verde.

https://mahfuzdotsite.files.wordpress.com/2018/12/convolution_anim1.gif?w=740

Considerando que a reflexão de um sinal sísmico é a Convolução entre o pulso emitido pela fonte e a refletividade de resposta das camadas geológicas, a Deconvolução é o processo inverso e tenta recuperar os sinais das reflexões sísmicas originais através da aplicação de um filtro de resposta de frequência inversa (Ylmaz, 2001).

Alguns modelos incluem a Deconvolução por janela deslizante e a Deconvolução espectral que utiliza o espectro da onda sísmica. Neste programa foi utilizada a Deconvolução entre o sinal sísmico e uma janela deslizante obtida na biblioteca python *scipy*. Para dados

sísmicos *Boomer* de fase mínima (vide figura 21 abaixo) a Deconvolução pode ser obtida através da captura da informação do retorno do sinal do fundo subaquático pelo próprio usuário, de acordo com o método discutido em [Park](#) (2019).

A deconvolução sobre dados Chirp envelopados não é executável pelos métodos tradicionais pois os dados são complexos e não estacionários, ou seja, suas médias, variâncias, autocorrelações, bias etc.) não são constantes e invalidam as técnicas de deconvolução tradicionais que assumem sinais estacionários.

3.13 - Análise Wavelet

A análise de *Fourier* consiste em quebrar um sinal em ondas senoidais de várias frequências. Da mesma forma, a análise de *wavelet* é a quebra de um sinal em versões deslocadas e em escala da *wavelet* original. Assim, sinais com mudanças bruscas podem ser melhor analisados com uma *wavelet* irregular do que com uma senoide suave (*Fourier*).

Uma *wavelet* é descrita como uma série temporal curta (tipicamente menos de 100 amostras) que pode ser usada para representar, por exemplo, a função da fonte de sinal. Para qualquer espectro de amplitude existe um número infinito de *wavelets* no domínio do tempo que podem ser construídas variando o espectro de fase ([Simm](#) 2014). Dois tipos especiais têm interesse específico:

- 1 - Wavelet de fase mínima que tem uma curta duração de tempo e uma concentração de energia no início da wavelet como se observa em um pulso de Boomer (Figura 22).

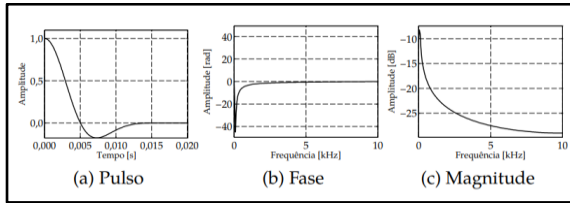


Figura 22 - Wavelet de fase mínima – Boomer (Bousfield, 2017)

2 - Wavelet de fase zero é simétrica com um máximo no tempo zero (não causal) sendo útil para aumentar o poder de resolução e facilitar a seleção de eventos de reflexão (pico ou vale). É a wavelet presente no sinal *Chirp* (Figura 23).

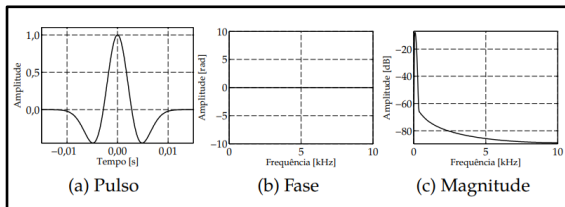


Figura 23 - Wavelet de fase zero – Chirp (Bousfield - 2017)

A Convolução de uma wavelet de fase zero e de fase mínima é fase mista (porque o espectro de fase da wavelet de fase mínima original não é o único espectro de fase mínima para a nova wavelet modificada) e deve ser evitada (Bousfield, 2017).

Um tipo especial de wavelet frequentemente usado para fins de modelagem é a wavelet **Ricker** que é definida por sua frequência dominante. A wavelet de Ricker é por definição de fase zero, mas um equivalente de fase mínima pode ser construído. A wavelet de **Ricker** é usada porque é simples de entender e muitas vezes parece representar uma resposta típica da Terra (Figura 24).

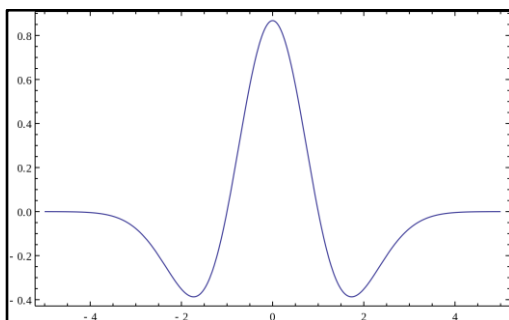


Figura 24 - Wavelet Ricker (fonte: Mathematica em: <https://reference.wolfram.com/language/ref/MexicanHatWavelet.html>)

Existem dezenas de formas de wavelets diferentes, além de *Ricker* temos algumas mais usadas como a *Meyer*, e a *Morlet* (Figura 25).

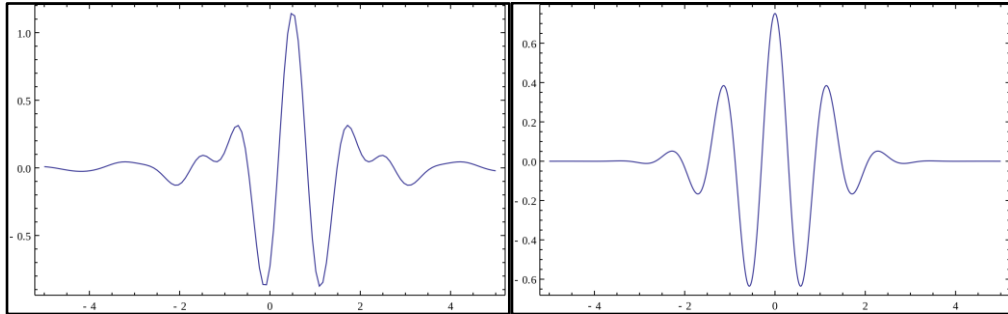


Figura 25 - Ilustração das wavelets *Meyer* (esq) e *Morlet* (dir) (fonte: Mathematica)

3.14 - Filtro Wiener

O filtro de Wiener se caracteriza como adaptativo, ou seja, seus coeficientes são periodicamente recalculados e atualizados para cada bloco de amostras, com o objetivo de reduzir a diferença entre o sinal de saída do sistema e o sinal desejado. É um tipo de filtro linear, invariante no tempo, usado para restaurar ou aprimorar sinais que foram degradados por ruído ou interferência. Normalmente são utilizados em processamento de sinal e aplicações de engenharia para reduzir a distorção ou melhorar a relação sinal-ruído de um sinal (Barbosa, 2017).

Eles também são usados em combinação com outras técnicas, como a Deconvolução, para melhorar a qualidade e clareza do sinal. A filtragem de Wiener executa uma compensação ideal entre filtragem inversa e suavização de ruído. Ele remove o ruído aditivo e inverte o desfoque simultaneamente vide:

<https://www.owl.net.rice.edu/~elec539/Projects99/BACH/proj2/wiener.html>

4 - APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO PROGRAMA

Para a construção da estrutura do programa foi necessária uma pesquisa nas [bibliotecas](#) disponíveis na linguagem python e foi desenvolvido o script do programa considerando as seguintes etapas:

- carregar os dados sísmicos monocanal em formato SEG-Y, considerado o padrão definido pela *Society of Exploration Geophysics* na sua revisão mínima 1.0. Para tanto foi pesquisada uma biblioteca *python* expedita para leitura destes dados tendo sido escolhido o módulo denominado *Segyio*;
- testar as opções de filtros de sinal disponíveis no módulo *Scipy* do python aplicáveis sobre os atributos de amplitude, frequência e fase, que produziam os melhores resultados;
- produzir uma visualização adequada para a seção sísmica com controle de intensidade de níveis de cinza ou paletes de cor e informar as características espectrais da imagem antes e depois da filtragem. O módulo *Matplotlib* do *python* foi encarregado desta tarefa;
- armazenar as filtrações executadas para possibilitar a análise e/ou mapeamento dos refletores através da seleção visual entre essas filtrações. O módulo *Skimage* do *python* auxiliou neste processo;
- exportar as filtrações de interesse em formato de imagem JPG e o mapeamento dos refletores na forma de arquivos XYZ, além do posicionamento das linhas sísmicas em arquivos XY. O módulo gerenciador de banco de dados denominado *Pandas* foi utilizado em conjunto com os módulos *Dxfwrite* para a exportação dos refletores em formato CAD e o módulo *Utm* para a conversão de coordenadas Lat/Long para UTM.

Além do módulo matemático padrão *Numpy*, a interface gráfica denominada *Tkinter*, nativa do python, foi escolhida para a apresentação do programa por consumir menos recursos computacionais.

Em seguida o programa foi dividido em 7 seções, a saber:

4.1 - Correções (**CORRECTIONS**)

Contendo inicialmente as correções sobre os dados brutos, associadas a movimentos dos sensores embarcados (*swell filter*), a ruído eletrônico decorrente de flutuações na corrente elétrica e ao ajuste na geometria dos sinais recebidos em função dos efeitos de espalhamento esférico dos pulsos sísmicos. Estas correções sobrescrevem os dados brutos originais.

4.2 - Filtros de frequência (**FREQ FILTERS**)

Esta seção possui 4 opções:

4.2.1 - Análise Espectral (**SPECTRUM**)

Visualiza a distribuição das amplitudes das frequências retornadas pelo fundo marinho aos sinais emitidos pela fonte sísmica (espectro de frequências) através do gráfico conhecido como Analisador de Amplitude de Espectro (no plano Amplitude x Frequência) ou através de uma imagem denominada Espectrograma (no plano Tempo x Frequência).

4.2.2 - Filtro Passa-Banda (**BAND PASS**)

Com as informações da Análise Espectral podemos definir uma janela com o intervalo ótimo de frequências que será considerado e, fora dessa janela, as frequências que serão cortadas dos dados da seção sísmica. A imagem resultante é visualizada para aceite ou modificação dos parâmetros de filtragem.

4.2.3 - Equalizador Paramétrico (**PARAM EQUALIZ**)

Divide o espectro de frequência visualizado na Análise Espectral em 9 bandas e permite um reforço ou atenuação de cada banda de frequência selecionada pelo intérprete.

4.2.4 - Clareamento Espectral (**SPECTRAL WHITEN**)

Executa um reforço de amplitude em todas as frequências presentes nos sinais sísmicos.

4.3 - Filtros de Amplitude (**AMPL FILTERS**)

4 opções estão disponíveis:

4.3.1 Controle Automático de Ganho (**AGC**)

Uma janela de média móvel é aplicada sobre cada traço sísmico de modo a salientar as menores em detrimento das maiores. Porém, sua aplicação implica em redução das altas frequências devido ao amortecimento gerado pela média dos sinais ao longo do traço sísmico.

4.3.2 - Controle Manual de Ganho (**MANUAL GAIN**)

Um gráfico de ganho pode ser digitalizado sobre um traço central da seção sísmica e seu resultado analisado e refeito. Uma vez aprovado ele é aplicado a toda a seção sísmica para visualização crítica do efeito obtido.

4.3.3 - Algoritmo STA/LTA (**STA/LTA**)

Obtém a relação entre a média de curto e de longo prazo do sinal sísmico de modo a extrair o início do pulso sísmico. Originário dos sistemas de detecção de terremotos pode ser útil na detecção de refletores profundos em ambiente ruidoso.

4.3.4 - Transformada de Hilbert (**HILBERT**)

Utiliza a Transformada de Hilbert na extração das Amplitude, Frequência e Fase Instantâneas da seção sísmica. A Amplitude Instantânea é a mais utilizada e conhecida como Envelope Sísmico.

4.4 - Convolução / Deconvolução (**CONV/DECONV**)

4.4.1 - **CHIRP** - Executa a Convolução do pulso Chirp com a wavelet Ricker e pode ser utilizada objetivando o aumento de frequências da imagem sísmica.

4.4.2 - **BOOMER** - Executa a Deconvolução da captura da reflexão do sinal de fundo sobre os dados de Boomer da seção sísmica visando o aumento da resolução da imagem.

4.5 - Filtros de Imagem (**IMAGE FILTERS**)

Como processo adicional temos ainda a inclusão de filtros de imagem com características que podem ajudar na construção de imagens adequadas em propósitos específicos tais como: aumento de resolução nos eixos X, Y e XY além de aumento de ganho em profundidades.

4.6 - Interpretação - (**INTERPRET**)

Os resultados obtidos nas etapas acima são utilizados no processo de interpretação sísmica, onde as imagens resultantes das filtragens e transformações previamente executadas podem ser utilizadas para a compreensão e análise das características estratigráficas e morfológicas do pacote sedimentar. Refletores podem então ser mapeados e exportados em um arquivo ASCII no formato XYZ (Long/Lat/Tempo do refletor) para utilização por outras ferramentas.

4.7 - Navegação - (**NAVIGATION**)

Nesta opção a posição de cada traço sísmico gravado no arquivo SEG-Y pode ser exportado para determinação da posição real do levantamento sísmico em duas opções de formato; CSV ou DXF.

4.8 - Resize SEG-Y

Na seção Correções (**CORRECTIONS**) encontra-se ainda uma opção para a

redução de arquivos SEG-Y permitindo a otimização no processamento de seções sísmicas de grandes dimensões através do encurtamento seletivo em número de traços e/ou em número de amostras por traço.

5 - MODUS OPERANDI

O fluxograma básico abaixo ilustra a sequência de procedimentos genérica que pode ser utilizada no processamento e na interpretação dos dados sísmicos. Os produtos são arquivos vetoriais de posição XYZ dos refletores sísmicos mapeados, figuras *raster* das imagens resultantes das filtrações realizadas e arquivos XY da posição geográfica dos traços da linha sísmica.

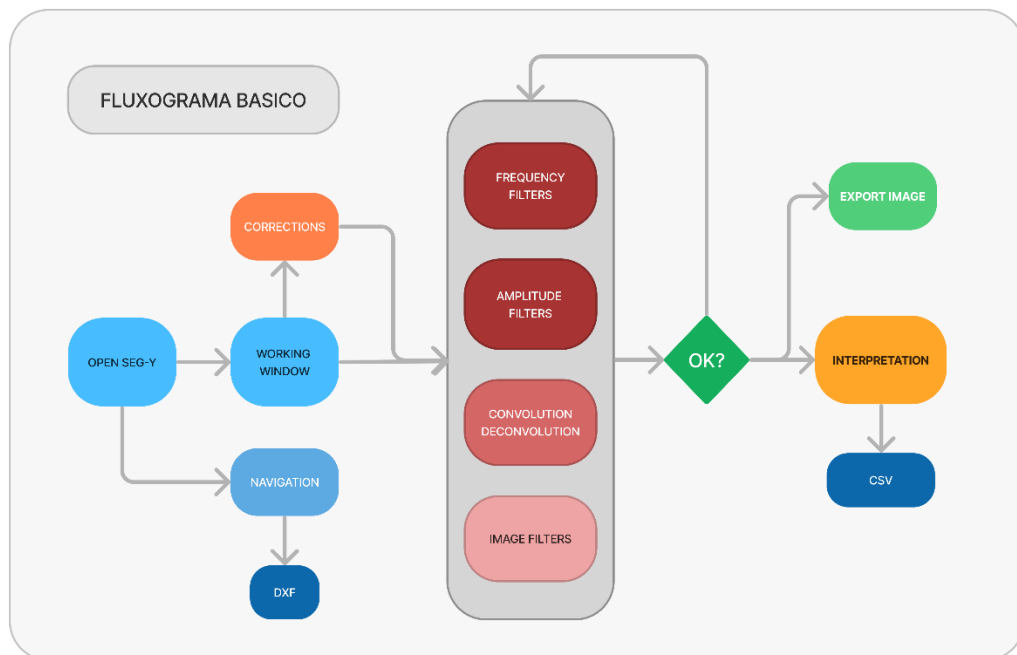


Figura 26 - Ilustração do Fluxograma Básico do programa

Baseado nas limitações técnicas impostas pelos métodos geofísicos inerentes aos equipamentos de sísmica monocanal, o processamento dos dados dentro do programa segue o fluxograma acima e utiliza 5 conceitos básicos:

- correções nos dados brutos decorrentes de efeitos operacionais (remoção do ruído DC, correção de efeito das ondas e correção geométrica do espalhamento do sinal sísmico);
- filtragem nas frequências presentes (filtragem Passa-Banda, clareamento espectral e equalização paramétrica);
- filtragem sobre o ganho das amplitudes destes dados (AGC, Manual Gain, STA/LTA e Hilbert);
- convolução e a Deconvolução sobre os dados de *Chirp* e *Boomer*;
- aplicação de filtros de correção de imagem (Laplace, *Wiener*, derivada primeira e segunda).

5.1 - Carregamento dos dados sísmicos (**OPEN**)

A primeira etapa do programa consiste na leitura do header EBCDIC que contém um texto inicial com algumas características do levantamento sísmico preenchidas pelo operador, tais como: contratante, equipamento, nome da linha sísmica e os dados iniciais que definem qualquer levantamento sísmico, ou seja: o número de traços, o número de amostras por traço e a taxa de amostragem (Figura 27).

```

EBCDIC header
C 1 SonarWiz V5.06.0011: Chesapeake Technology, Inc.
C 2 SonarWiz Server HI Analog Subbottom Sonar Interface V5.00.008
C 3 File: Line-S-01A
C 4 SurveyLineName: 0
C 5 Recorded on Machine:
C 6 Recorded by User:
C 7 Licensed to:
C 8 Custom Trace Header Definitions
C 9 Cable Out X 10 from Nav System stored in bytes: 45-48 (long)
C10 Event Number from Nav System Bytes: 181-182 (short)
C11 Vessel Speed (knots X 10) from Nav System Bytes: 183-184 (short)
C12 Vessel Roll (degrees X 10) from Nav System Bytes: 185-186 (short)
C13 Vessel Pitch (degrees X 10) from Nav System Bytes: 187-188 (short)
C14 Vessel Heave (cm X 10) from Nav System Bytes:189-190 (short)
C15 Distance Off Preplanned Track (meters X 10) Bytes:191-192 (short)
C16 Vessel Heading (degrees X 10) from Nav System Bytes:193-194 (short)
C17 Line Name from Nav System (10 bytes ASCII Text) Bytes:195-204 (short)
C18 Event Annotation (36 bytes ASCII Text): Bytes:215-240
C19 Fathometer Water Depth X 100.0 stored in Bytes:61-64
C20 Computed Water Depth stored in Bytes:65-68
C21 Transducer Altitude (if provided) stored in Bytes:53-56
C22 Transducer Depth Below Surface (if provided) stored in Bytes:49-52
C23
C24
C25
C26
C27
C28
C29
C30
  
```

Figura 27 - EBCDIC header

Além dele, temos outro header denominado *Bin Header* contendo os parâmetros básicos citados (ou não) no *header* EBCDIC tais como: a taxa de amostragem por unidade de tempo (sample rate), o número de amostras por traço sísmico, o número de traços da seção

sísmica, as frequências emitidas (para *Chirp*), a largura do pulso, a versão do formato SEG-Y etc. (Figura 28).

```

TETHYS Hi-Res Monochannel Seismic Filters and Interpretation
C29
C30
C31
C32
C33
C34
C35
C36
C37
C38 DISCOVER SUB-BOTTOM DATA
C39 SEG Y REV1
C40 END TEXTUAL HEADER

File name: JURI_L2(1).sgy
Number of traces: 5329
Number of samples per trace: 1446
Sample rate: 92.0 microseconds
Frequency: 10869 Hz

(JobID: 0, LineNumber: 1, ReelNumber: 1, Traces: 1, AuxTraces: 0, Interval: 92, IntervalOriginal: 92, Samples: 1446,
SamplesOriginal: 1446, Format: 1, EnsembleFold: 1, SortingCode: 1, VerticalSum: 1, SweepFrequencyStart: 2000, SweepFr
equencyEnd: 10000, SweepLength: 20, Sweep: 1, SweepChannel: 0, SweepTaperStart: 0, SweepTaperEnd: 0, Taper: 0, Correl
atedTraces: 0, BinaryGainRecovery: 0, AmplitudeRecovery: 0, MeasurementSystem: 1, ImpulseSignalPolarity: 0, Vibratory
Polarity: 0, ExtAuxTraces: 0, ExtSamples: 0, ExtSamplesOriginal: 0, ExtEnsembleFold: 0, SEGRevision: 1, SEGRevision
Minor: 0, TraceFlag: 0, ExtendedHeaders: 0)

Enveloped Data
JURI_L2(1).log as created

OPEN CORRECTIONS FREQ FILTERS AMPL FILTERS CONV/DECONV IMAGE FILTERS INTERPRET NAVIGATION Palettes

```

Figura 28 - Bin Header

Por sua vez, cada traço sísmico possui um *Trace Header* onde está gravada a posição geográfica do traço e as amostras da amplitude do sinal sísmico retornado, coletadas na taxa de amostragem definida.

A imagem da seção sísmica é construída através da distribuição dos traços sísmicos verticais ao longo do eixo horizontal, sendo cada traço sísmico um perfil da intensidade da amplitude do sinal sísmico (eixo X) recebido no decorrer do tempo (eixo Y). Cada traço sísmico, por sua vez, possui sua posição geográfica registrada em seu Trace Header.

Com estes parâmetros básicos são feitas todas as operações do programa que visam corrigir, filtrar e ajustar a imagem da seção sísmica, de modo a melhorar a visualização dos refletores para o trabalho de interpretação técnica do geofísico. Os parâmetros utilizados em todas as etapas de processamento de cada linha são gravados em um arquivo de log de modo a guardar um histórico dos procedimentos efetuados.

5.2 - Definição da Área de Trabalho (**WORKING WINDOW**)

Uma vez definida a coleta e armazenamento em memória dos dados sísmicos pelo programa, o processamento pode então ser iniciado através da determinação da janela de trabalho do processamento. Ela permite a escolha dos limites em tempo e em número de traços que serão considerados da seção sísmica evitando o processamento de dados inúteis ao escopo do trabalho e conseqüentemente diminuindo o tempo de processamento.

Assim, uma seção sísmica pode ser limitada no número de traços (eixo X) e no tempo (número de amostras no eixo Y). A falta de preenchimento destes campos corresponderá ao processamento total da seção sísmica (figura 29).

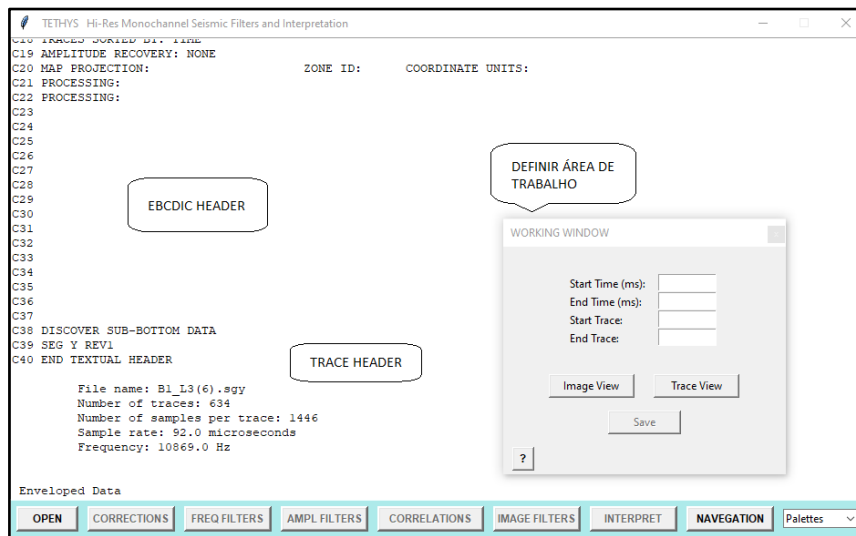


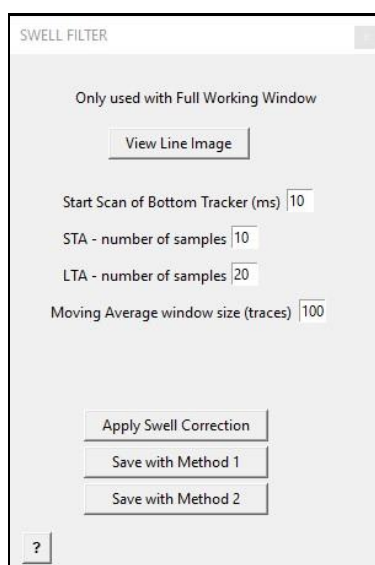
Figura 29 - Tela de *Working Window* sobre a tela de abertura do arquivo

Uma vez definida a área de trabalho na seção sísmica podemos então passar para a execução das 5 etapas descritas acima.

5.3 - Correções Sobre os Dados Brutos (**CORRECTIONS**)

5.3.1 - Correção do Efeito das Ondas (**SWELL FILTER**)

A correção deste efeito permite retificar o comportamento ondulatório da seção sísmica decorrente da variação vertical da distância entre a superfície da água e o fundo em cada traço sísmico. O algoritmo utilizado foi inspirado no trabalho de [Ceddia](#) (2020).



30 - Janela de correção de *swell*

Isso é feito determinando uma profundidade inicial situada acima de todas as leituras de profundidade da seção sísmica de modo a servir de guia inicial para a determinação do fundo pelo algoritmo. Esta profundidade inicial será melhor quando mais próximo do fundo ela estiver em toda a seção sísmica, para evitar a captura de “falsos fundos” decorrentes de ruído ambiental. Isto é feito através da inspeção visual no botão **View Line Image**.

A próxima informação são os parâmetros de corte para o algoritmo **STA/LTA**, ou seja, a definição de início do sinal e de fim do sinal de fundo (em número de amostras). Estes parâmetros são empíricos e dependem das características da seção sísmica.

O valor do campo Média Móvel (**Moving Average Window Size**) vai determinar a suavização da linha do fundo e é empírico e decorrente do comportamento morfológico da

seção sísmica e do estado do mar durante o levantamento. Sua unidade é o número de traços sísmicos consecutivos utilizados na correção.

No botão **Apply Swell Correction** o cálculo da correção do efeito das ondas será executado através de 2 algoritmos: o Método 1, utilizando as funções **insert()** e **del()** da biblioteca *numpy* do python e o Método 2 utilizando a função **shift()** da mesma biblioteca.

Ambas serão apresentadas para análise e definição do melhor resultado por parte do intérprete e sua consequente utilização na correção do fundo através dos botões **Save with Method 1** e **Save with Method 2**

O resultado desta correção será aplicado sobre os dados brutos do programa e será utilizado nas etapas subsequentes do processamento. O exemplo abaixo (Figuras 31, 32 e 33) ilustra estes resultados.

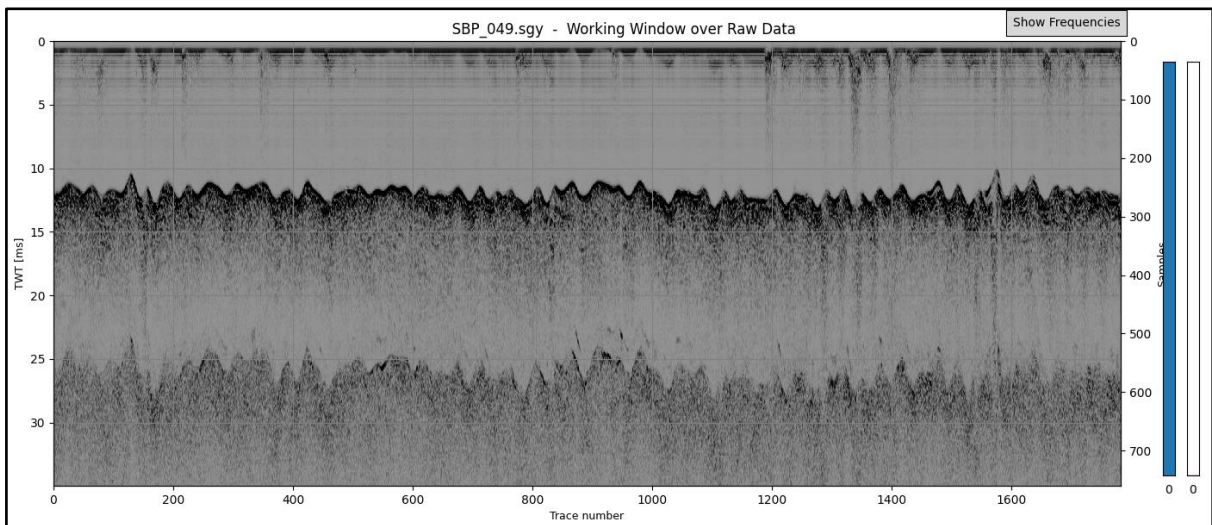


Figura 31 - Efeito do movimento do mar (*swell*) sobre os dados brutos.

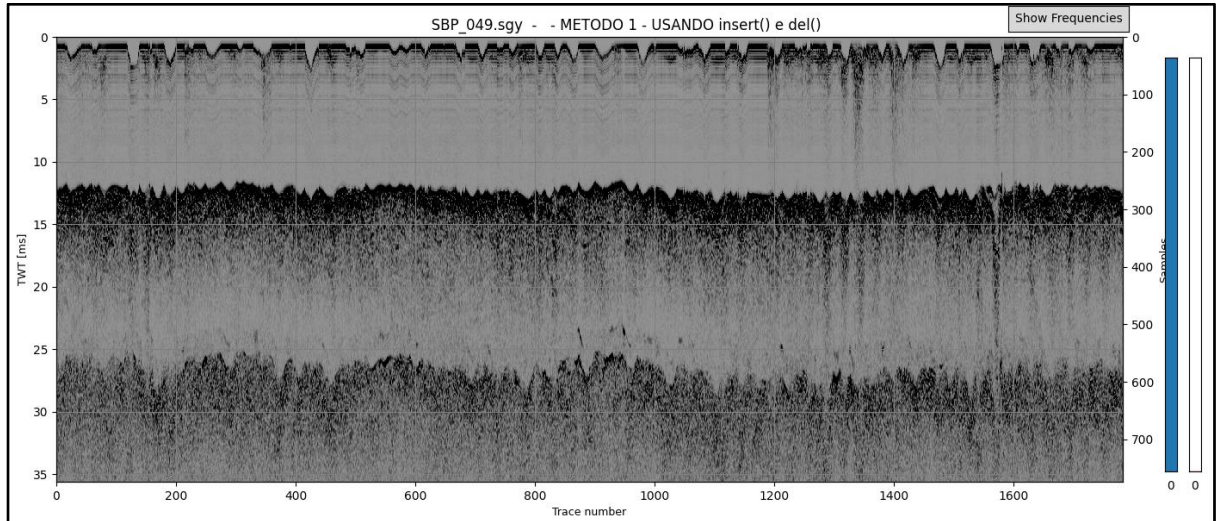


Figura 32 - Efeito da aplicação da correção de swell através do Método 1

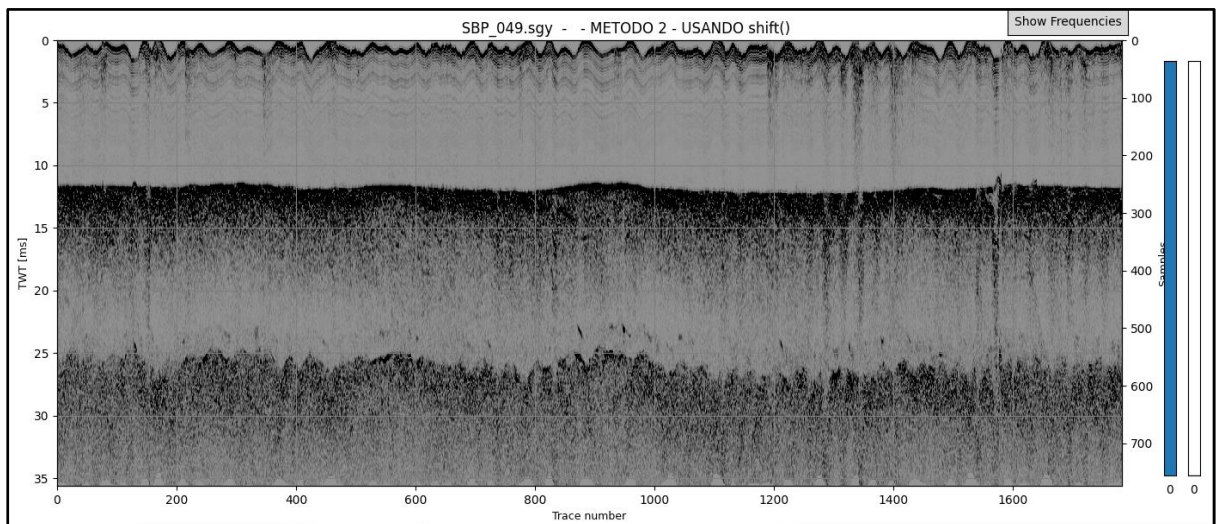


Figura 33 - Efeito da aplicação da correção de swell através do Método 2

5.3.2 - Remoção de Ruído DC (DC removal)

Em dados sísmicos analíticos, através do botão **Prof Viewer** podemos visualizar um traço sísmico central da seção para análise de sua oscilação sobre o valor zero de amplitude. Como definido na seção [3.1](#) o desalinhamento deste valor pode implicar em deslocamentos nos sinais dos refletores sísmicos.

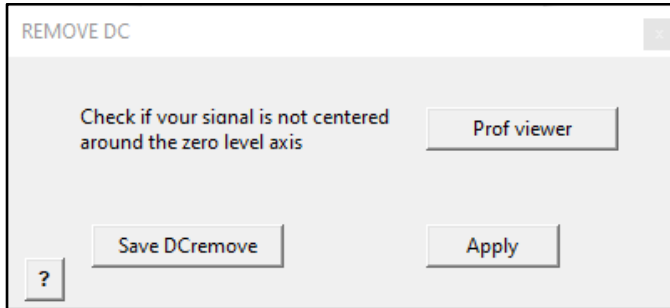


Figura 34 - Janela de correção de DC

Se este caso for observado, como por exemplo na figura 35, o desvio pode ser corrigido sendo visualizada a imagem de sua correção através do botão **Apply** (Figura 34). Se aprovada a correção será incorporada aos dados brutos através do botão **Save DCremove**.

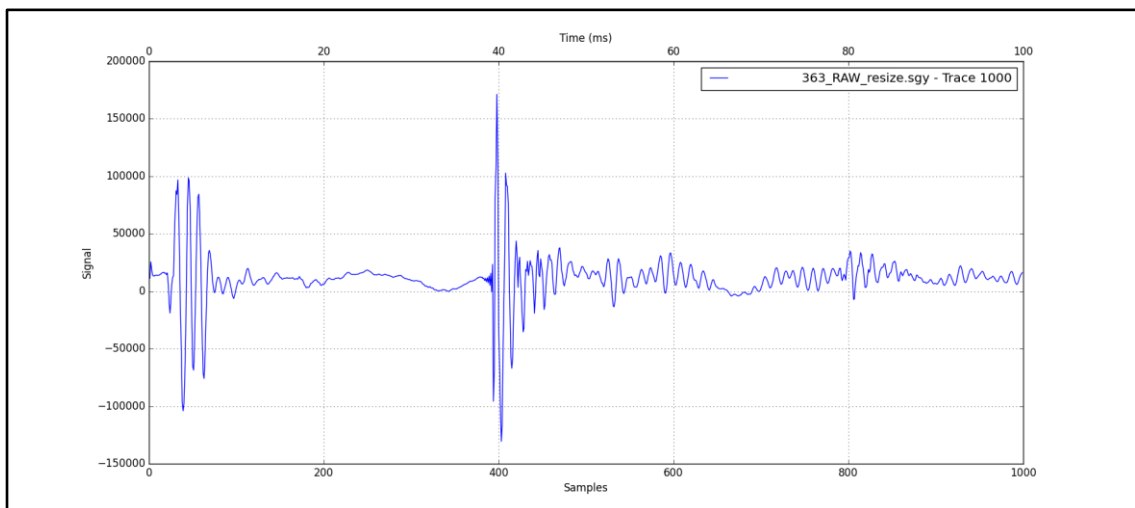


Figura 35 - Gráfico ilustrando o comportamento da média das amplitudes afastada de zero

A figura 36 ilustra a correção sobre um traço central da seção sísmica.

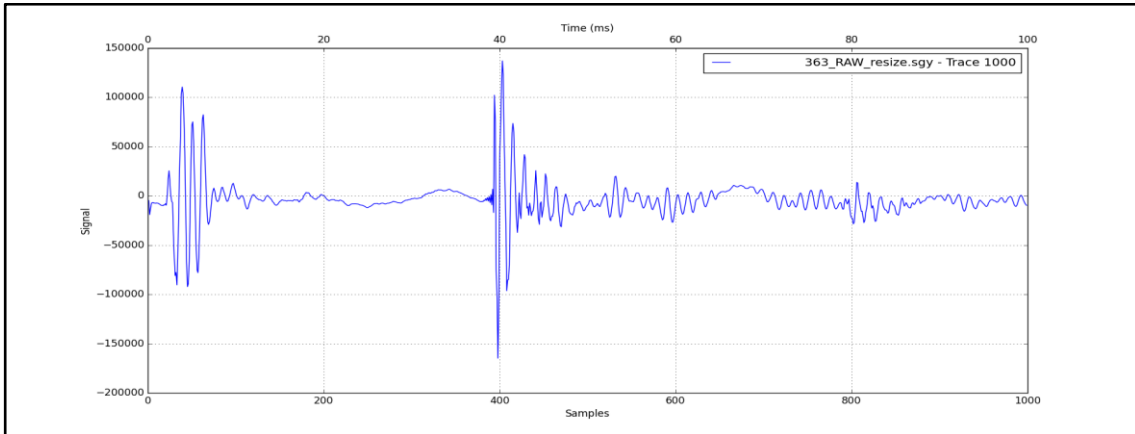


Figura 36 - Ilustração da correção do ruído DC recalculando a média do sinal em torno de zero

5.3.3 - Correção da Divergência Esférica (**SPHERICAL DIVERGENCE**)

A aplicação desta correção é executada convergindo os sinais em direção à vertical da emissão do pulso sísmico para corrigir o espalhamento esférico do sinal (Figura 38). O botão **Apply Correction** vai ilustrar esta correção (Figura 37) e se aprovada, poderá ser salva nos dados brutos.

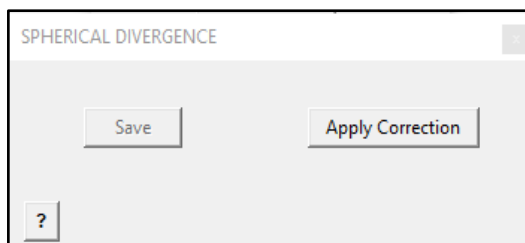


Figura 37 - Janela de aplicação da correção da Divergência Esférica

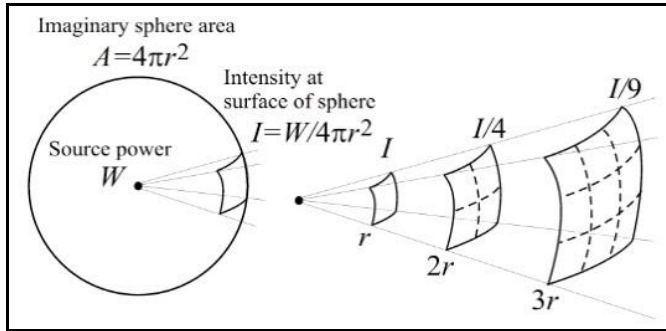


Figura 38 - Espalhamento Esférico do som

https://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-basics-pointsources.htm

O resultado está ilustrado nas figuras 39 (antes) e 40 (após correção)

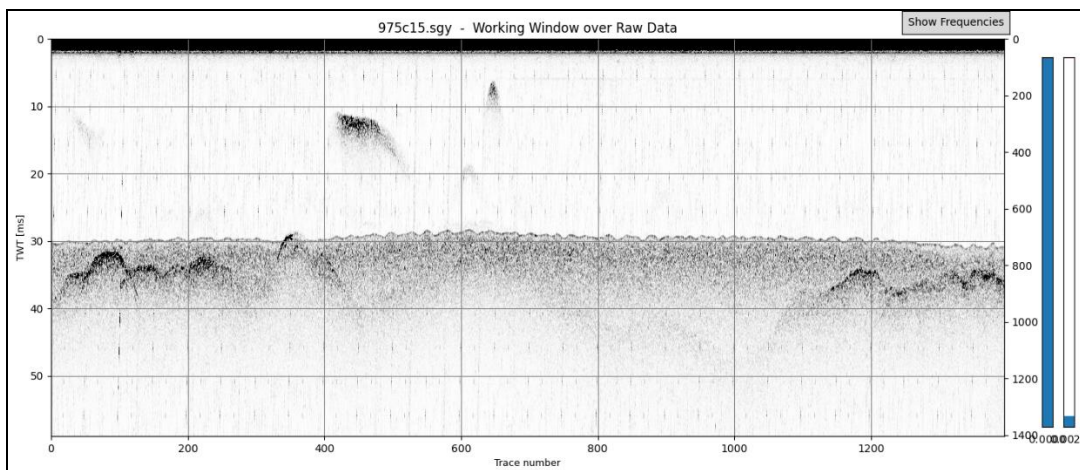


Figura 39 - Dados originais sem correção de divergência esférica

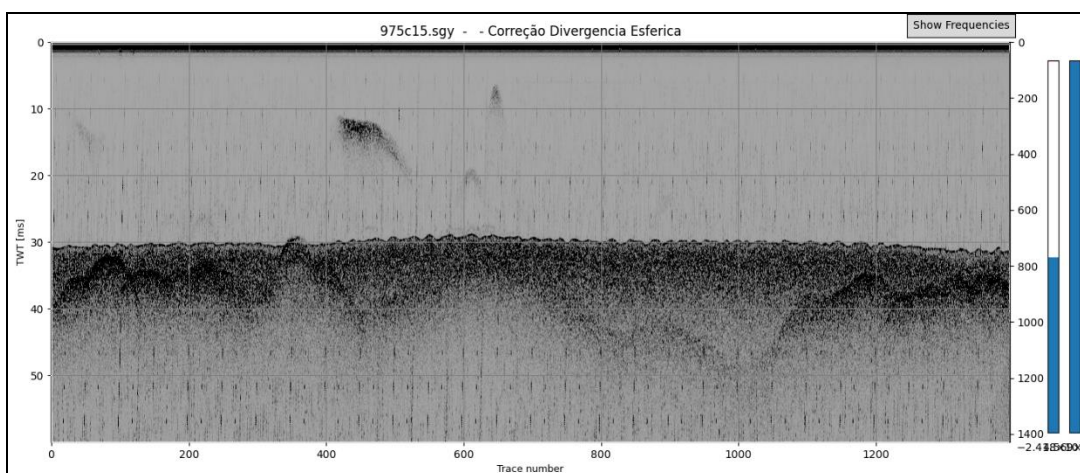


Figura 40 - Efeito da correção da Divergência Esférica resultando em maior uniformidade dos sinais sísmicos

5.4 - Filtros de Frequência (**FREQ FILTERS**)

5.4.1 - Análise Espectral (**SPECTRUM**)

Na janela da figura 41 podemos selecionar o tipo de dado sobre o qual será aplicada a visualização da amplitude das frequências presentes na seção sísmica. Dois botões permitem isso: o botão **Amplitude** corresponde a um Analisador de Espectro e o botão **Spectrogram** constrói um espectrograma da seção sísmica completa.

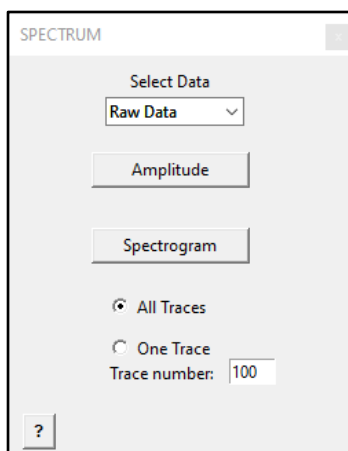


Figura 41 - Janela de inspeção do Espectro

O primeiro permite a visualização da amplitude do espectro das frequências presentes em 5 traços igualmente distribuídos ao longo da seção sísmica através do Analisador de Espectro (Figura 42).

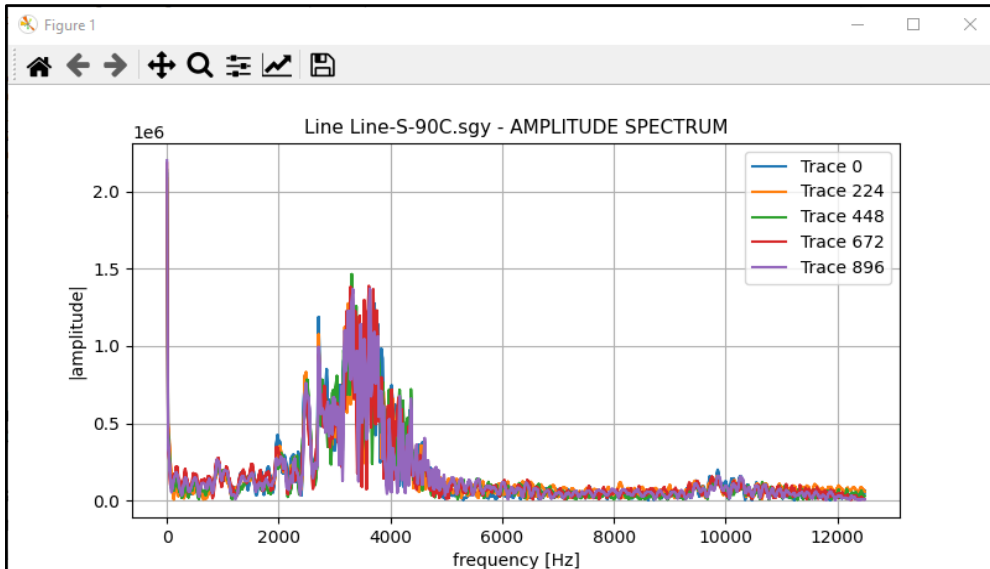


Figura 42 - Janela do gráfico da Amplitude do Espectro presente em alguns traços da seção

O segundo botão, na opção **All Traces**, constrói uma imagem da distribuição temporal das frequências em toda a seção sísmica, permitindo uma análise mais generalizada das frequências principais (Figura 43). Opcionalmente o espectrograma pode ser feito sobre um traço específico para análise em melhor escala, através da definição de um traço específico na opção **One Trace**.

Neste exemplo, em ambas as visualizações podemos observar a ocorrência de maiores amplitudes entre as frequências de 2000 e 5000 Hz

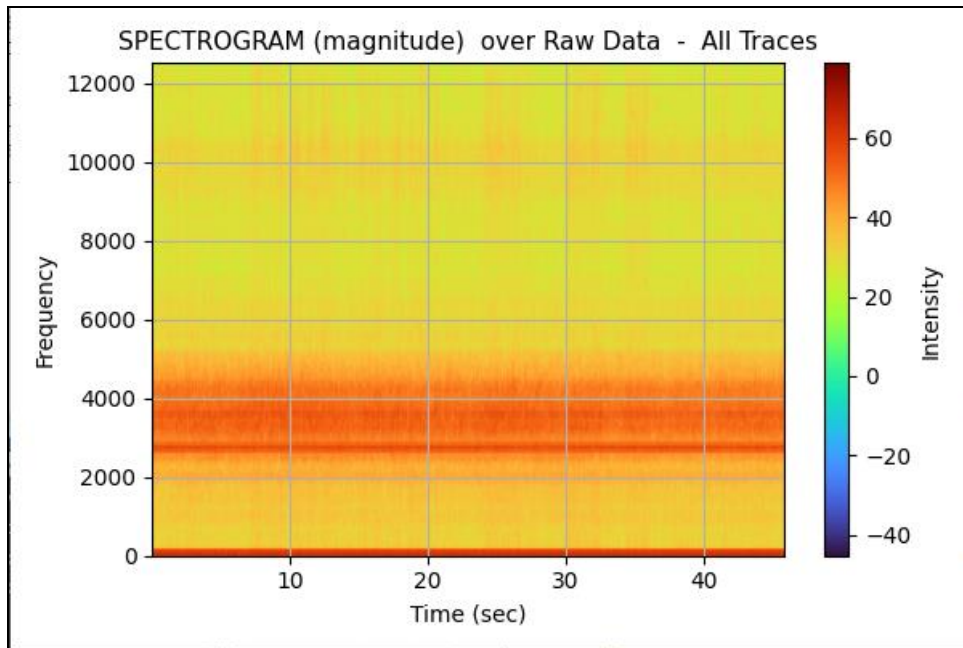


Figura 43 - Espectrograma da seção sísmica completa mostrando a concentração das maiores amplitudes das frequências durante o tempo de execução da linha.

Os dados para análise devem ser previamente selecionados na opção **Select Data**.

5.4.2 - Clareamento Espectral (**SPECTRAL WHITENING**)

O processo de Clareamento Espectral permite uma normalização no conteúdo de frequências dos dados sísmicos, e com isso produz uma uniformização denominada clareamento que pode ser usado numa etapa inicial como alternativa na produção de imagens sísmicas com maior conteúdo de frequências.

Inicialmente deve-se selecionar os dados brutos que serão utilizados no clareamento, conforme figura 44 abaixo.

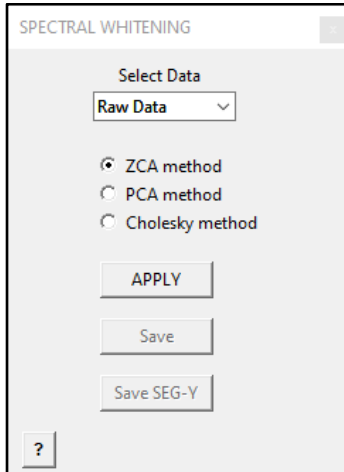


Figura 44 - Janela de aplicação do Clareamento Espectral

A escolha do método de clareamento pode alterar substancialmente os resultados sendo dependente das características dos dados e dos objetivos da análise. Três métodos estão disponíveis (*ZCA*, *PCA* e *Cholesky*). Foram executados vários testes com estes algoritmos sobre dados *chirp* e *boomer* disponíveis. O método *ZCA* forneceu os melhores resultados em termos de uniformidade de retorno das frequências. O método *Cholesky* funcionou em alguns casos e o método *PCA* no geral, não apresentou bons resultados (vide comparativo entre os dados brutos da figura 45 e os algoritmos nas figuras 46, 47 e 48).

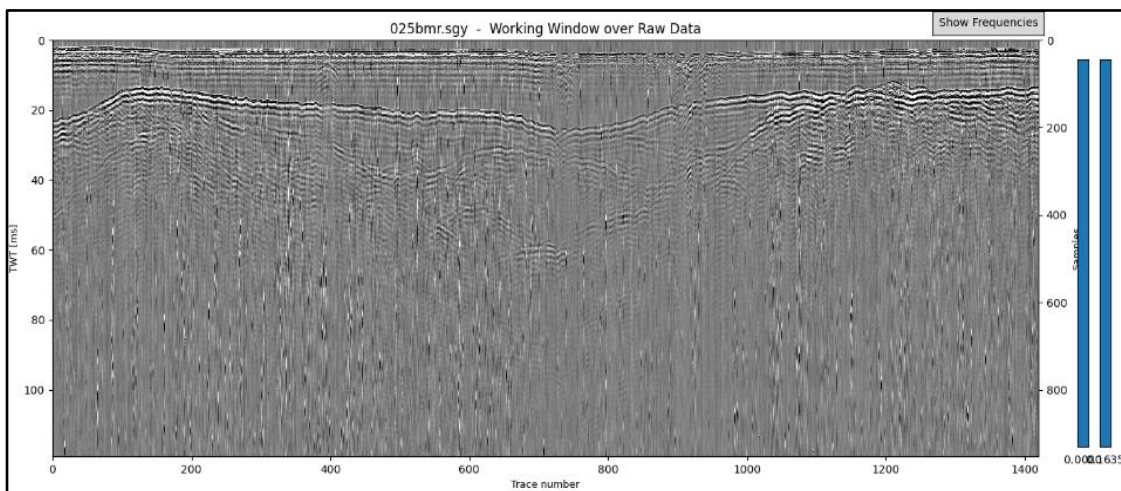


Figura 45 - Seção sísmica original com os dados brutos

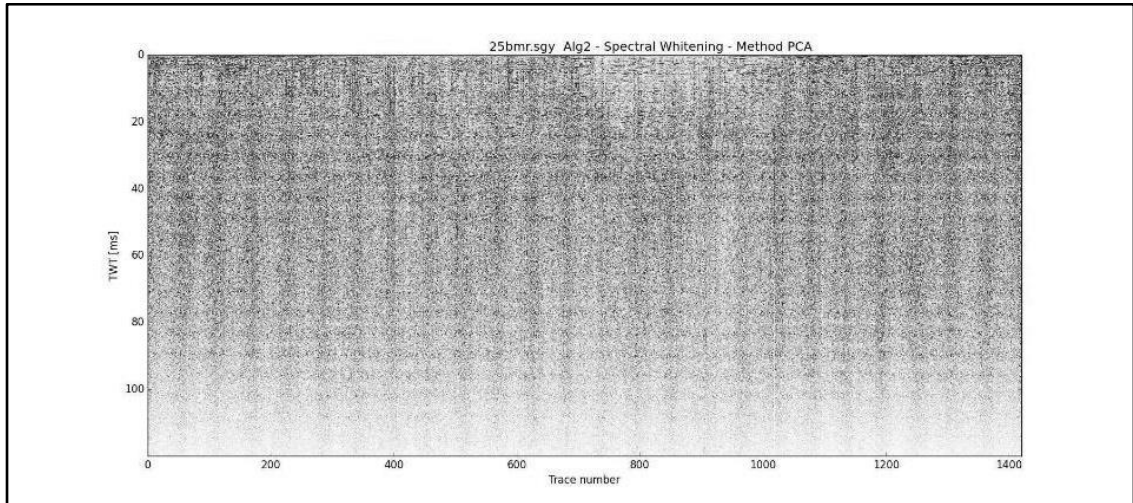


Figura 46 - Clareamento espectral utilizando o método PCA

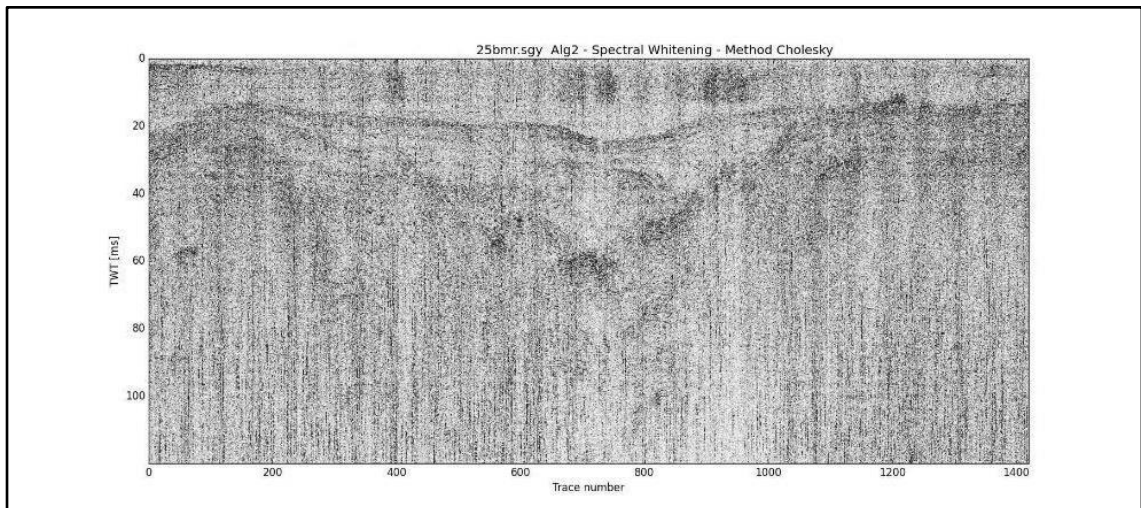


Figura 47 - Clareamento espectral utilizando o método Cholesky

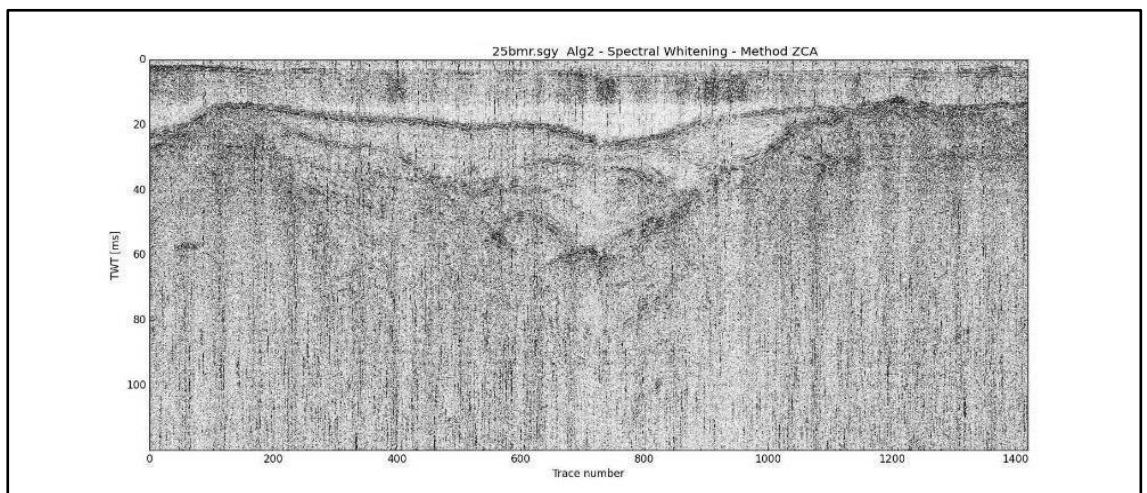


Figura 48 - Clareamento Espectral utilizando o método ZCA

Nos gráficos comparativos da distribuição espectral antes e após o clareamento é possível notar o efeito deste filtro no incremento de frequências pouco visíveis no dado original (Figura 49).

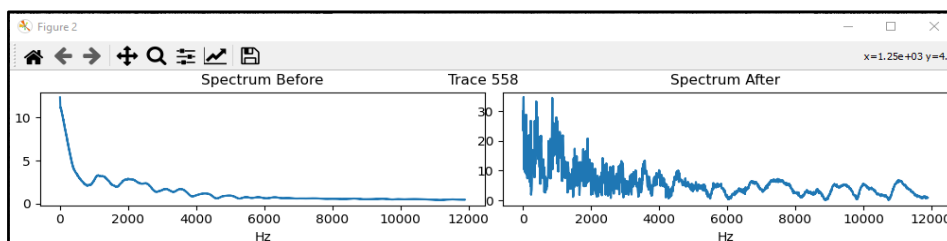


Figura 49 - Comparação entre as frequências dos dados originais e as frequências após a aplicação do filtro de Clareamento Espectral pelo método ZCA.

Embora o enriquecimento nas frequências possa produzir imagens mais ruidosas, sua utilização como entrada para outros filtros de frequência pode reforçar a visualização de feições de pouca amplitude sísmica e com isso permitir a extração de alguns dados sísmicos relevantes.

Como em todas as etapas anteriores, a aplicação deste filtro pode ser feita sobre quaisquer outros filtros anteriores pré-executados e salvos, selecionados através da opção **Select Data**. O botão **Save** armazena este resultado para utilização em outros processos.

5.4.3 - Filtro Passa-Banda (**BAND PASS**)

Inicialmente, os dados a serem filtrados devem ser selecionados através da opção **Select Data**.

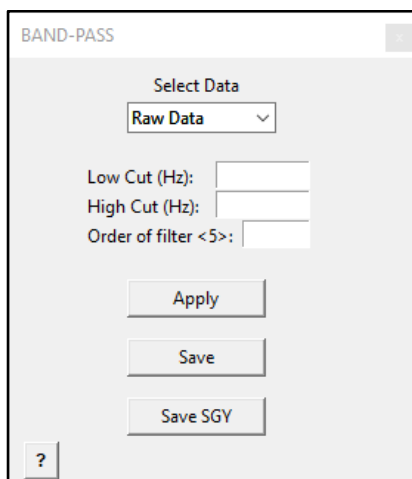


Figura 50 - Janela de aplicação do filtro Passa-Banda

A utilização deste tipo de filtro implica no conhecimento prévio e na análise subsequente do comportamento das frequências presentes na seção sísmica. Assim, torna-se necessária a visualização prévia da amplitude do espectro das frequências presentes nos traços da seção sísmica através do Analisador de Espectro e do Espectrograma ilustrado na seção [5.4.1](#), que cumpre este papel, permitindo a visualização da amplitude das várias frequências e por conseguinte a determinação da janela de filtragem do Filtro Passa- Banda.

Na aplicação deste filtro a determinação da janela de frequências (*High Cut* e *Low Cut*) vai permitir o efeito da eliminação das frequências exteriores a janela e por conseguinte a visualização das frequências de importância na seção sísmica, em virtude dos objetivos do levantamento geofísico executado.

Assim, podem ser incrementadas ou suprimidas frequências específicas em função de objetivos da interpretação, por exemplo, a visualização de altas frequências para refletores delgados e rasos ou baixas frequências para refletores profundos e irregulares.

Isto é feito durante a determinação da janela de trabalho do filtro Passa- Banda e do ângulo de sua rampa (*Order*) conforme a figura 51. O ângulo da rampa determina a acuidade da filtragem.

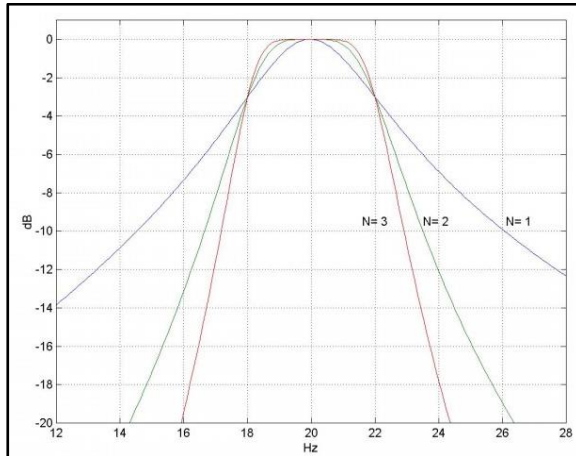


Figura 51 - Ilustração da rampa (*Order*) de corte do filtro Passa-Banda

**(Robertson –
2018)**

O resultado da aplicação do filtro na imagem pode ser imediatamente observado, analisado e eventualmente refeito ou refinado, através de novos parâmetros na janela de limites de filtragem, como nos exemplos das figuras 52, 53 e 54 abaixo:

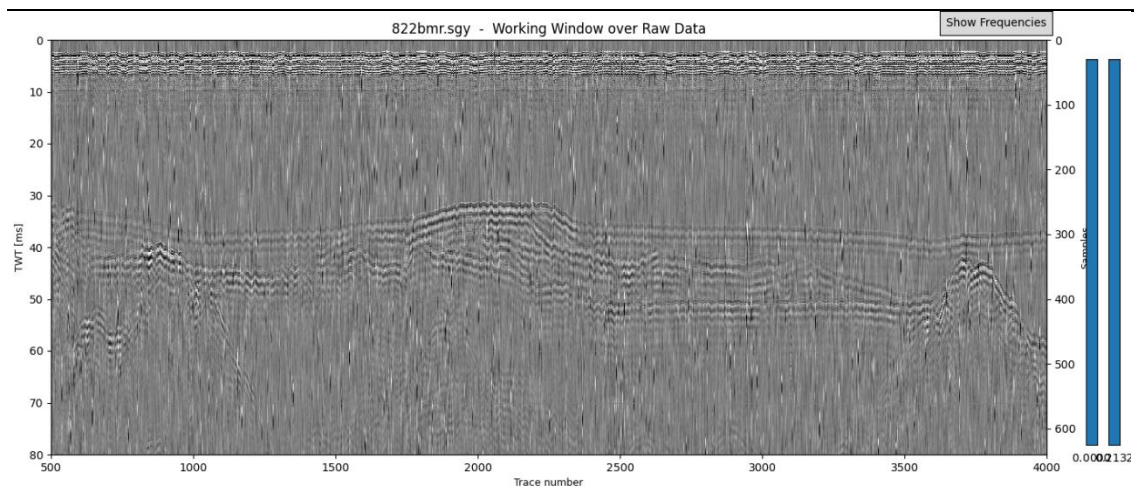


Figura 52 - Dados brutos (*Raw*) antes da aplicação do filtro Passa-Banda

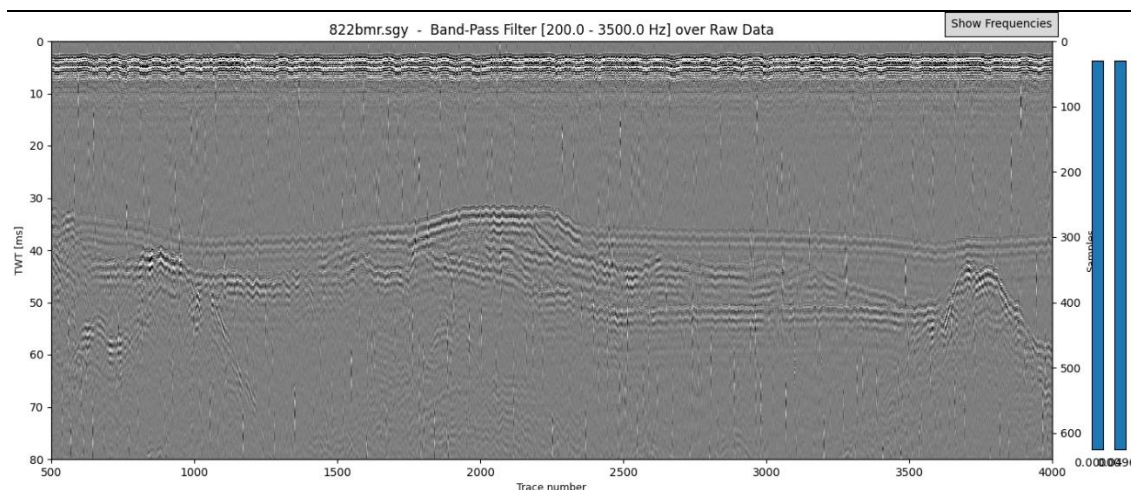


Figura 53 - Efeito de filtragem Passa-Banda com janela 200 - 3500 Hz

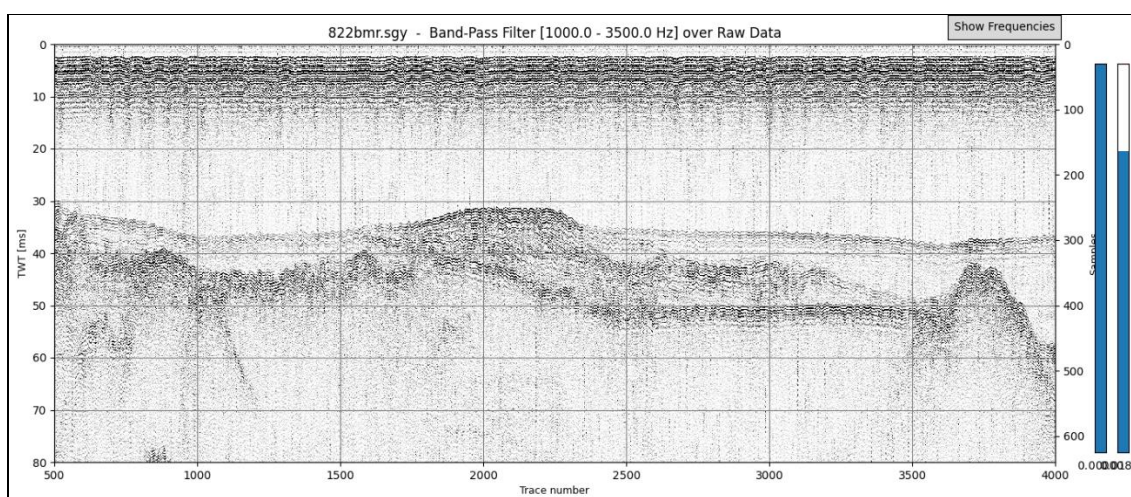


Figura 54 - Efeito de filtragem Passa-Banda com janela 1000 - 3500 Hz.

Como observamos acima a primeira banda de filtragem, entre 200 e 3500 Hz (figura 53), acrescentou pouca melhora em relação aos dados brutos (figura 52), resultando apenas numa leve redução de ruído.

A banda de filtragem 1000 – 3500 Hz contudo, já resultou em grande melhora na relação sinal / ruído além de um incremento na resolução sísmica quase sem perdas nas feições básicas iniciais (Figura 54), indicando as frequências com os melhores dados geológicos da seção sísmica.

No próximo exemplo (figura 55) temos a situação contrária onde os dados brutos (envelopados) são melhorados com a filtragem entre 200 e 2000 Hz (figura 56) indicando que neste caso as melhores informações estavam na banda mais baixa das frequências.

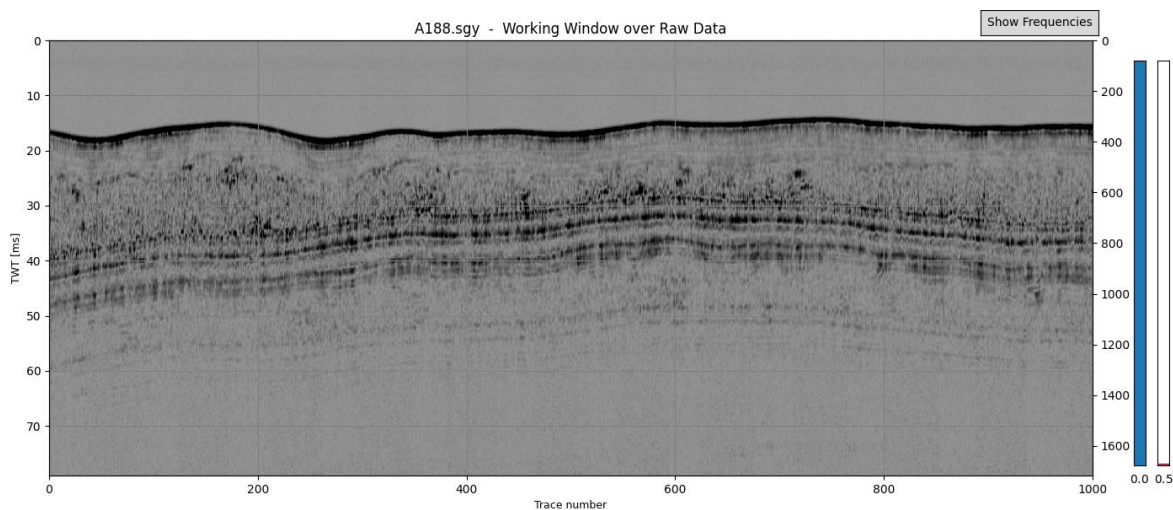


Figura 55 - Dados brutos envelopados de uma seção CMP

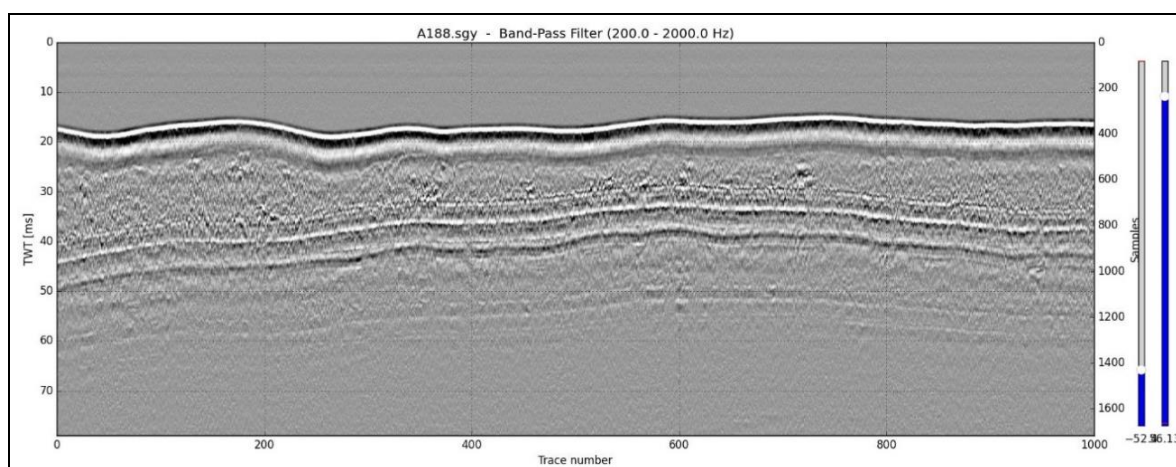


Figura 56 - Filtragem 200 - 2000 Hz sobre os dados brutos da figura 53

Assim várias possibilidades de filtragem podem ser efetuadas na busca pelo melhor resultado para o intérprete. Como em todas as etapas anteriores, a aplicação deste filtro pode ser feita sobre quaisquer outros filtros anteriores pré-executados, selecionados através da opção **Select Data**.

Os resultados dessa filtragem podem ser salvos através do botão **Save**. Estes dados são armazenados em memória para utilização em etapas posteriores da interpretação sísmica.

5.4.4 - Equalização Paramétrica (**PARAM EQUALIZ**)

De posse dos dados selecionados na opção **Select Data**, este módulo permite o incremento de ganho em 9 faixas de frequência de modo a inibir ou suprimir determinadas faixas de frequência em detrimento de outras, para resultados em interesses mais detalhados.

Os nove campos de frequência presentes, possuem valores pré-selecionados que, contudo, podem ser alterados de modo a vislumbrar outros espectros de interesse na seção sísmica, sendo que as unidades de ganho são adimensionais e variam entre -50 e 50 (Figura 57).

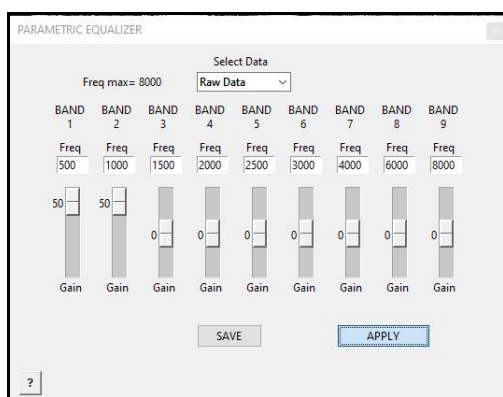


Figura 57 - Janela da Equalização Paramétrica mostrando a definição de parâmetros de ganho nas faixas de frequência selecionadas

Nas figuras abaixo temos o resultado da aplicação da Equalização Paramétrica em comparação com os dados brutos originais. Neste exemplo o ganho escolhido foi aplicado nas baixas frequências entre 500 e 1000 Hz, e o resultado pode ser observado na comparação entre as figuras 58 (anterior) e 59 (posterior).

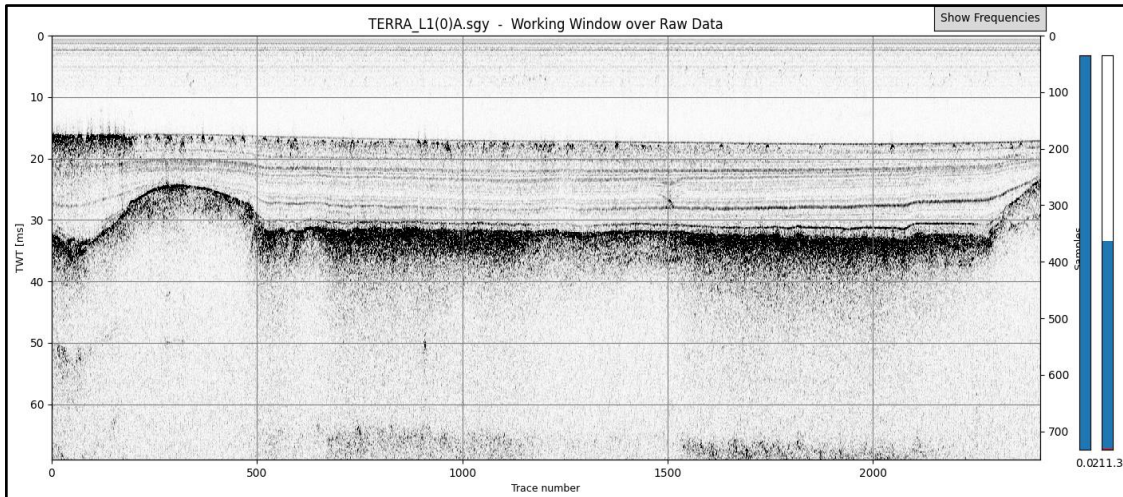


Figura 58 - Seção sísmica Chirp com dados brutos envelopados

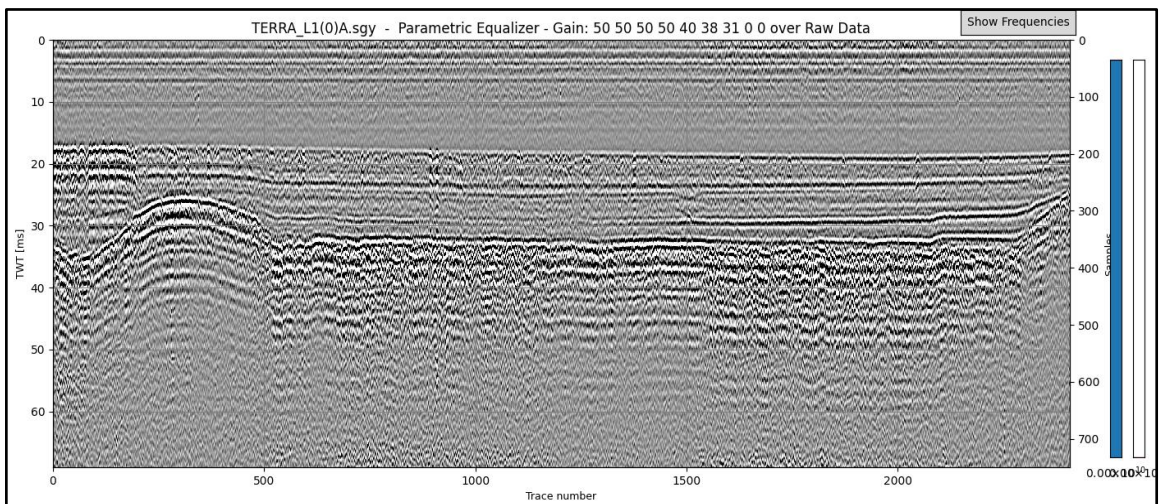


Figura 59 – Resultado da atuação do filtro de ganho paramétrico com reforço nas baixas frequências entre 500 e 1000 Hz.

A janela de espectro não possui a mesma escala vertical para permitir uma melhor visualização da distribuição espectral independente de suas amplitudes

Como em todas as etapas anteriores, a aplicação deste filtro pode ser feita sobre quaisquer outros filtros anteriores pré-executados, selecionados através da opção Select Data.

O resultado pode ser visualizado pelo botão **Apply** e salvo para uso posterior no programa, através do botão **Save**.

5.5 - Filtragens de Ganho

Os filtros de ganho atuam sobre a amplitude do sinal sísmico de 4 maneiras:

- atuando no incremento de todas as amplitudes no tempo (filtro AGC);
- atuando no incremento customizado das amplitudes no tempo (filtro Manual);
- extraíndo as larguras inicial e final dos refletores (filtro STA/LTA);
- aplicando transformadas que retornam um incremento de sinal associado a determinadas frequências do sinal sísmico (Transformada de Hilbert).

Assim, o ganho influi na intensidade do sinal, podendo ou não atuar sobre frequências específicas.

5.5.1 - Filtragem de AGC (AGC)

Neste processo temos de selecionar Inicialmente os dados para análise através da opção **Select Data**.



Figura 60 - Janela de ganho AGC

Em seguida podemos indicar a largura da janela, em número de amostras, que será utilizada para o cálculo da média móvel (weigth). A largura da janela pode afetar no valor do

ganho e no resultado da imagem. Os valores default estão apenas a título de sugestão (Figura 60).

O botão **Apply** mostrará o efeito do filtro de AGC sobre os dados brutos da seção sísmica (figura 61), podendo ser executado até o efeito desejado (Figura 62).

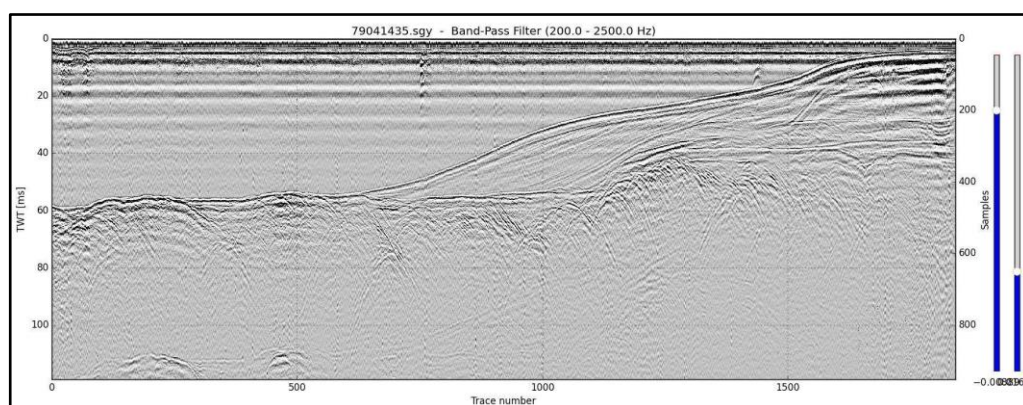


Figura 61 - Dados brutos de entrada do filtro AGC

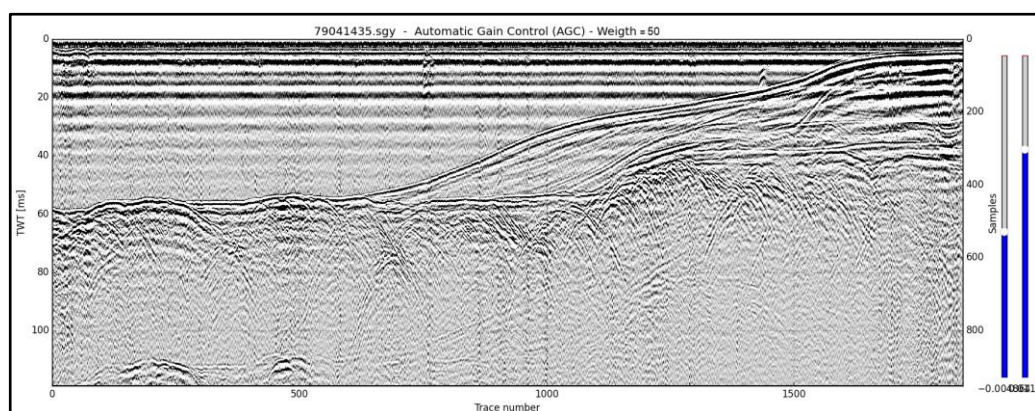


Figura 62 - Resultado da aplicação do ganho AGC sobre dados de entrada.

O botão **Save** vai incluir a imagem filtrada na memória do programa para visualização posterior.

5.5.2 - Editor Manual de Ganho (**MANUAL GAIN**)

Como o próprio nome sugere, este módulo permite aplicar uma curva de ganho customizada pelo intérprete, sobre os dados da seção sísmica selecionados através da opção **Select Data**.

Um traço sísmico central da seção é apresentado para fins de análise (linha azul) e uma curva de ganho pode ser digitalizada sobre este traço (linha vermelha). Os vértices dessa curva determinarão cálculo do ganho aplicado sobre este traço e seu resultado é mostrado no gráfico inferior (linha verde) demonstrando a nova configuração de amplitude do traço sísmico (Figura 63).

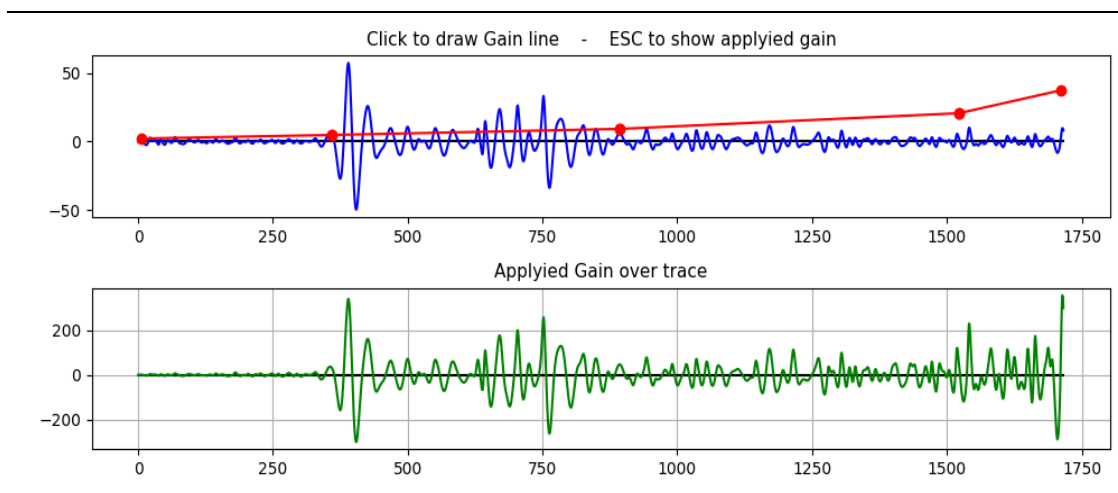


Figura 63 - Definição da curva ganho manual de ganho (vermelho) sobre os dados originais (azul) e seu resultado (verde)

No fechamento desta janela será apresentada a seção sísmica original (figura 64) e o efeito da aplicação do filtro manual (Figura 65).

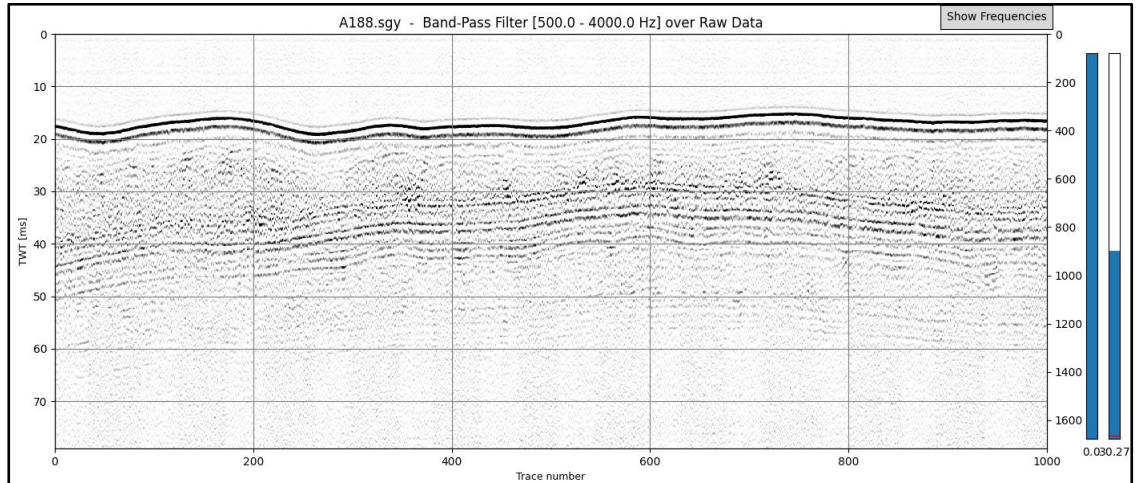


Figura 64 - Seção sísmica original com aplicação de filtro Passa-Banda sobre a qual será aplicada a curva de ganho customizada

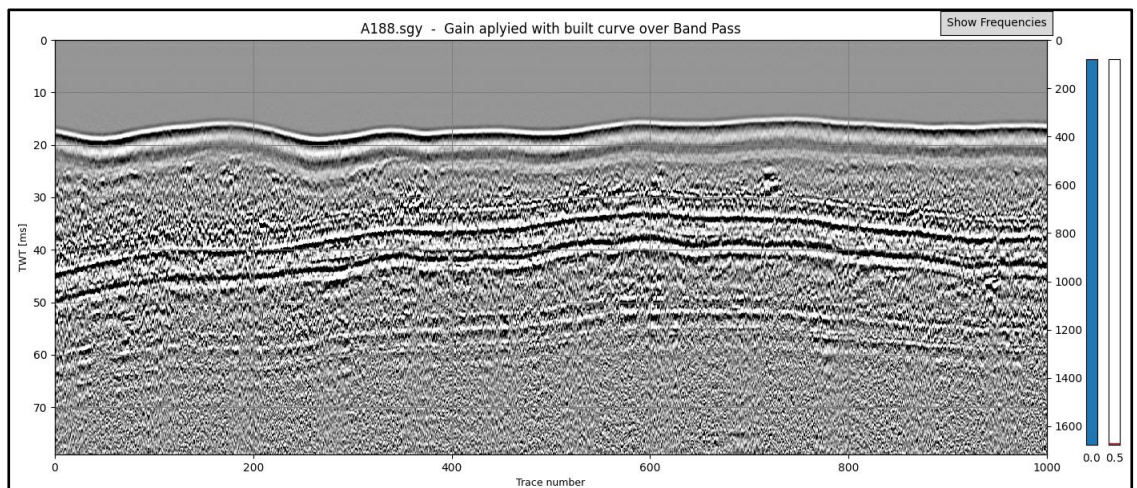


Figura 65 - Resultado da aplicação da curva de ganho manual sobre os dados da seção sísmica da figura 59.

O botão **Save** vai incluir a imagem filtrada na memória do programa para visualização posterior na etapa da Interpretação da seção sísmica.

5.5.3 - Filtro STA/LTA (STA/LTA)

O filtro Short Time Average / Long Time Average (STA/LTA) opera através da seleção do início e do fim de uma reflexão sísmica, sendo utilizado normalmente para a

detecção de terremotos. Opera com duas janelas de amostras a primeira para o início do pulso de reflexão e o segundo como o fim deste pulso (Figura 66).

Algumas seções sísmicas respondem muito bem a este filtro enquanto outras não. Normalmente as maiores reflexões são bem identificadas mesmo em ambiente ruidoso enquanto as maiores frequências são suprimidas.

As menores janelas de STA e LTA respondem com refletores mais definidos e superficiais, enquanto, as maiores, com refletores mais profundos. O conteúdo de frequências é limitado e tende a possuir valores mais baixos.

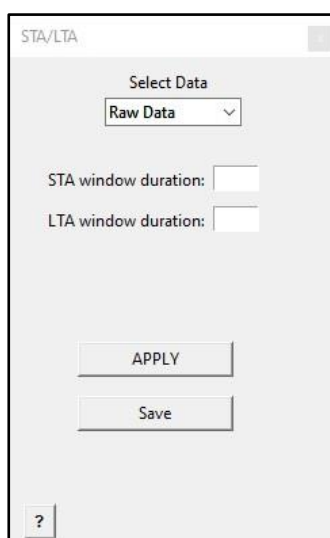


Figura 66 - Janela do filtro STA/LTA

O botão **Apply** retorna a imagem da seção sísmica filtrada. Nos exemplos abaixo foi utilizada uma seção previamente filtrada com Passa-Banda (figura 67) onde foi aplicado o filtro STA/LTA numa janela de 2/4 amostras resultando na imagem da figura 68. Os mesmos parâmetros de filtragem STA/LTA foram utilizados em uma seção onde foi aplicado o Clareamento Espectral (figura 69). O espectro de frequências resultante em cada caso pode ser observado através do botão *Show Frequencies*.

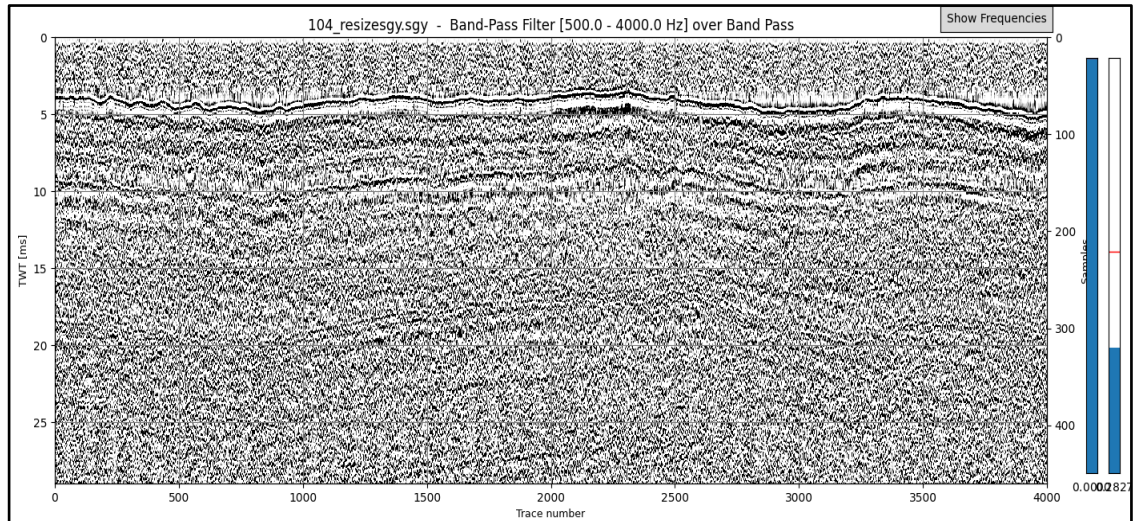


Figura 67 - Dados brutos filtrados com Passa-Banda sobre os quais será aplicado o filtro STA/LTA

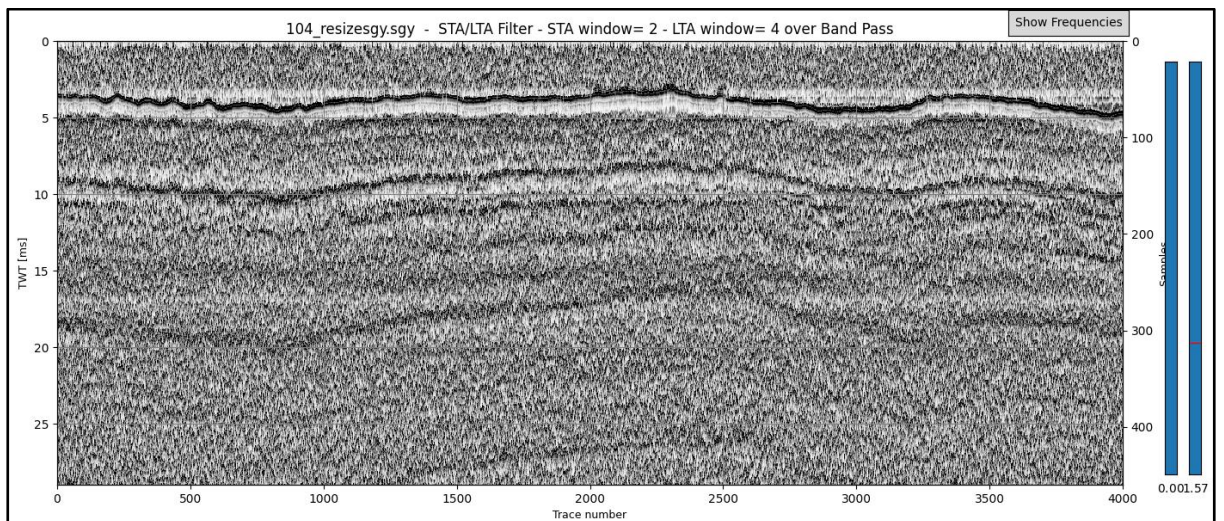


Figura 68 - Resultado da aplicação do filtro STA/LTA sobre os dados brutos da figura 66

Sobre o Clareamento Espectral o resultado do filtro STA/LTA produziu uma pequena melhoria na delimitação de alguns refletores devido ao aumento das frequências disponíveis nestes dados prévios (Figura 69).

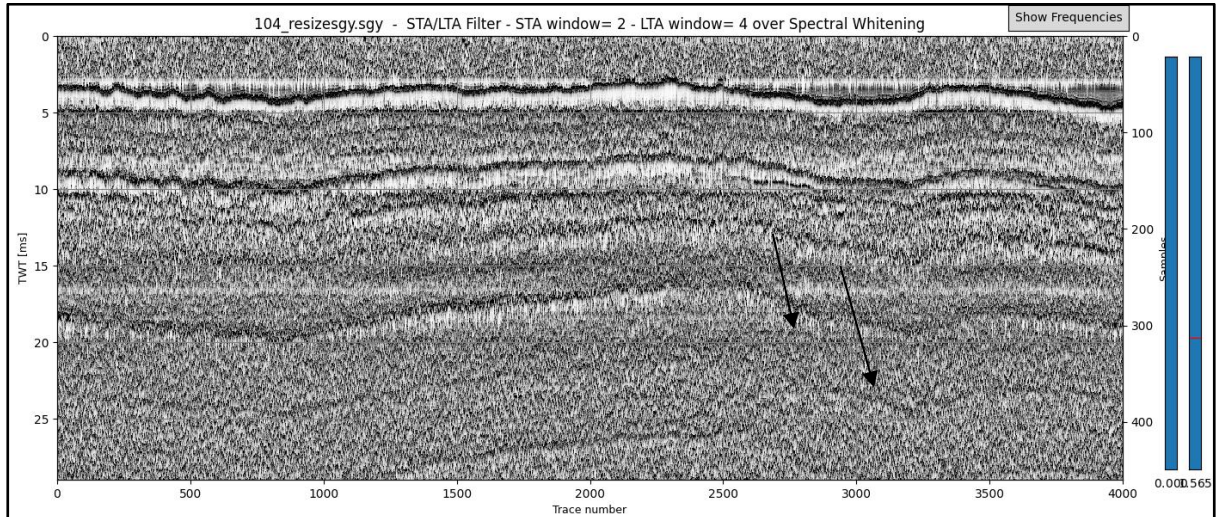


Figura 69 - Resultado da aplicação do filtro STA/LTA sobre dados filtrados através de Clareamento Espectral e sua distribuição de frequências antes e após a aplicação do filtro.

O botão **Save** vai incluir a imagem filtrada na memória do programa para visualização e interpretação posterior.

5.5.4- Transformada de Hilbert (**HILBERT**)

Este grupo de filtros utiliza a Transformada de Hilbert e permite a obtenção de resultados importantes. A partir da seleção dos dados da seção sísmica na opção **Select Data**, temos a opção de 3 filtros relevantes que constituem os subprodutos da aplicação da Transformada de Hilbert (figura 70).

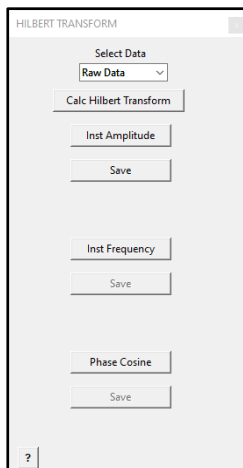


Figura 70 - Janela de Aplicação da Transformada de Hilbert

O principal produto deste algoritmo é a Amplitude Instantânea (**INST AMPLITUDE**). Fornece uma imagem da seção sísmica bem contrastada com alguma perda nas altas frequências, decorrente do tipo de procedimento utilizado, sendo conhecida pelo acrônimo de Envelope.

A aplicação deste filtro possui alguns limitantes e não deve ser aplicado sobre dados brutos envelopados. Para dados analíticos, devendo ser executada na última fase pois, remove a informação da fase do sinal durante sua aplicação. Na figura 72 abaixo podemos observar o comportamento típico deste filtro sobre dados pré-filtrados da figura 71:

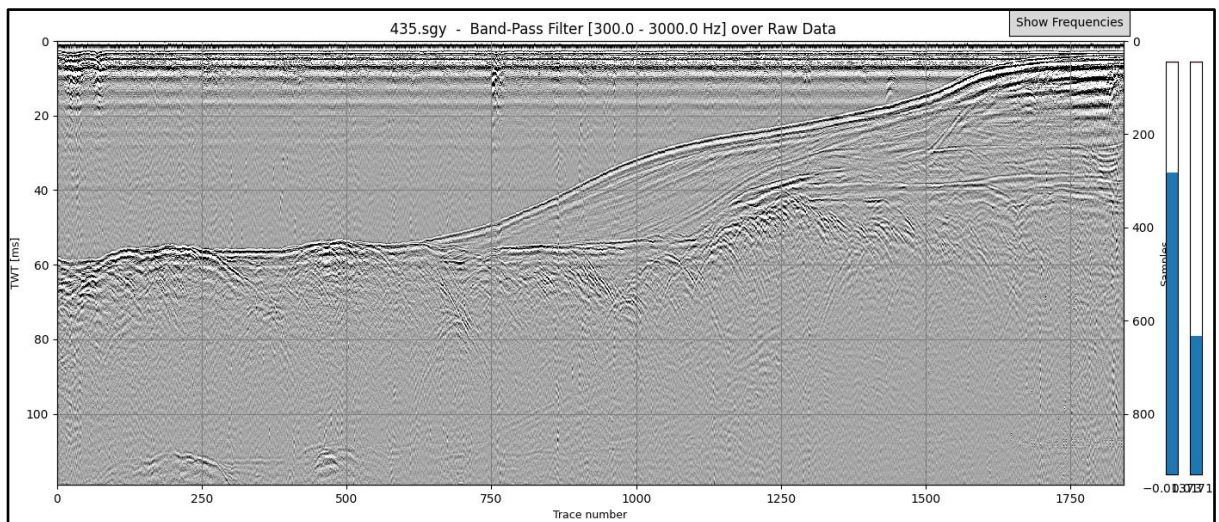


Figura 71 - Dados brutos filtrados com Passa-Banda utilizados na aplicação da Transformada de Hilbert

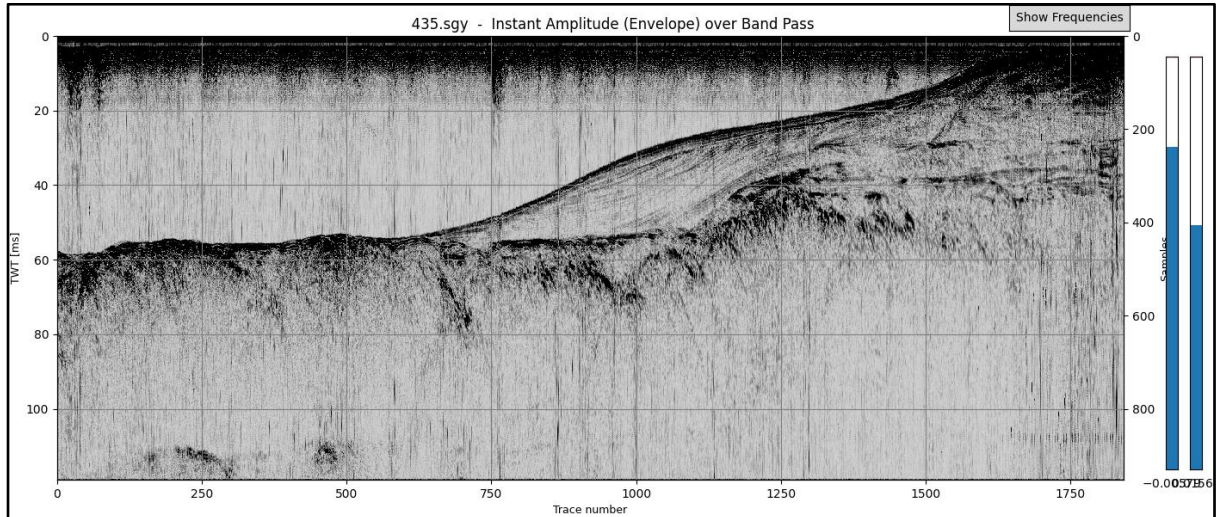


Figura 72 - Geração da Amplitude Instantânea (envelope) sobre dados da Figura 69

Este filtro é muito utilizado nos equipamentos de fontes ressonantes (*Chirp*), devido a fácil visualização dos principais eventos geológicos presentes na seção em função da boa definição das amplitudes médias, sendo por isso implantado como padrão em muitos equipamentos de *Sub Bottom Profiler*.

Algumas vezes o fabricante não fornece a opção de gravação dos dados originais, e somente fornece estes dados de Amplitude Instantânea (Envelope). Com isso certas possibilidades de filtragem sobre dados analíticos não podem ser executadas.

Um segundo atributo desta transformada é a Frequência Instantânea (**INST FREQUENCY**) que, em nossos testes, não se mostrou de grande auxílio ao processamento, estando, porém, disponível para aplicação em processamentos alternativos.

Outro atributo da Transformada de Hilbert, denominado Cosseno da Fase (**PHASE COSINE**), pode em alguns casos, atuar na ampliação do ganho dos refletores da figura 73, porém removendo a informação de suas amplitudes, fornecendo assim uma imagem da seção sísmica visualmente monotônica e homogênea (Figura 74)

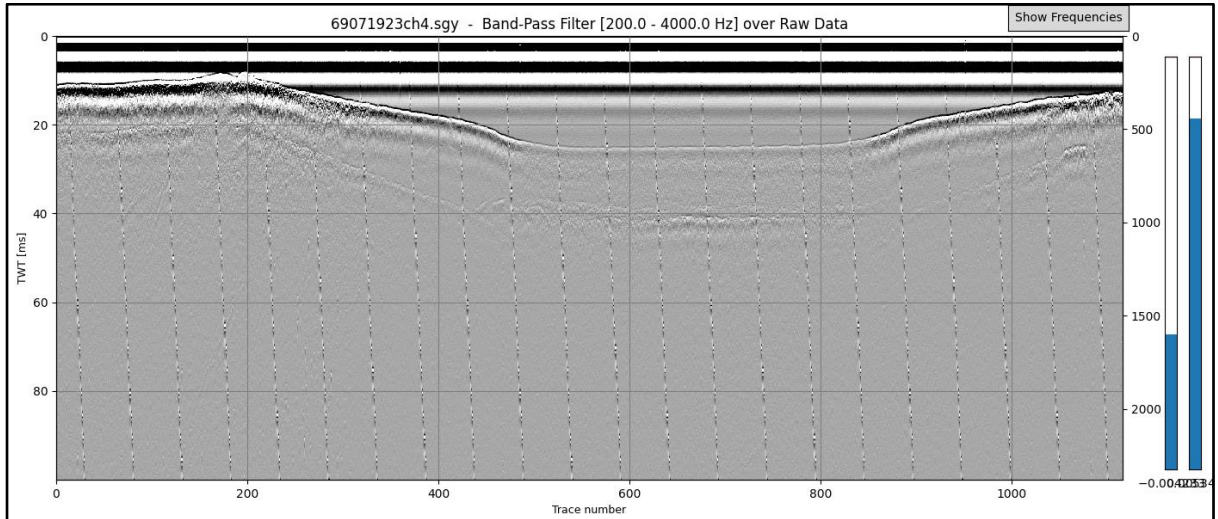


Figura 73 - Dados brutos com filtragem Passa-Banda.

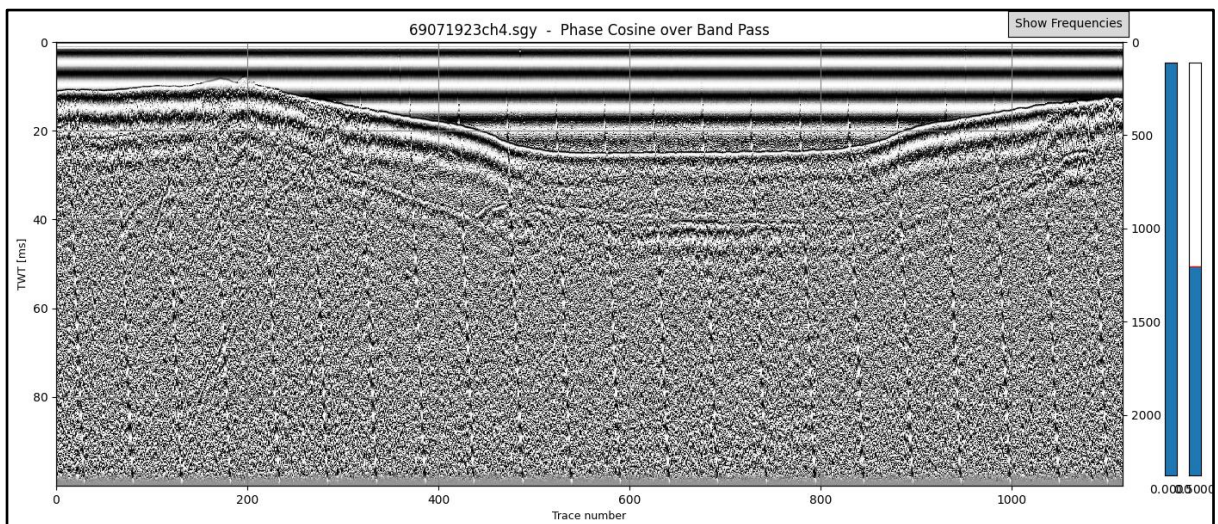


Figura 74 - Filtro Cosseno da Fase sobre a imagem da figura 72 gerando imagem monotônica.

Por último a Fase Instantânea permite a obtenção da Aceleração da Fase, atributo calculado como a derivada do tempo da frequência instantânea. Ela melhora o rápido aumento da frequência, fornecendo uma melhor resolução dos indicadores de leitos finos. Também mostra o efeito de absorção de ondas pela rápida dispersão de frequência através de camadas não consolidadas (Radomille – 2015). Como exemplo temos os dados da figura 75 resultando na imagem da figura 76.

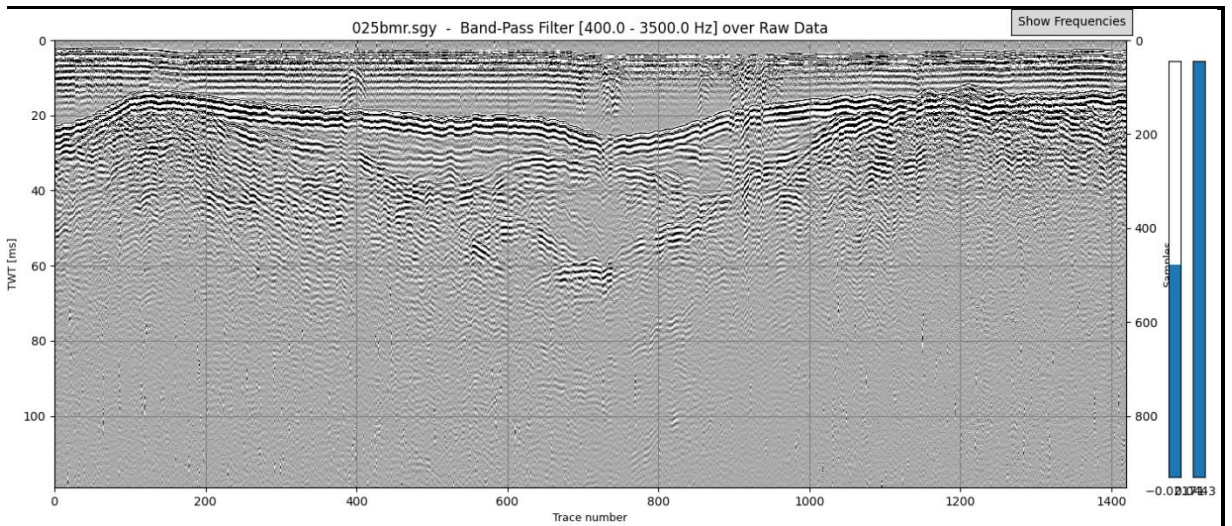


Figura 75 - Dados brutos filtrados com Passa_Banda

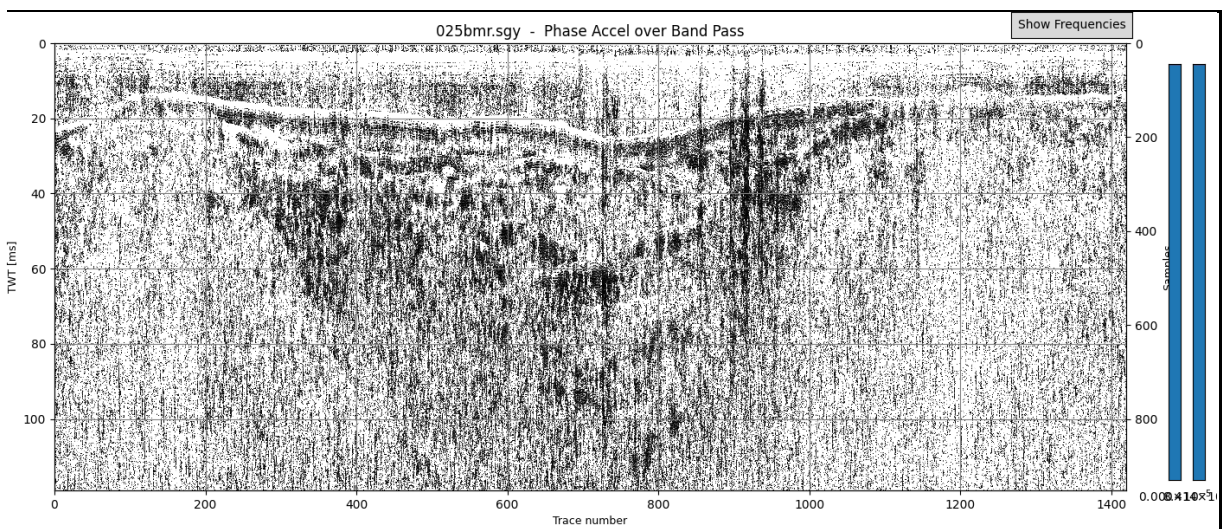


Figura 76 - Visualização do atributo Aceleração da Fase

Como nos itens anteriores, a aplicação destes filtros pode ser salva para utilização na interpretação sísmica.

5.6 - Convolução / Deconvolução (CONV/DECONV)

5.6.1 - Convolução Chirp-Ricker (CHIRP-RICKER CONVOLUTION)

Os dados sísmicos oriundos de sistemas ressonantes conhecidos como do tipo Chirp operam em uma faixa de frequências moduladas entre dois limites operacionais definidos pelos equipamentos, de maneira ordenada e linear.

A relação entre o pulso emitido e o sinal de retorno observado, pode ser mais facilmente modelada desde que o pulso gravado seja analítico, isto é que contenha as partes real e imaginária da Transformada de Hilbert.

Suas frequências instantâneas são bem definidas e variam linearmente com o tempo, permitindo sua deconvolução devido a sua relação mais simples entre o sinal observado e o impulso original.

Contudo em grande maioria os sistemas Chirp fornecem de retorno um sinal do tipo envelope que, apesar de apresentar um bom rendimento visual para o intérprete, não permite a deconvolução sísmica.

O pulso Chirp envelopado é um sinal não estacionário, ou seja, suas propriedades estatísticas (média, variância, autocorrelação, bias etc.) não são constantes e as técnicas tradicionais de deconvolução assumem sinais estacionários. Processamentos alternativos podem utilizar filtragem adaptativa, correção de fase técnicas de migração avançadas que levam em consideração as características não estacionárias e complexas desses sinais ([Baradello, Kim](#)).

Como alternativa as limitações da deconvolução foi testada uma Convolução com as wavelets padrão das figuras 23, e 24. O melhor resultado foi obtido utilizando a wavelet Ricker da figura 23.

Para a definição do período dessa wavelet é necessário que seja informado o comprimento do pulso emitido (**Pulse Width**) que pode ser obtido através do Header EBCDIC ou do Bin Header do arquivo SEG-Y (vide figuras 23 e 24) ou, em sua falta, com uma pesquisa nos manuais dos equipamentos.

Na falta dessa informação pode-se, empiricamente, tentar comprimentos de pulso em torno de 0.005 s variando este valor em função do resultado obtido.

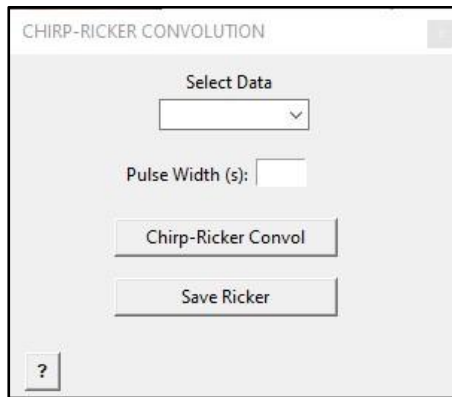


Figura 77 - Janela da Convolução Chirp-Ricker

No **botão Chirp-Ricker Convol** será produzida a imagem da seção sísmica resultante da Convolução dos dados selecionados com uma wavelet Ricker (Chapéu Mexicano), utilizando como parâmetro o comprimento do pulso Chirp emitido.

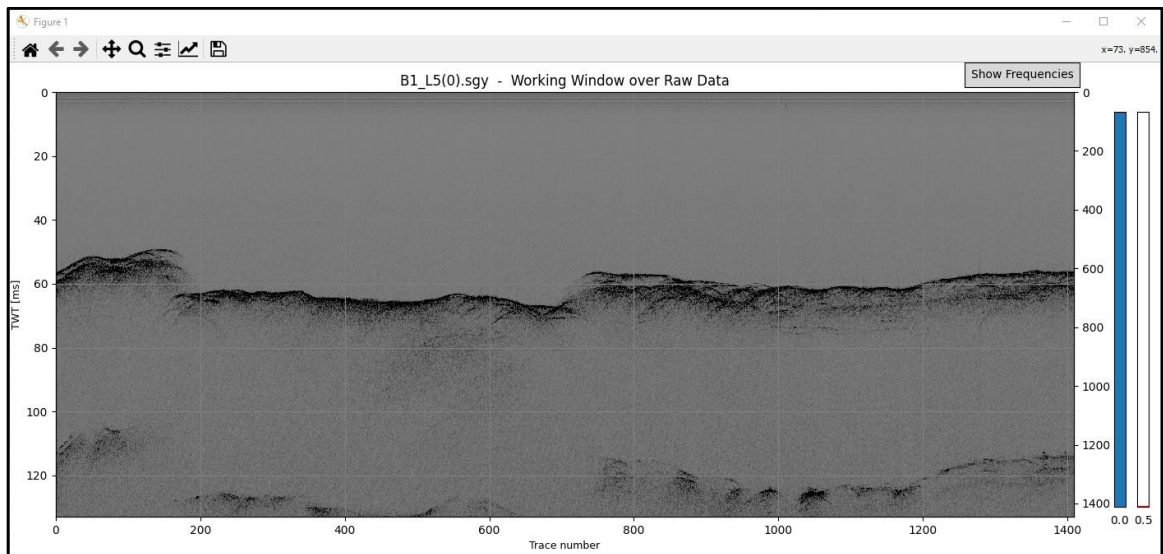


Figura 78 - Dados brutos utilizados na aplicação da Convolução com a Wavelet Ricker

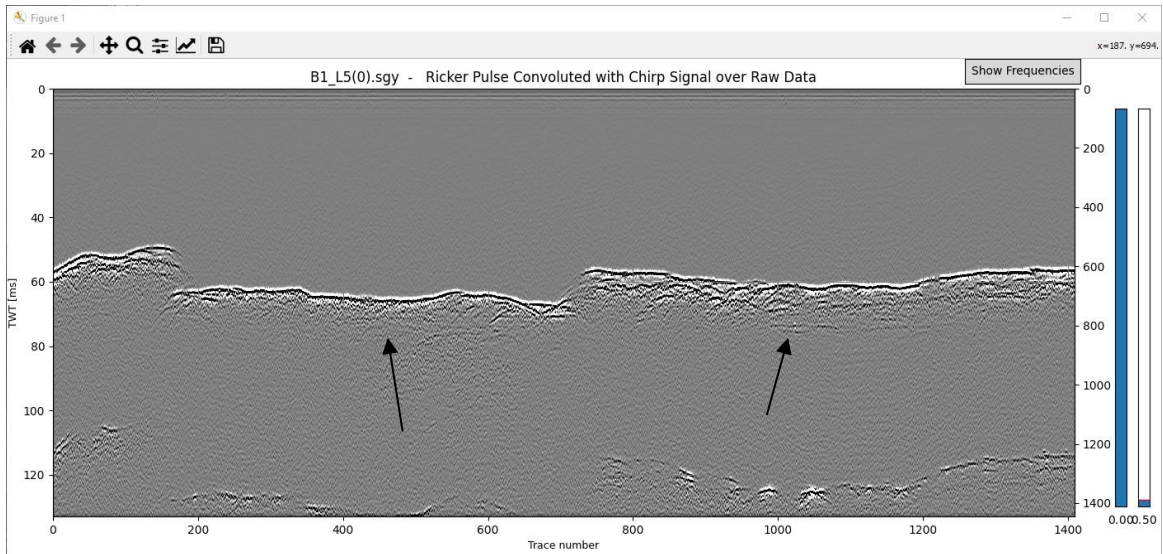


Figura 79 - Efeito da Convolução entre os dados da figura 78 e a wavelet Ricker

O resultado dessa Convolução foi o incremento nas baixas frequências resultando em alguns refletores profundos mais bem definidos (figura 79), em comparação com os dados envelopados originais da figura 78. A observação entre os espectros antes e após a Convolução, ilustra este resultado (figura 80).

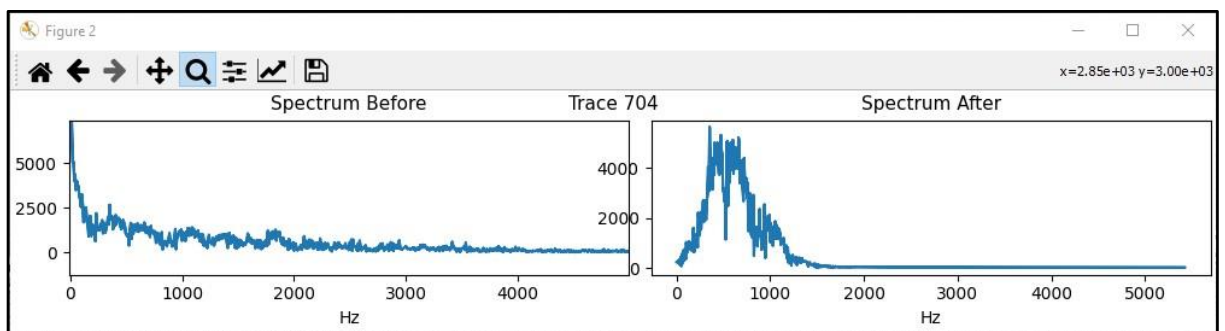


Figura 80 - Espectro resultante da Convolução Chirp-Ricker mostrando distribuição de ganho nas baixas e perda nas altas frequências

O botão **Save Ricker** vai armazenar esta filtragem para uso na interpretação.

5.6.2 - Deconvolução Boomer (**BOOMER DECONVOLUTION**)

Os dados sísmicos oriundos de sistemas impulsivos conhecidos como do tipo *Boomer* ou *Sparker* operam em uma faixa de frequências entre 200 Hz e 3 kHz de acordo com

os modelos de equipamento. As frequências são distribuídas neste espectro e os pulsos de emissão variam entre 5 e 50 ms.

Baseado nestes parâmetros, segundo [Park \(2019\)](#), podemos construir a wavelet de um pulso Boomer através da captura do primeiro sinal do fundo. Isto é feito através da delimitação de uma janela contendo alguns sinais de retorno do fundo, preferencialmente paralelos, que serão somados de modo a construir um pulso sintético que será utilizado nas etapas seguintes.

Considerando que o pulso *Boomer* é de fase mínima (vide 3.13 - Análise Wavelet), o objetivo é conseguir uma wavelet da autocorrelação dos pulsos somados que se aproxime ao máximo da wavelet teórica ideal da figura 81 abaixo.

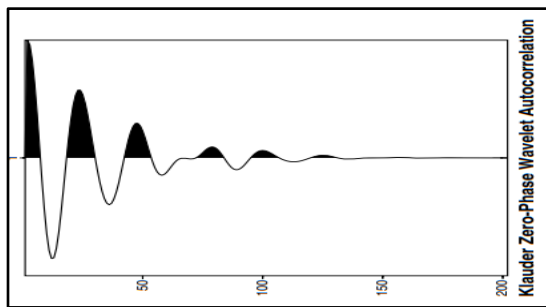


Figura 81 - Klauder zero-phase wavelet ([Dev, 1999](#))

Na janela de Deconvolução do sinal de *boomer* (Figura 82), temos as seguintes etapas:

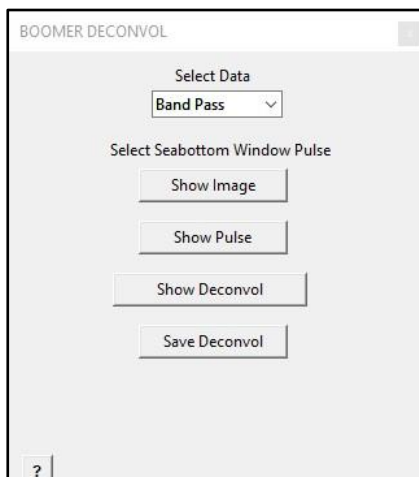


Figura 82 - Deconvolução do sinal de *Boomer*

Após a seleção do tipo de dado, no botão **Show Image** temos a visualização da seção sísmica onde será definida a janela de captura do sinal de fundo, conforme ilustrado na figura 83.

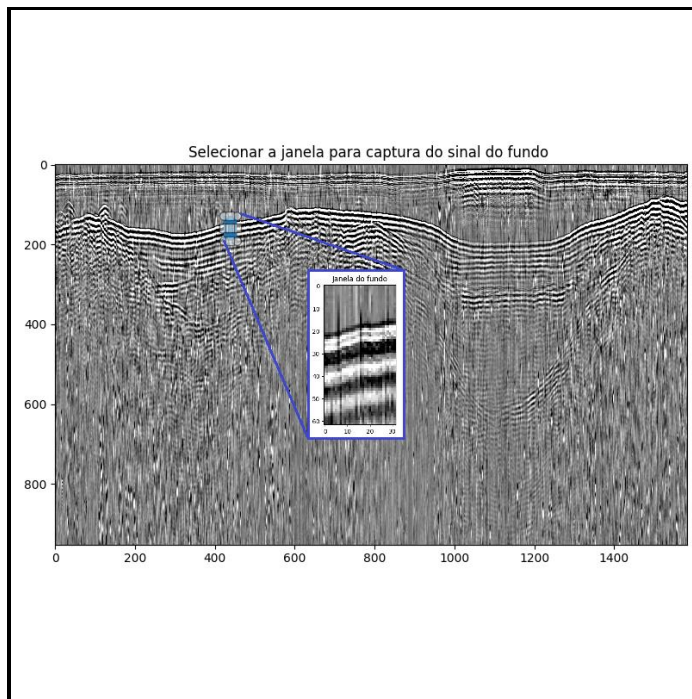


Figura 83 - Janela de captura do sinal de fundo

Em seguida, o botão **Show Pulse** mostrará as etapas mostradas na figura 84:

- a imagem resultante da captura do fundo (**A**),
- o resultado da soma dos pulsos de fundo (**B**) e
- a wavelet gerada pela sua autocorrelação (**C**).

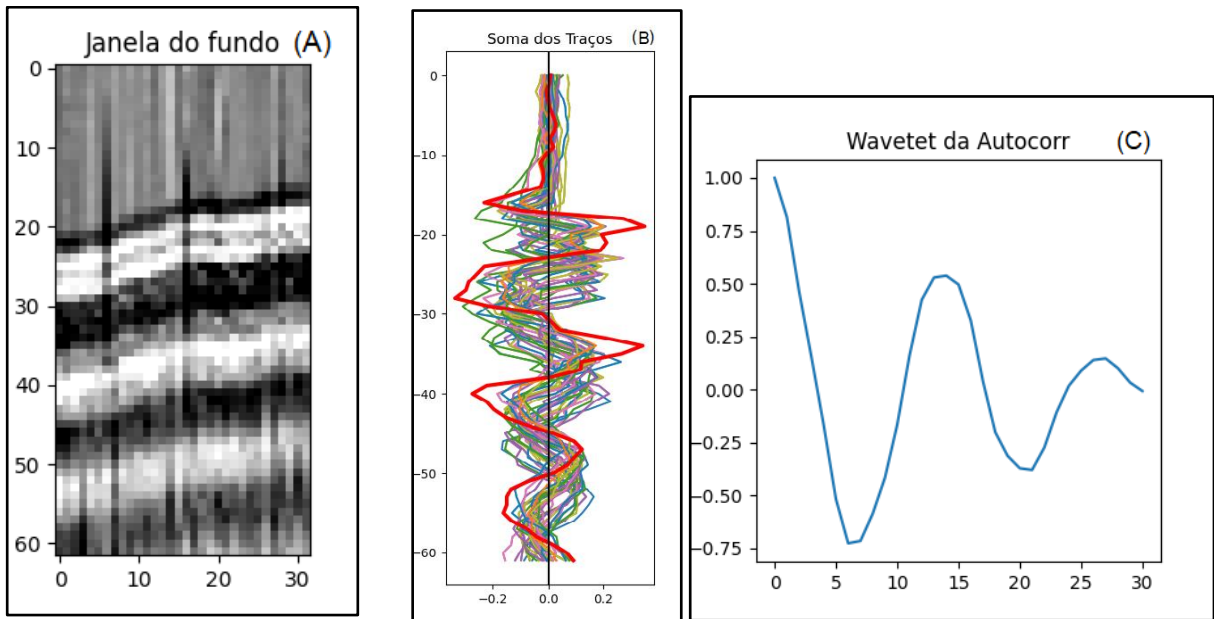


Figura 84 - Etapas de construção da wavelet para a Deconvolução do Boomer

- (A) - Janela de captura do fundo,
- (B) - Soma dos traços desta janela,
- (C) - Wavelet da Autocorrelação do traço Soma

Em seguida teremos o resultado da Deconvolução da seção sísmica com a *wavelet* obtida pode ser visualizada através do botão **Show Deconvol** na janela da figura 85.

Quando bem ajustada, ou seja, similar a figura 81, a aplicação desta wavelet na Deconvolução da seção sísmica, permitirá um aprimoramento da imagem através da redução na largura do pulso de emissão, resultando numa imagem com maior resolução sísmica, conforme a comparação entre as figuras 85 e 86.

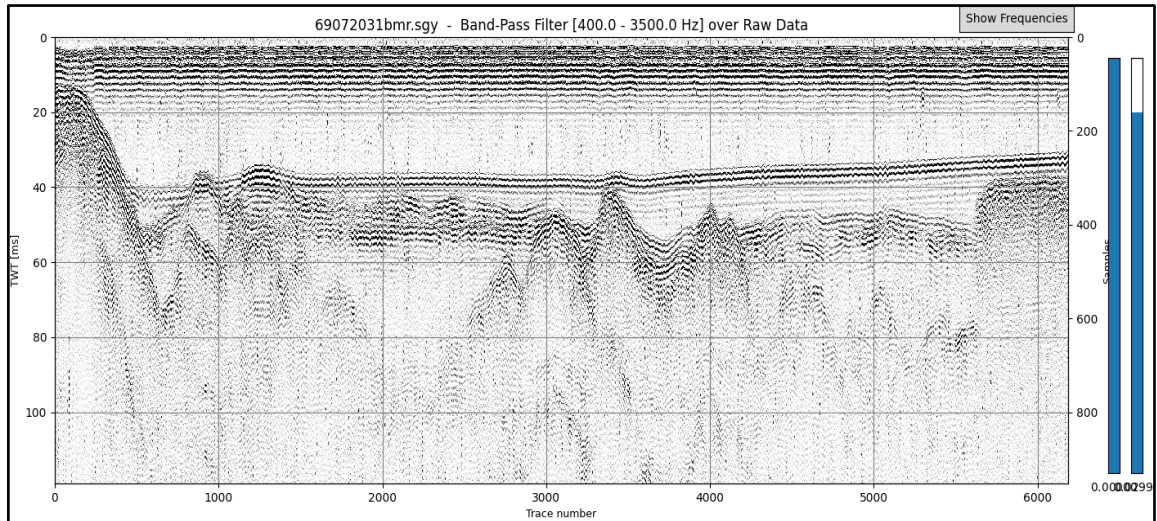


Figura 85 - Dados originais filtrados com Passa-Banda para redução de ruído

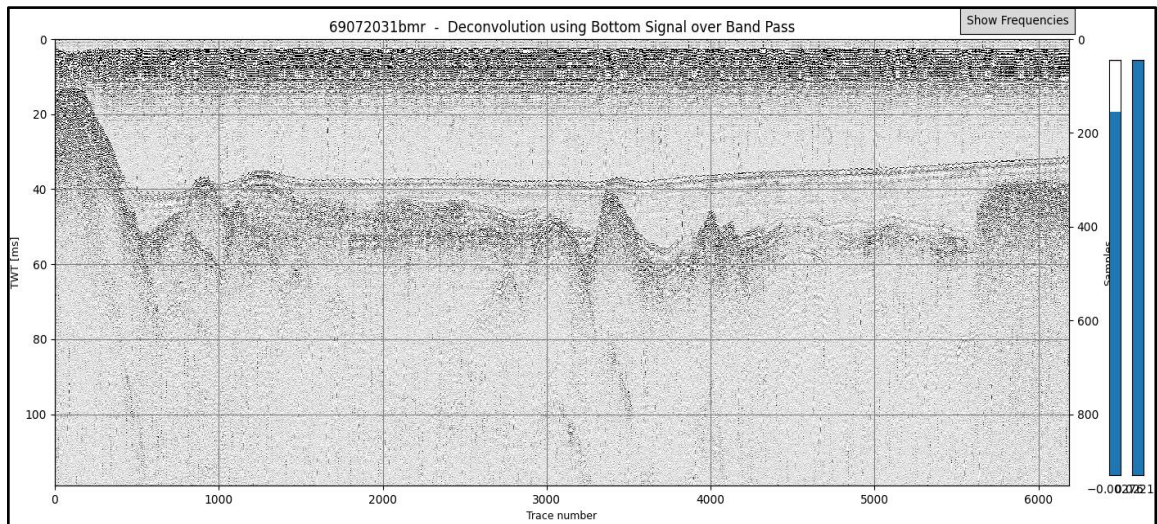


Figura 86 - Efeito da Deconvolução utilizando a wavelet da figura 82-C sobre os dados da figura 83

A distribuição da amplitude das frequências também pode ser bastante alterada conforme o resultado do espectro da Deconvolução mostrado na figura 87.

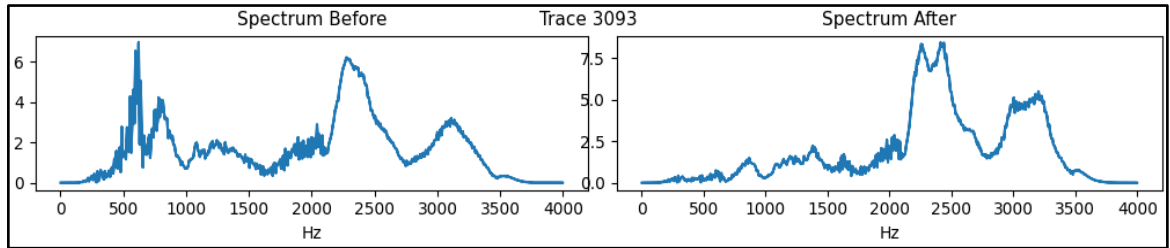


Figura 87 - Alteração do espectro da seção com o aumento nas altas frequências, resultante da Deconvolução dos dados brutos com a soma dos sinais capturados do fundo marinho.

Sobre a Deconvolução podem ser aplicados outros filtros como nos exemplos abaixo onde observa-se um aumento na resolução sísmica.

Assim, sobre os dados originais filtrados com Passa-Banda da figura 88 foi aplicada a Amplitude Instantânea (Figura 89) e a Deconvolução (Figura 90). Em seguida, sobre os dados da Deconvolução da figura 90 foi aplicada a Amplitude Instantânea (Envelope) resultando na imagem da figura 91, contendo sensíveis melhorias no *ringing* do sinal e sua consequente resolução, além dos contrastes fornecidos pela Amplitude Instantânea.

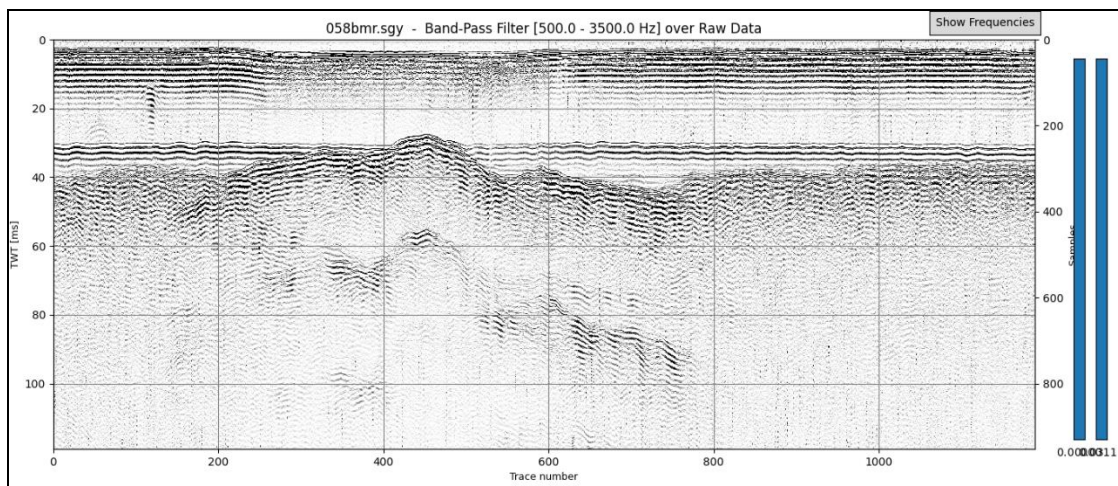


Figura 88 – Dados brutos iniciais filtrados com Passa-Banda para correção inicial

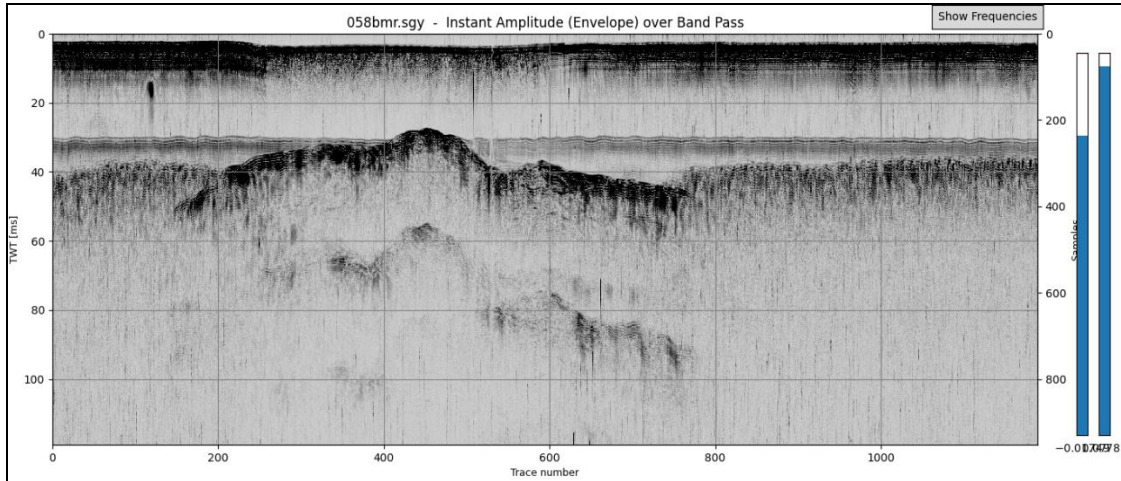


Figura 89 - Amplitude Instantânea (envelope) sobre os dados iniciais

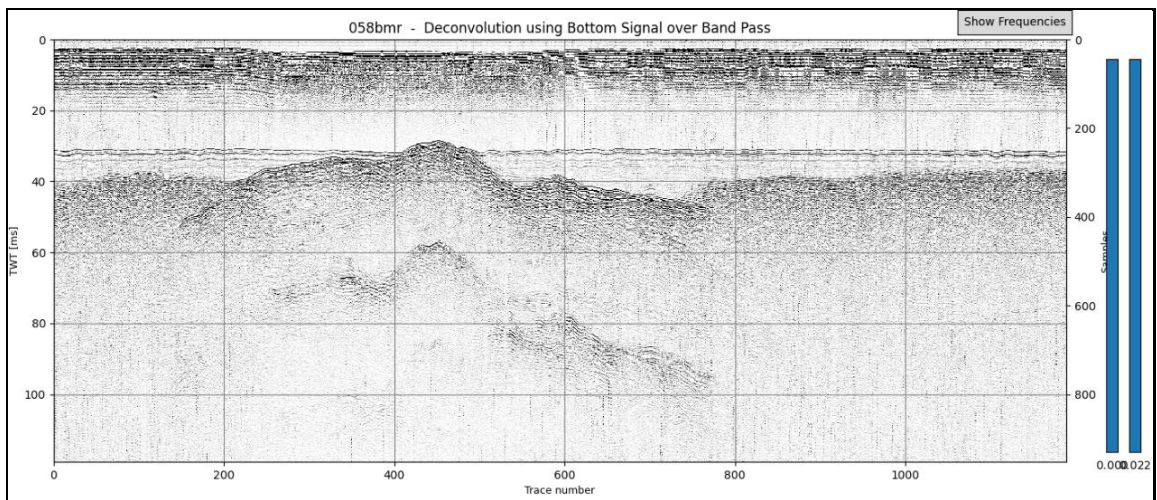


Figura 90 – Aplicação da Deconvolução sobre os dados iniciais

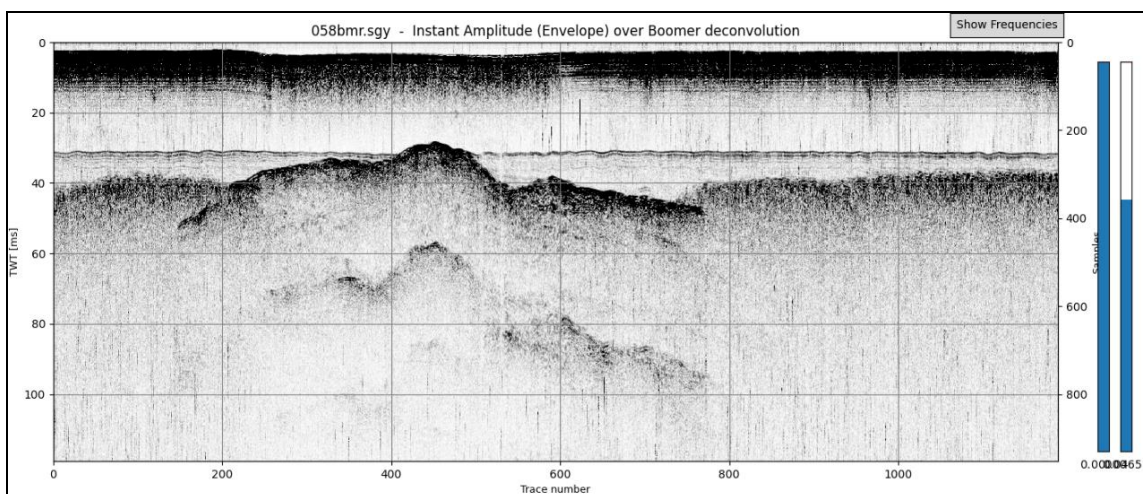


Figura 91 - Amplitude Instantânea (envelope) sobre a Deconvolução

O botão **Save Deconv** vai armazenar este resultado para etapas posteriores.

5.7 - Filtros de Imagem (IMAGE FILTERS)

Alguns filtros de imagem de uso geral foram incluídos por permitirem ainda algum efeito de melhora sobre os dados anteriormente processados. O filtro de Laplace, as derivadas em X e Y dos sinais sísmicos e o filtro Wiener. Os três primeiros atuam principalmente nas altas frequências e o último nas baixas frequências. Abaixo alguns exemplos desses resultados (Figuras 93 a 96):

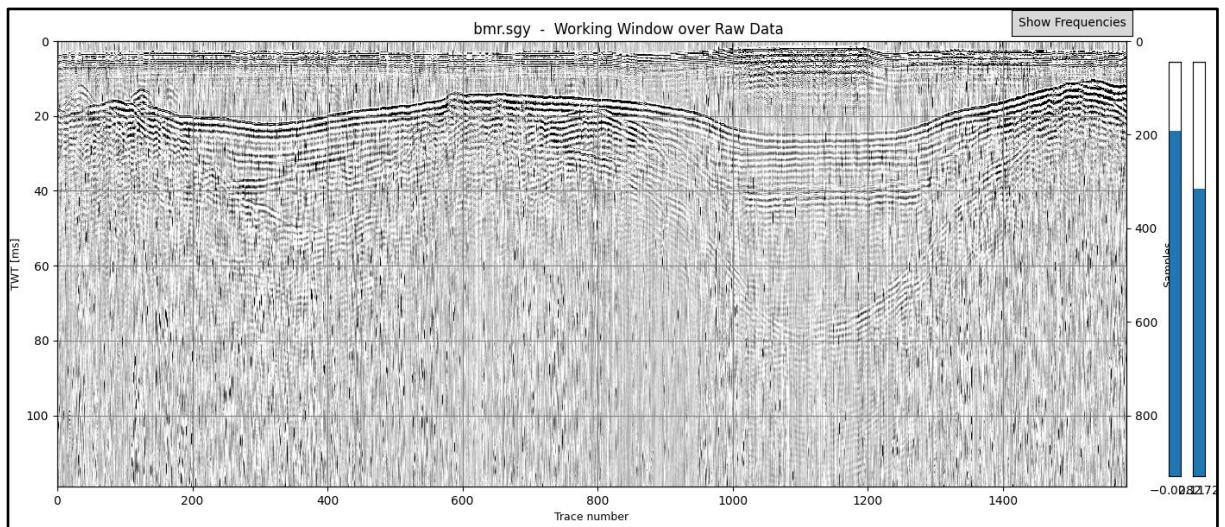


Figura 92 - Dados originais

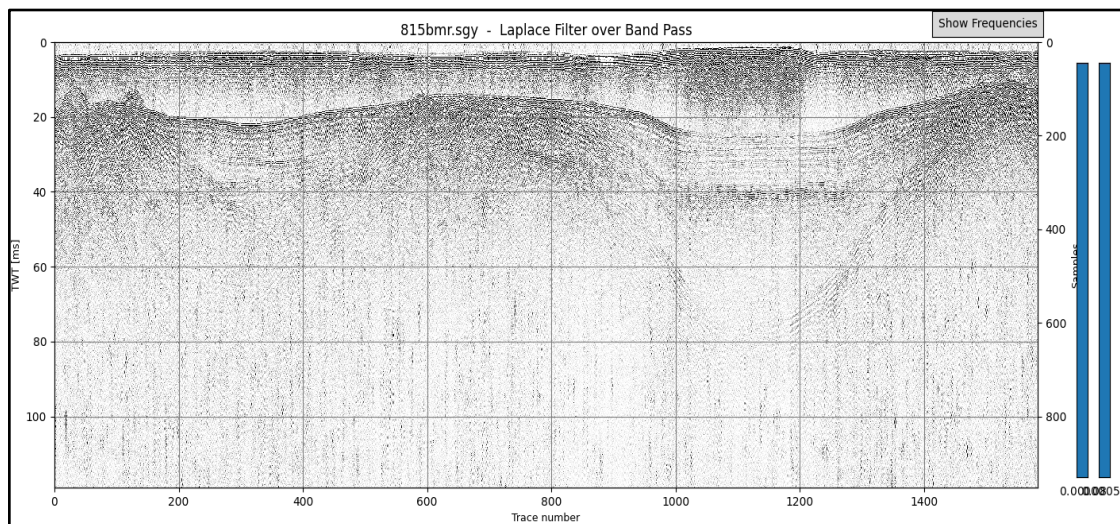


Figura 93 - Aplicação do filtro *Laplace* sobre os dados originais acima

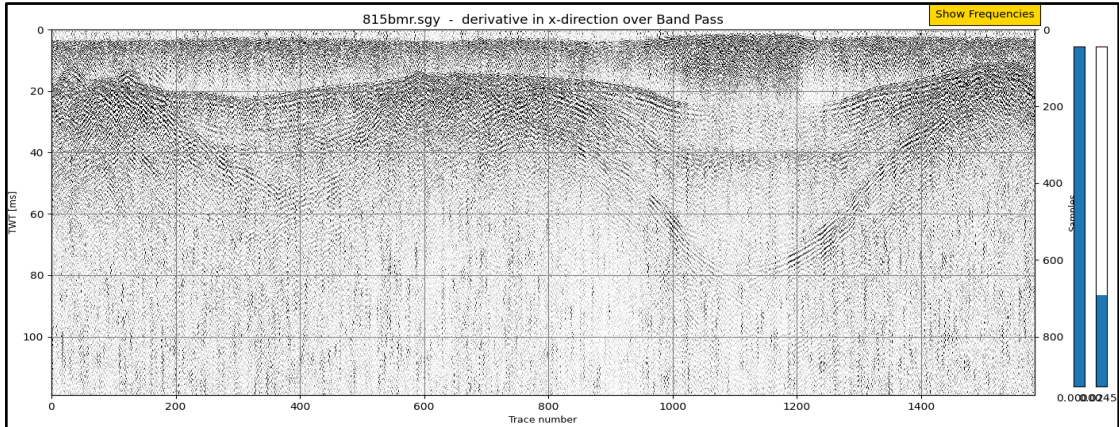


Figura 94 - Aplicação da Derivada-X sobre os dados acima reforçando as reflexões verticais

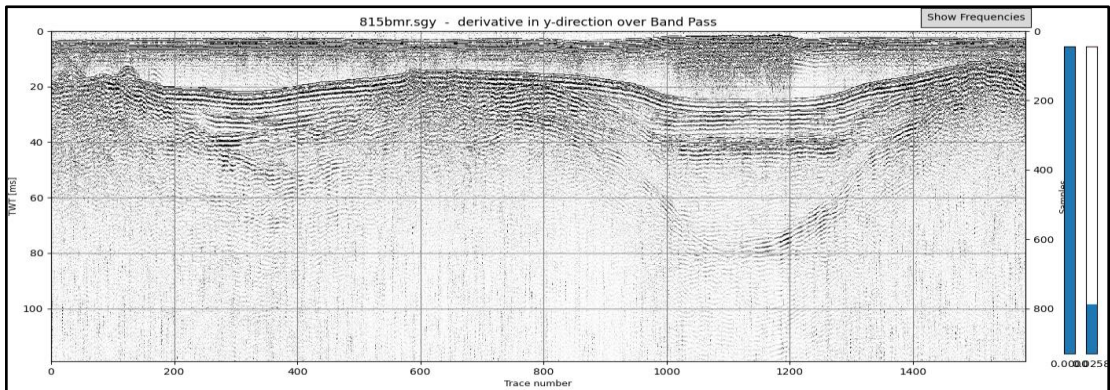


Figura 95 - Aplicação da Derivada Y sobre dados brutos acima reforçando as reflexões horizontais

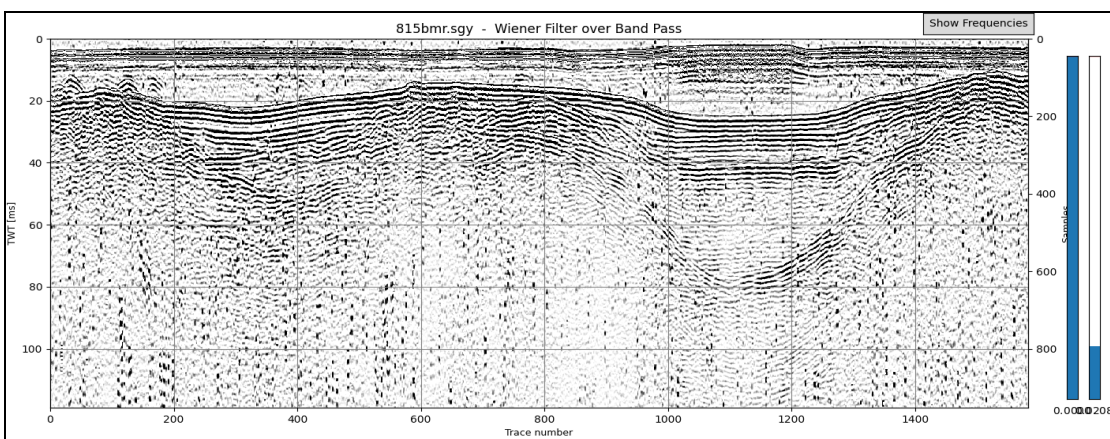


Figura 96 - Aplicação do filtro Wiener sobre os mesmos dados brutos reforçando as baixas frequências.

Como nas etapas anteriores estes filtros podem ser aplicados individualmente, ou sobre quaisquer outros resultados.

5.8 - Mapeamento de Refletores (**INTERPRET**)

A possibilidade de utilizar vários filtros diferentes sobre os dados brutos oferece algumas alternativas a mais na determinação das características físicas e geológicas dos refletores da seção sísmica. Estas visualizações diferentes permitem acrescentar informação adicional aos dados brutos e podem facilitar o mapeamento de feições estratigráficas e de horizontes sísmicos de interesse específico.

Como exemplo, podemos visualizar abaixo a aplicação de alguns filtros sobre uma seção sísmica obtida através de um perfilador Chirp da marca Edgetech. O espectro de frequências retornadas ao sensor abrangeu o intervalo entre 200 e 3500 Hz (figura 97).

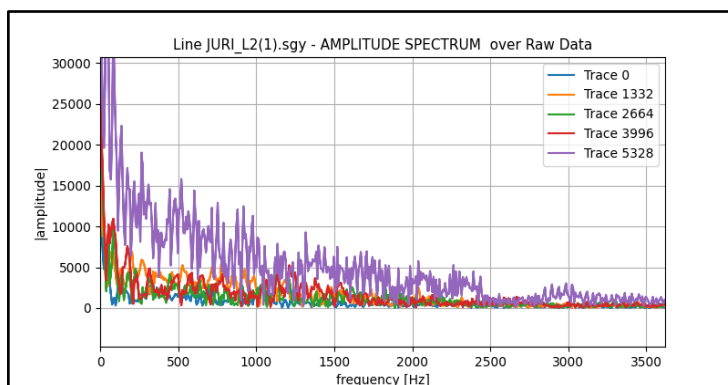


Figura 97 - Espectro de amplitude da seção visualizada

As imagens abaixo fornecem um exemplo da abordagem que pode ser realizada na visualização de feições e refletores através de alguns dos vários filtros disponíveis, sobre uma única seção sísmica (Figuras 98 a106).

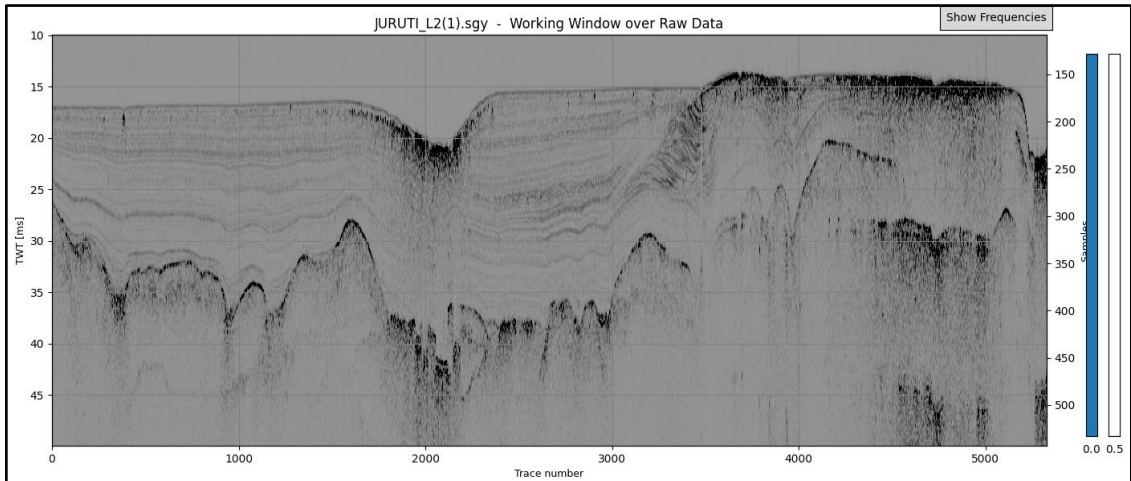


Figura 98 - Dados brutos usados para a aplicação dos vários filtros a seguir

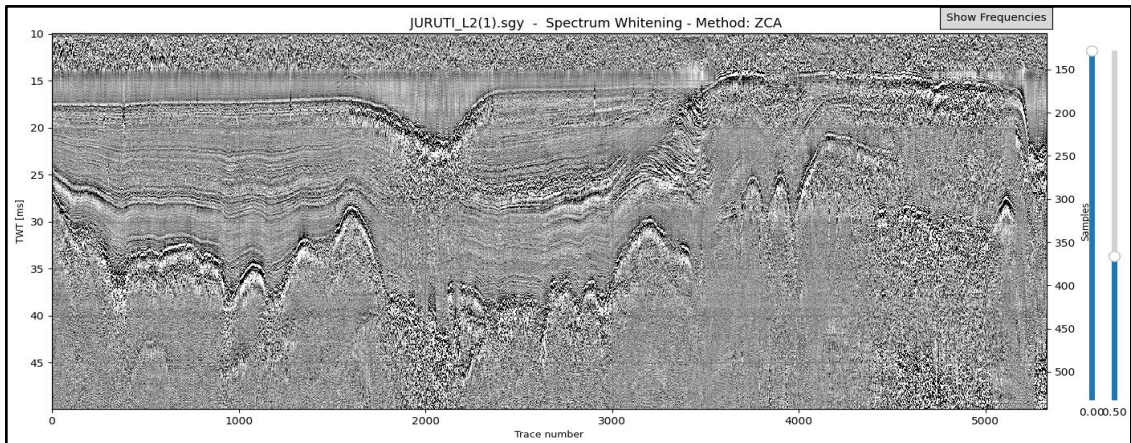


Figura 99 - Resultado da aplicação do Clareamento Espectral

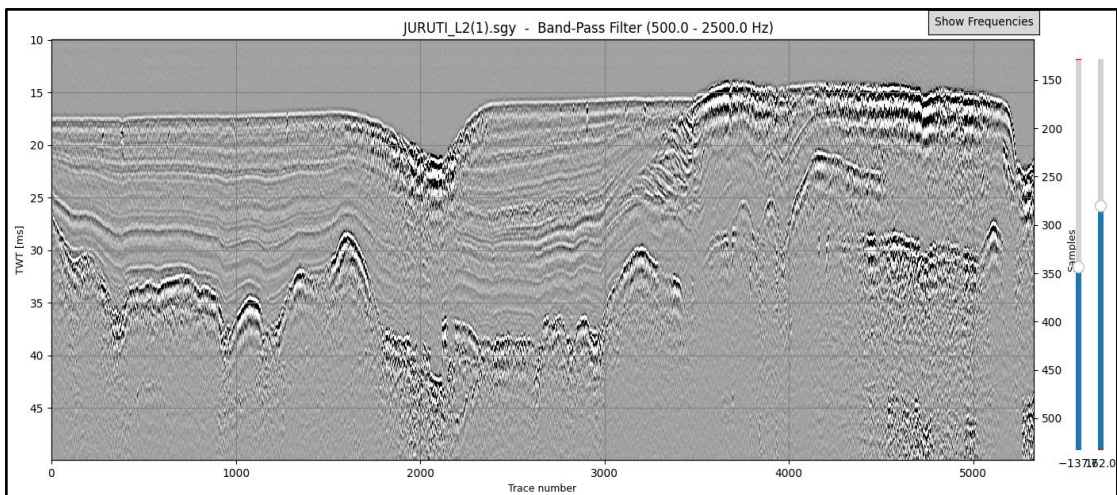


Figura 100 - Resultado da aplicação do filtro Passa-Banda

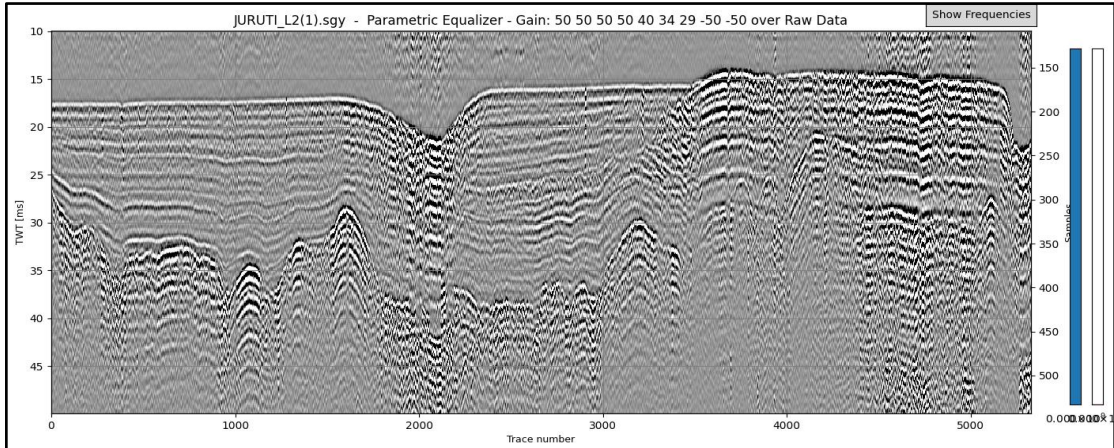


Figura 101 - Resultado da aplicação do Equalizador Paramétrico

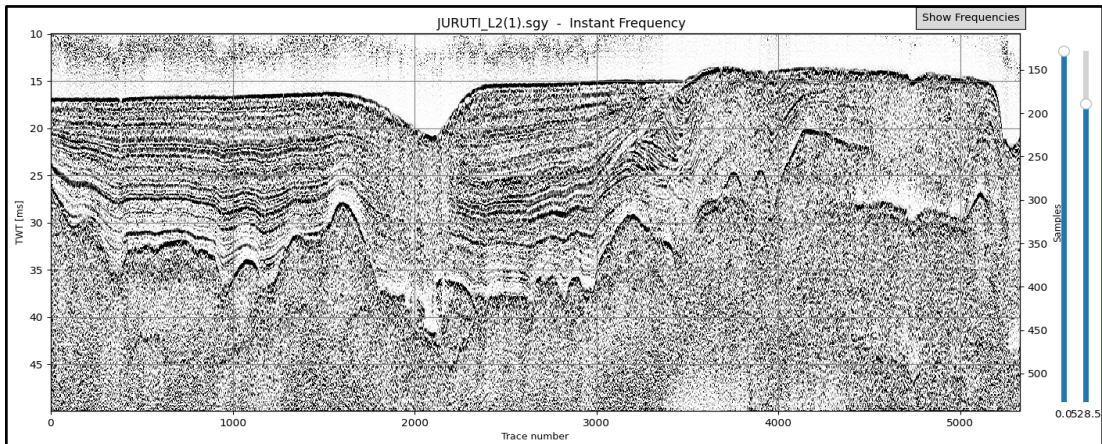


Figura 102 - Visualização da Frequência Instantâneas obtida através da Transformada Hilbert

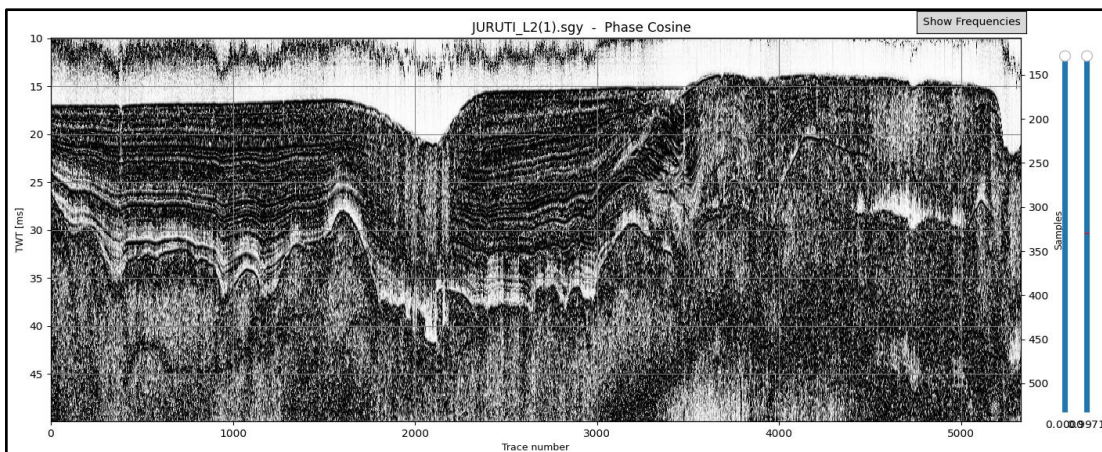


Figura 103 - Visualização do Cosseno da fase obtida pela Transformada *Hilbert*

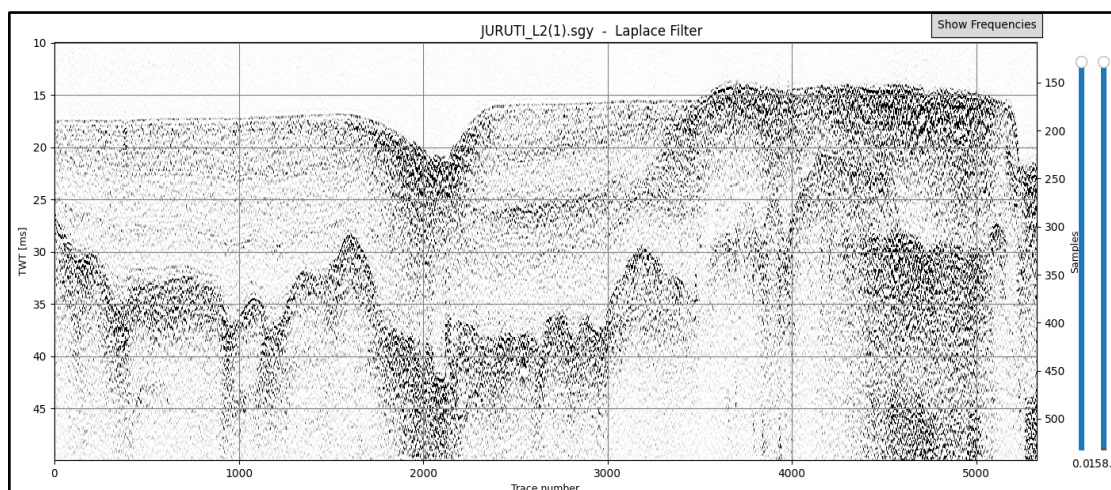


Figura 104 - Atuação do filtro Laplace

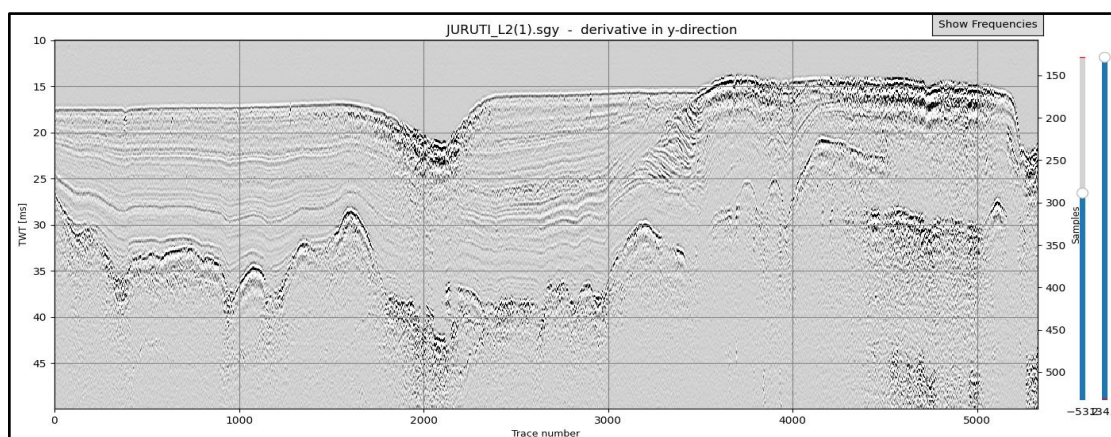


Figura 105 - Visualização da aplicação da derivada em Y

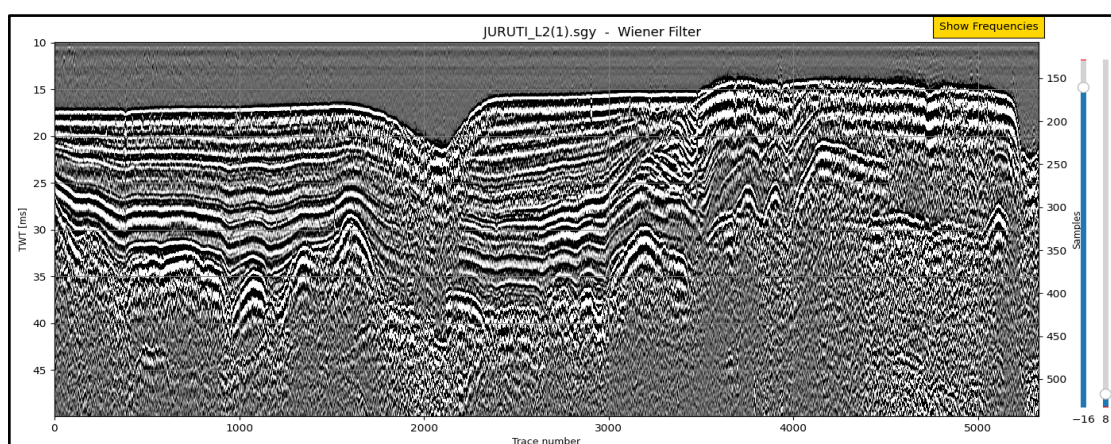


Figura 106 - Atuação do filtro Wiener

5.9 - Interpretação das Feições Sísmicas

Utilizando as imagens salvas na aplicação dos filtros, a interpretação das feições sísmicas de interesse pode ser realizada através da alternância entre as imagens que melhor visualizam determinado horizonte sísmico.

As figuras seguintes ilustram o acréscimo de novas informações fornecidas pela aplicação da Amplitude Instantânea sobre Passa-Banda, AGC e Deconvolução (Figuras 107, 108 e 109).

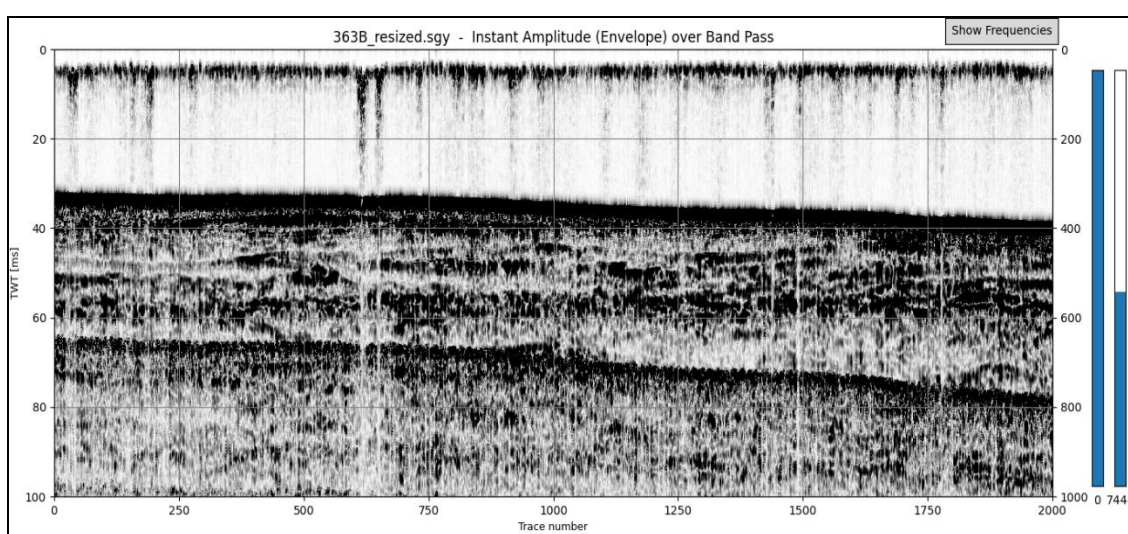


Figura 107 – Resultado da Amplitude Instantânea sobre os dados Passa-Banda com baixa clareza nas feições de interesse.

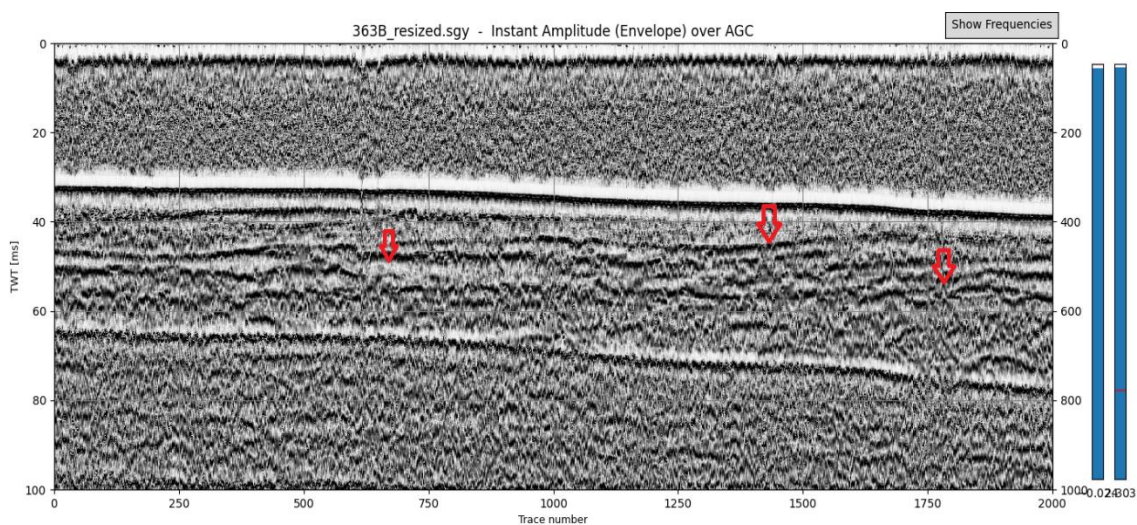


Figura 108 – Aplicação do controle de ganho AGC com melhora na qualidade de alguns refletores

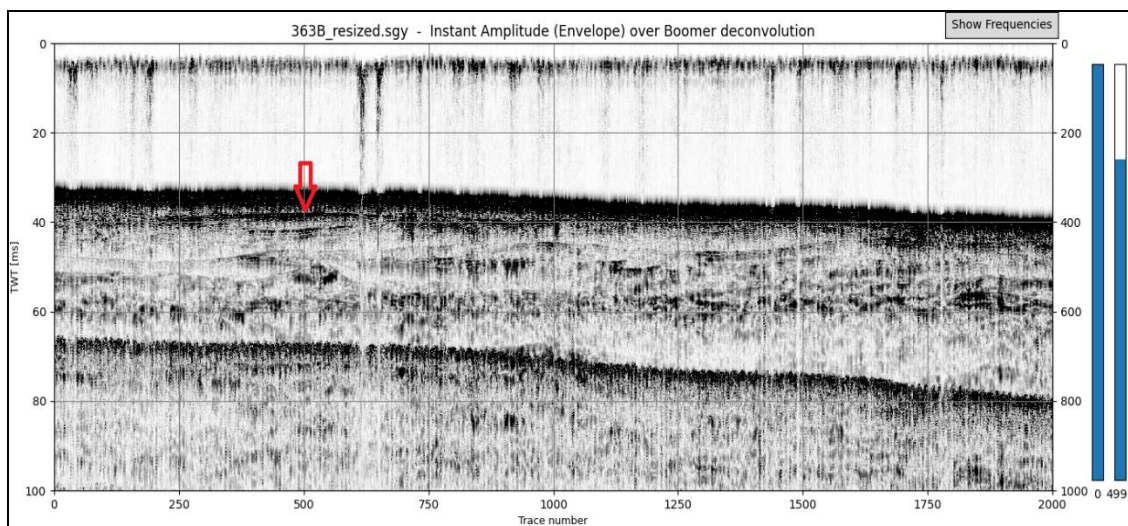


Figura 109 – Aumento de resolução sísmica próximo ao fundo, com a aplicação da Deconvolução sobre os dados da Amplitude Instantânea.

Para dados *Chirp* normalmente envelopados, o filtro Passa-Banda produz um sinal analítico que pode apresentar um aumento de penetração (Figura 110) e a Convulsão deste sinal reduz a espessura da reflexão do fundo sem alteração da penetração sísmica (Figura 111).

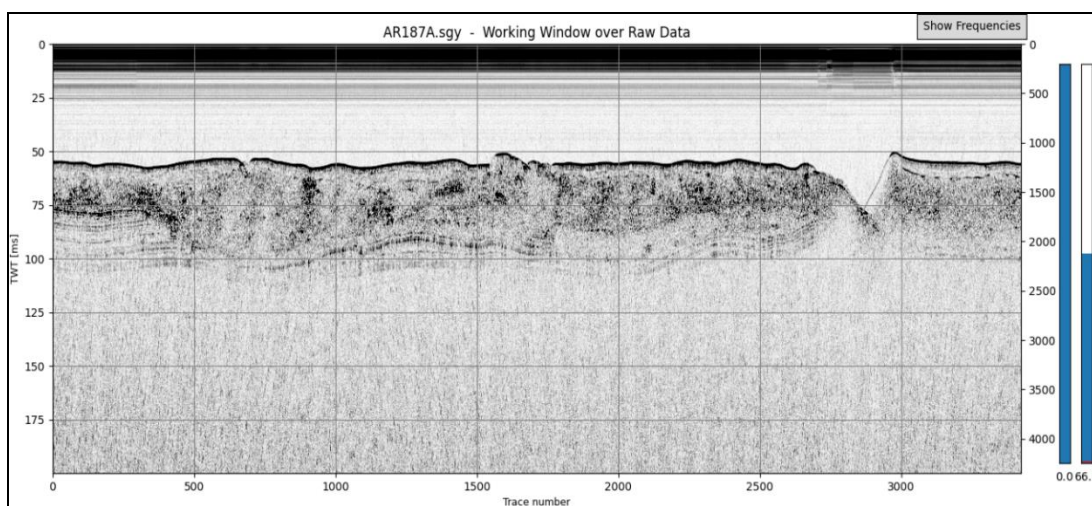


Figura 110 – Seção com dados originais *Chirp* envelopados

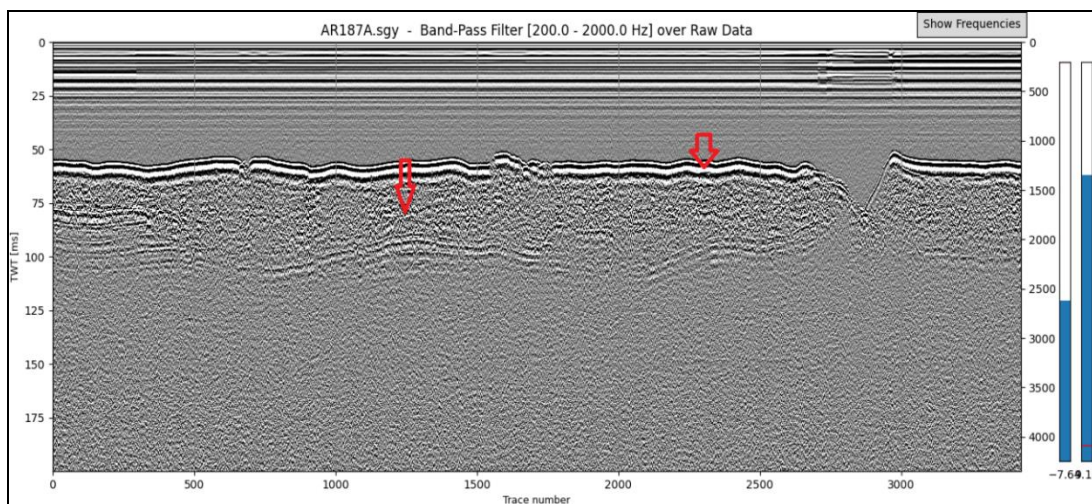


Figura 111- Aplicação do filtro Passa-Banda sobre os dados da figura 110 com aumento na penetração, porém com perda de resolução próximo ao fundo.

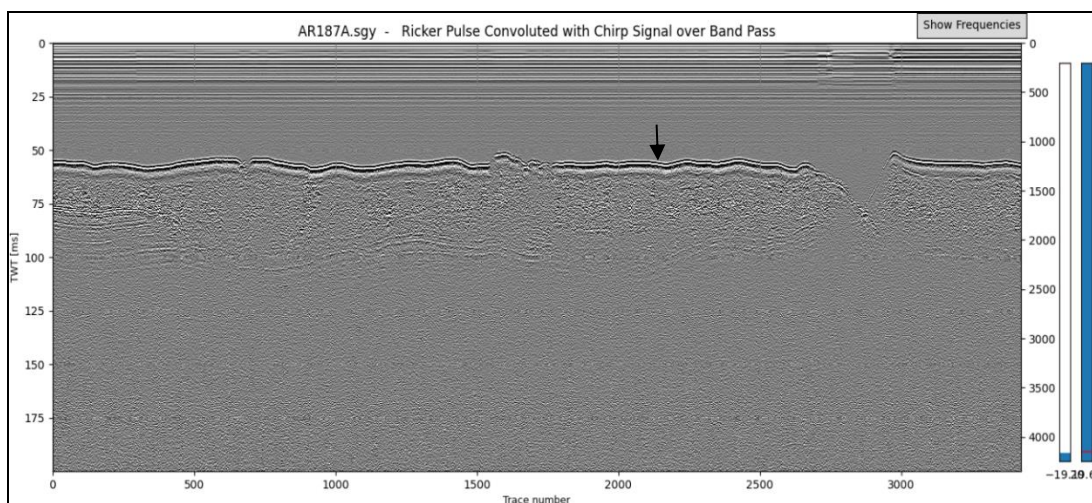


Figura 112 – Convolução dos dados Passa-Banda com a *wavelet Ricker* mostrando aumento de resolução da camada próxima ao fundo sem perda na penetração.

No próximo exemplo ao Amplitude Instantânea foi aplicada sobre os dados Passa-Banda (figura 113) e sobre os dados com Clareamento Espectral (figura 114). É possível notar o aumento de resolução devido a este último filtro.

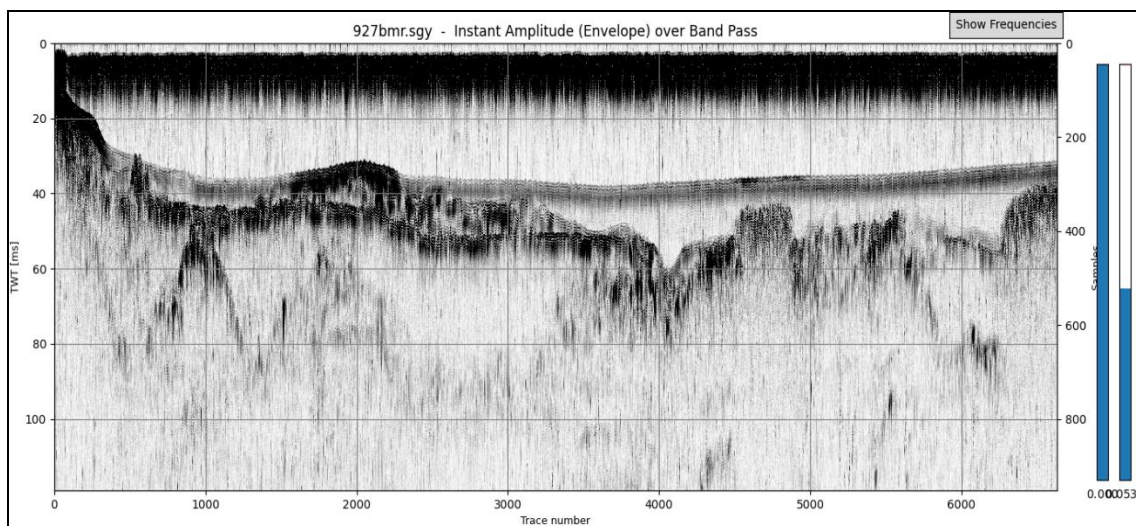


Figura 113 – Amplitude Instantânea aplicada sobre dados filtrados com Passa-Banda

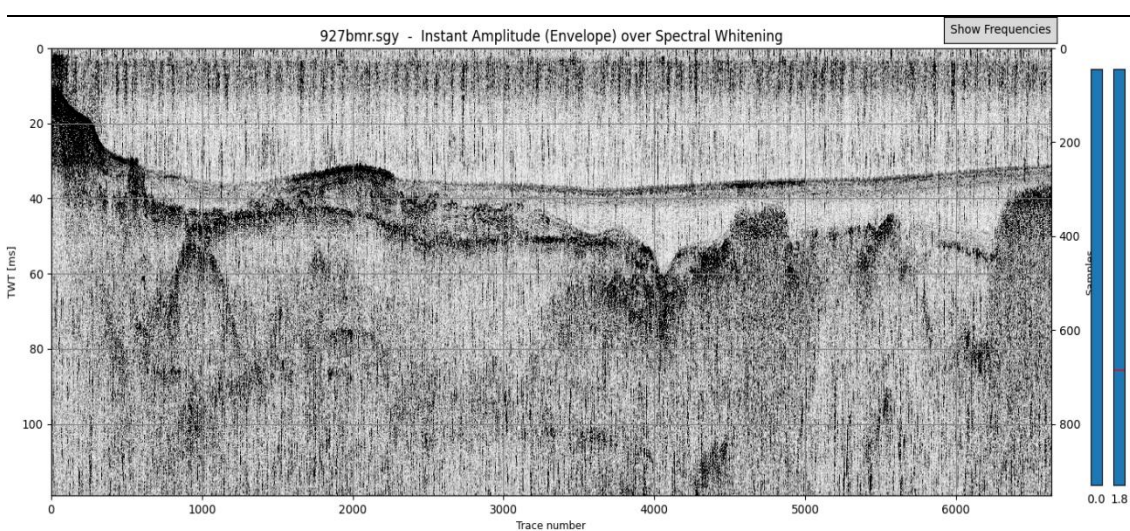


Figura 114 - Amplitude Instantânea aplicada sobre o Clareamento Espectral resultando em aumento de resolução.

A aplicação do filtro Wiener sobre os dados de Clareamento Espectral permitiram ainda alguma redução de ruído na imagem da seção sísmica (Figura 115).

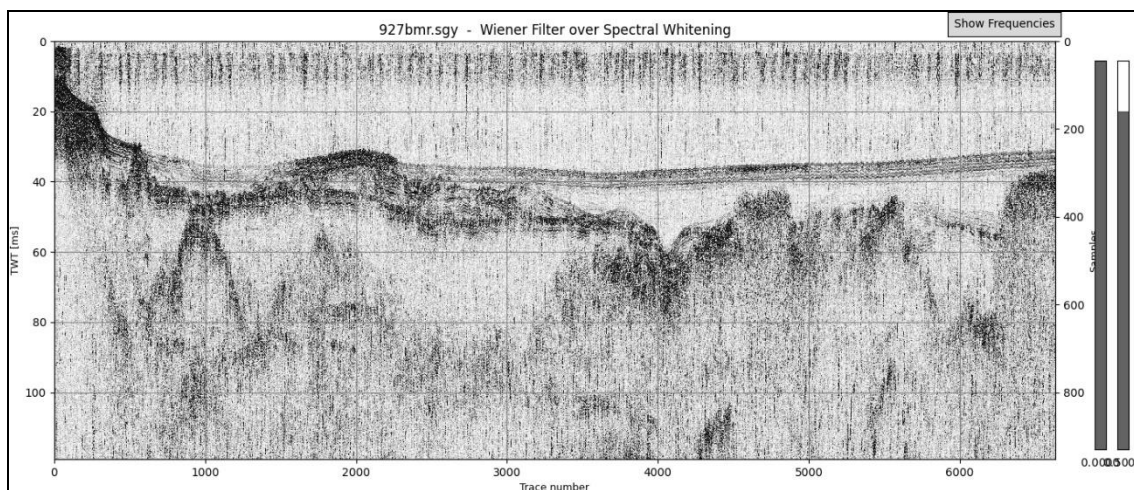


Figura 115 - Filtro *Wiener* aplicado sobre os dados do Clareamento Espectral mostrando redução de ruído em toda a imagem.

Por último, o filtro STALTA pode ser utilizado na visualização do topo dos refletores mais profundos, conforme a figura 116.

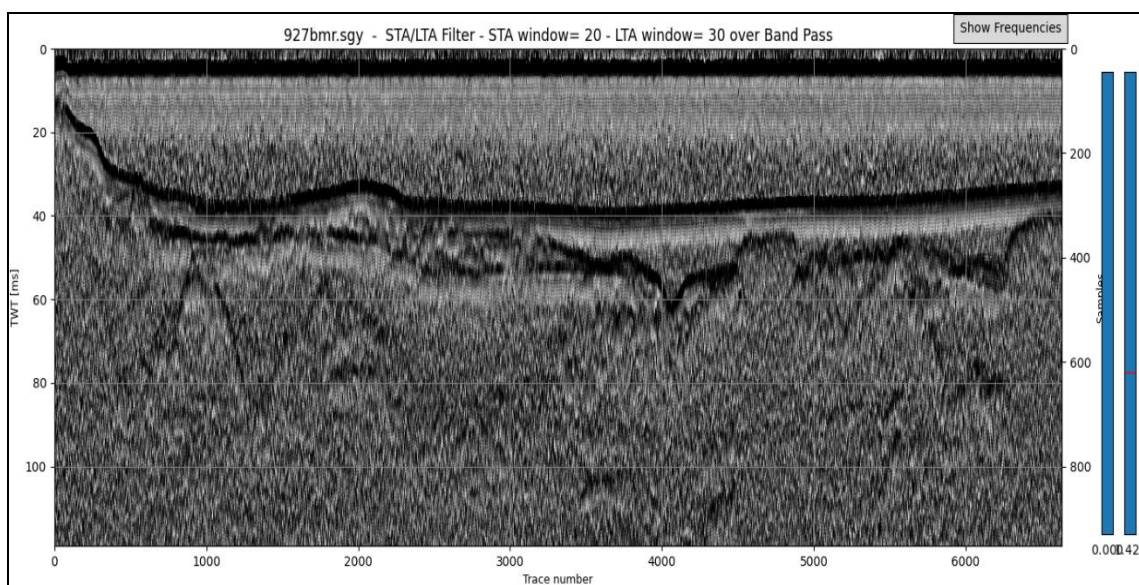


Figura 116 - Visualização de refletores profundos através do filtro STALTA.

5.11 - Botão **Help**

Para cada filtro ou transformada temos em sua respectiva janela, um botão com o símbolo “?” que permite o acesso a um texto explicativo sobre cada processo usado naquela opção do programa.

5.12 – NAVEGAÇÃO (NAVIGATION)

Esta opção permite que a navegação das linhas sísmicas seja executada em qualquer momento. Ele permite a seleção de uma ou várias linhas SEG-Y executando a extração de suas coordenadas e exportando esses dados em 2 arquivos de formato DXF e CSV.

No arquivo DXF teremos os *layers*:

NAME – contendo o nome da linha;

TRACE_INDEX – contendo o número dos traços intercalados de 5 x 5;

LINE – contendo a linha que passa por todas as coordenadas gravadas.

Na tabela CSV teremos:

REF – número do refletor digitalizado;

TRACE – Número do traço interpolado entre dois vértices consecutivos;

XCOORD – Coordenada UTM Leste (convertida);

YCOORD – Coordenada UTM Norte (convertida);

DEPTH – profundidade em metros de acordo com a velocidade do som escolhida;

INTENS – Valor da intensidade de cada profundidade interpolada.

5.13 – RESIZE SEG-Y

Permite a redução de tamanho dos arquivos SEG_Y através da seleção dos intervalos entre tempos (milissegundos) e entre traços. O arquivo resultante terá a extensão **_resize.sgy** acrescida ao nome do arquivo.

6 - *DISCUSSÃO DOS RESULTADOS*

De acordo com as características geofísicas dos dados fornecidos por estes tipos de equipamentos ressonantes (Chirp) ou impulsivos (Boomer), o fato de executarem uma perfilagem monocanal e por conseguinte possuírem o retorno vertical do sinal (ou zero-offset), não permite a obtenção de outros atributos decorrentes da redundância presente nos equipamentos multicanal, tais como a velocidade das ondas nos refletores sísmicos.

Tendo, porém, somente a amplitude e o tempo como dados de entrada, temos a frequência como subproduto útil na tentativa de aprimoramento do sinal sísmico retornado ao sensor. Este atributo foi usado como procedimento inicial no programa, em virtude de sua capacidade de filtrar os ruídos inerentes à aquisição sísmica. A capacidade de escolha das frequências a serem incrementadas ou suprimidas foi um fator relevante na inclusão desse tipo de filtro e está presente no filtro Passa-Banda.

Contudo, este procedimento envolve algum conhecimento das características do sinal sísmico retornante, fornecido pelo Analisador de Espectro. A vantagem do filtro Passa-Banda é a possibilidade imediata de observar os resultados da filtragem e a facilidade de alteração dos parâmetros da janela de frequências do filtro.

As frequências presentes nos dados podem também ser selecionadas em faixas de ocorrência de modo a permitir ajustes finos nas frequências presentes. O Equalizador Paramétrico permite executar esses ajustes tanto em ganho quanto em limites de frequência por faixa.

6.1 - Clareamento Espectral

Uma adição importante aos filtros de frequência foi testada com alguns bons resultados e diz respeito ao chamado Clareamento Espectral (Spectral Whitening). Esse método promove um “branqueamento” nas frequências, com o incremento de todas as frequências presentes e pode ser usado como destaque para as altas frequências presentes nos dados, que muitas vezes não são ressaltadas devido a sua baixa amplitude.

Esse filtro pode ser usado em conjunto com o filtro Passa-Banda. Em nossos testes a disponibilidade das duas filtragens permite a construção de alternativas aos filtros seguintes que atuam sobre a amplitude do sinal. Associada ao equalizador permite um ajuste mais preciso na busca de refletores de interesse em levantamentos específicos.

Assim, um clareamento espectral aliado a uma redução da intensidade de baixas frequências, pode ser útil na determinação dos primeiros refletores de subfundo. Três algoritmos de Clareamento Espectral estão disponíveis (*ZCA*, *PCA* e *Cholevsky*) sendo que o primeiro apresentou os melhores resultados (vide figuras 46, 47, 48, 69, 99, 114 e 115). Na figura 118 podemos observar um caso em que o Clareamento Espectral trouxe um ganho nos refletores mais profundos.

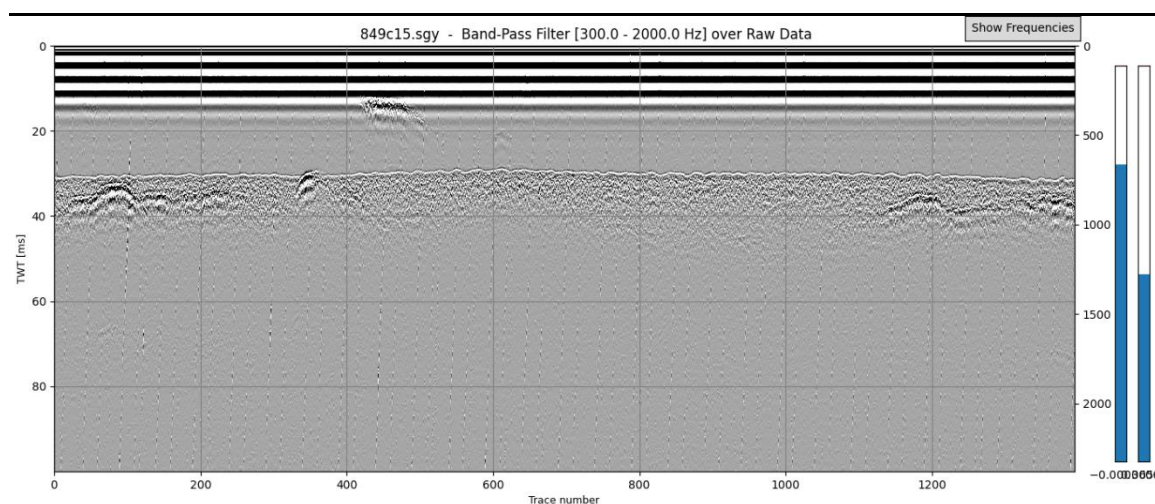


Figura 117 - Dados brutos filtrados com Passa-Banda

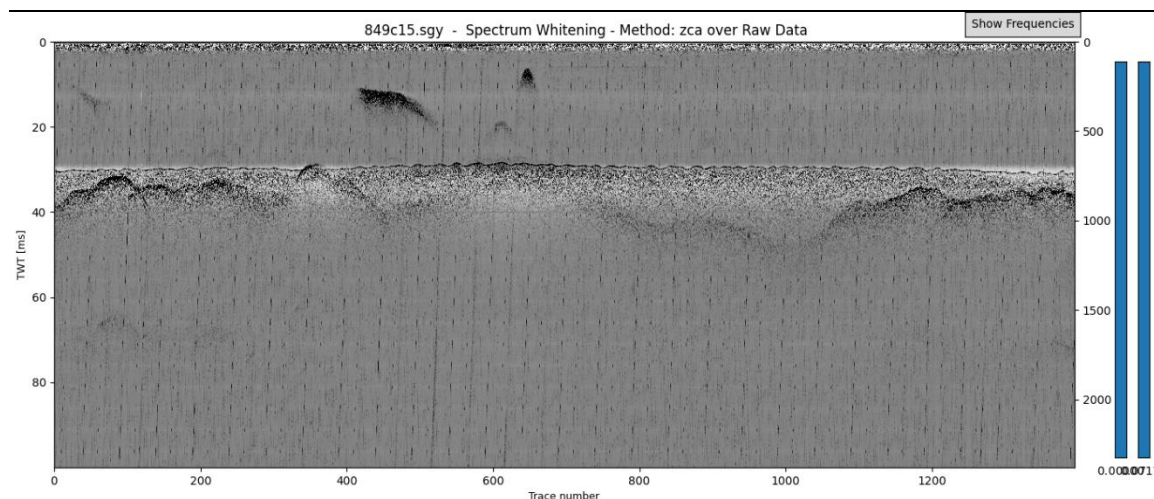


Figura 118 - Dados brutos com aplicação do Clareamento Espectral

6.2 - Filtro STA/LTA

Outro algoritmo de filtro que foi testado e apresentou resultados interessantes para certos casos especiais foi o STA/LTA (Short Time Average / Long Time Average) que é originalmente utilizado em estações de monitoramento de atividades sísmicas. Este algoritmo tenta separar um pulso sísmico do ruído ambiental através da comparação entre médias de curto e longo prazo no sinal sísmico.

Como desvantagem podemos incluir a baixa frequência das imagens resultantes e sua ausência de fase. Sua aplicação, contudo, pode ser útil em dados muito ruidosos ou para salientar feições em grande profundidade, conforme podemos observar no resultado da figura 119 a partir dos dados da figura 120.

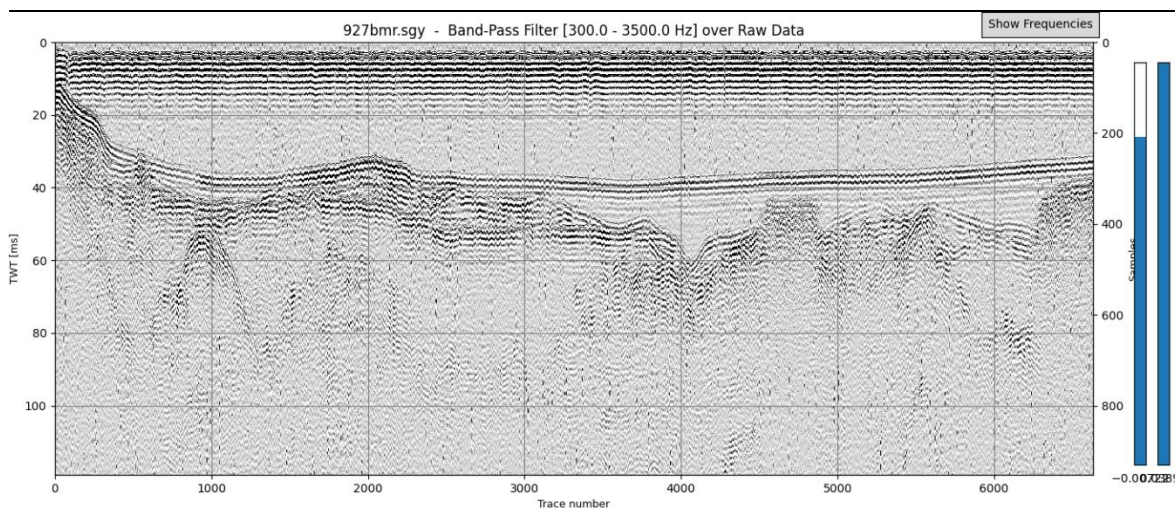


Figura 119 – Dados brutos filtrados por Passa-Banda

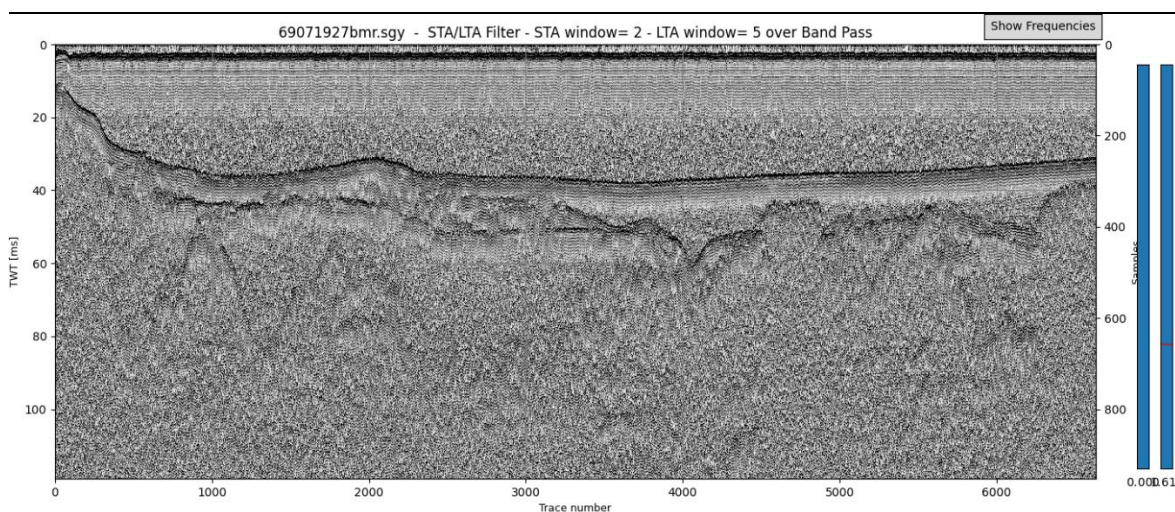


Figura 120 - Aplicação do filtro STA/LTA (janela 2 x 5) sobre os dados filtrados por Passa-Banda

A largura da janela de tempo entre STA e LTA altera o resultado, contudo ainda permite uma visualização importante, principalmente quando aplicada sobre filtros anteriores. A determinação da janela (definida em amostras sísmicas) é empírica, porém pode ser reavaliada rapidamente pois requer pouco processamento. A figura 16 ilustra o efeito sobre o sinal sísmico a partir de variações na relação entre as janelas STA e LTA.

6.3 – Convolução e Deconvolução dos dados

A aplicação dos preceitos da Convolução e Deconvolução sísmica foi discutida no item 3.12 e consiste em dois métodos distintos em função dos tipos de pulso sísmico: ressonante (*Chirp*) e impulsivo (*Boomer*).

6.3.1 - Convolução de dados *Chirp* com *Wavelet Ricker*

Um tipo de processamento dos dados de fonte *Chirp* pode ser efetuado através da Convolução desses dados com a wavelet Ricker (conhecida como Chapéu Mexicano) citada no item 3.13. Para isso é necessário que seja conhecida a largura do pulso emitido pelo sensor (**Pulse Width**) que pode ser obtida no manual do equipamento ou no Header do arquivo EBCDIC).

Métodos mais elaborados foram apresentados por [Quinn](#) (1998) e [Baradello](#) (2014) e comparados entre si por [Uge](#) (2018) porém não foram testados neste programa pela ausência dos algoritmos necessários.

O exemplo anterior das figuras 106 e 108 ilustra o resultado dessa Convolução. Podemos observar que o filtro Ricker produziu uma pequena melhoria na determinação de alguns refletores em relação aos dados brutos, mesmo com ausência de penetração sísmica decorrente do tipo de litologia do fundo.

6.3.2 - Deconvolução de Dados de Boomer

O pulso sísmico oriundo de fontes impulsivas é muito mais difícil de definir devido a sua irregularidade em formato e em tempo. O Boomer, por exemplo, produz seu pulso através da descarga de energia numa bobina que a transfere para um diafragma num movimento oscilatório amortecido. O Sparker produz uma centelha elétrica entre dois terminais.

Observando a seção sísmica podemos, em certos lugares, definir visualmente a largura do pulso retornado pela reflexão do fundo subaquático, em áreas preferencialmente planas conforme pode ser observado na figura 121.

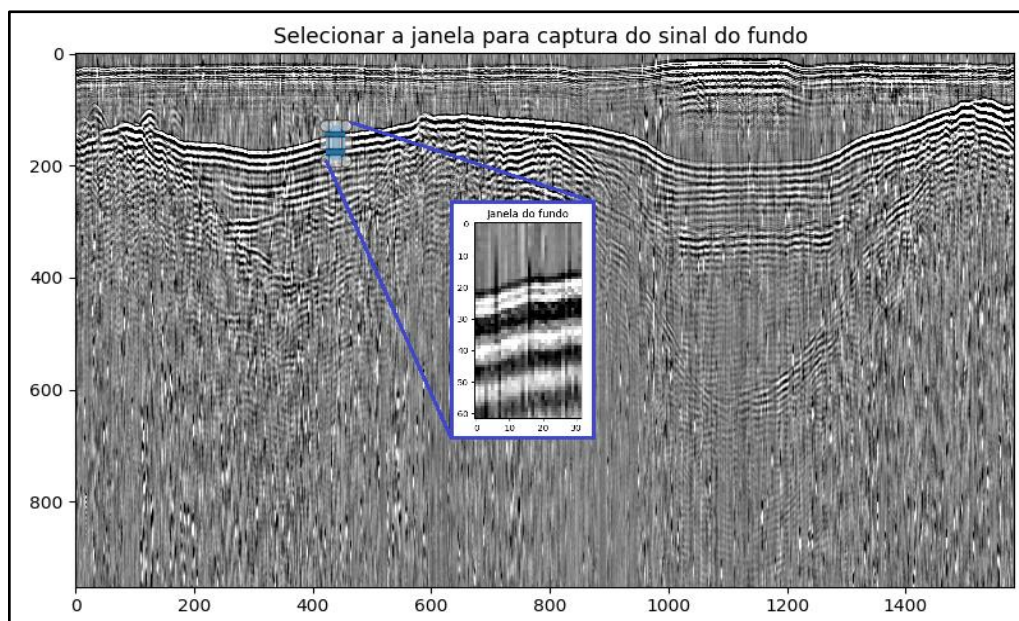


Figura 121 - Determinação dos limites do sinal da reflexão do fundo

Assim, definindo uma janela na imagem sísmica que contenha o início e o fim dessa reflexão, teremos um grupo de sinais sísmicos que representam a resposta do fundo a propagação das frequências emitidas pelo pulso do *Boomer* (Figura 122A).

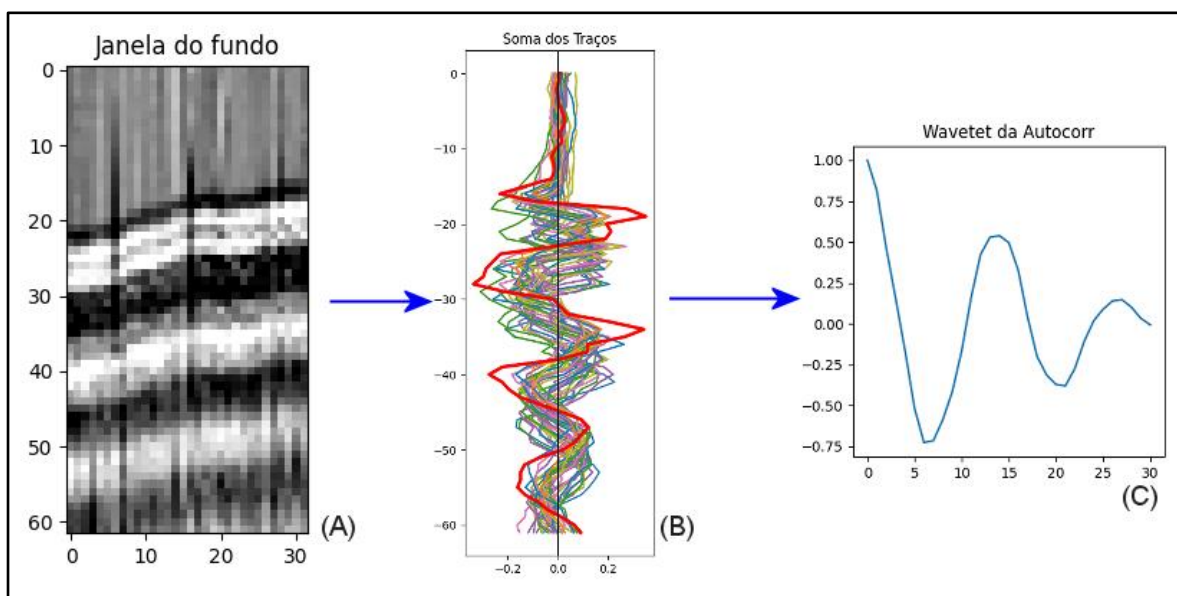


Figura 122 - Etapas de determinação da wavelet da autocorrelação a partir da reflexão do fundo

Neste exemplo, fazendo a soma dos 32 traços teremos um sinal médio que contém as amplitudes e as frequências retornadas e que pode ser utilizado para executar a autocorrelação (Figura 122B).

A forma do gráfico da autocorrelação (Figura 121C) vai depender dos dados do pulso sísmico do fundo capturados. Quanto mais próximo da autocorrelação ideal (Figura 80) for este gráfico melhor será sua atuação na Deconvolução feita na próxima etapa.

A Deconvolução da seção sísmica com o pulso do fundo produz uma melhoria na resposta de frequência, observável pela diminuição da espessura do topo dos refletores, produzindo imagens de maior resolução para o mapeamento de refletores próximos ao fundo (vide Figura 83 - Distribuição das Frequências antes e após a aplicação da Deconvolução).

6.4 - Resumo da Metodologia

Os filtros habitualmente utilizados nos softwares disponíveis no mercado (SonarWiz, Hypack etc) incluem o Passa-Banda, o AGC e o Envelope (Amplitude Instantânea) sendo estes obviamente os primeiros a serem incluídos no programa, porém pesquisas posteriores indicaram outros filtros que podem fornecer melhorias na imagem da seção sísmica: são eles o Clareamento Espectral, o filtro STA/LTA, a Convolução e a Deconvolução.

O primeiro (Clareamento Espectral) incrementa o conteúdo de frequências, mas com o custo da uniformização das amplitudes. O segundo (STA/LTA) permite extrair dados a maiores profundidades, mas ao custo da uniformização das amplitudes e das frequências. Os terceiro e quarto, permitem uma melhora na resolução sísmica, porém ao custo de certo empirismo na determinação dos parâmetros.

Uma alternativa a essas limitações é a utilização desses filtros em conjunto com os convencionais para incrementar feições geológicas específicas. Por exemplo, a utilização do filtro Passa-Banda sobre o Clareamento Espectral, pode ressaltar frequências de menor amplitude que podem ser posteriormente amplificadas através dos filtros de ganho (Paramétrico, AGC ou filtro Manual).

Em casos em que a aplicação da Amplitude Instantânea não fornece bons resultados, a aplicação do filtro STA/LTA pode ser eficiente. Por outro lado, uma

Convolução/Deconvolução eficiente sobre dados pré-filtrados por filtro Passa-Banda pode permitir um refinamento nos refletores sem um grande aumento no nível de ruído.

A essas opções podem ser ainda aplicados, ao final do processo, alguns filtros de imagem disponíveis que incrementam as altas frequências através de convoluções e derivações, tais como o filtro de *Laplace* e a Derivada-Y e outros que ressaltam baixas frequências como o filtro *Wiener*.

Embora possa parecer que a inclusão de vários filtros sobre os mesmos dados seja prejudicial à imagem sísmica, temos que considerar a limitação imposta pelos dados de sísmica monocanal que, por não possuírem redundância, não permitem as correções especiais que são feitas em dados de equipamentos multicanal, ficando limitados basicamente a conjunção amplitude-frequência-fase.

7 - CONCLUSÃO

Este estudo permitiu a construção de um código para o processamento e a interpretação dos dados de sísmica monocanal oriundos de fontes ressonantes e impulsivas, distribuído como software-livre. O objetivo foi tentar extrair alguma informação adicional sobre as camadas geológicas em subsuperfície usando métodos de processamento já existentes e através do manuseio de novos filtros e transformadas sobre estes dados.

A principal característica do sistema foi permitir ao usuário a possibilidade de utilização de várias alternativas de visualização da seção sísmica de modo a facilitar a interpretação dos refletores quando os dados obtidos durante a aquisição possuírem baixa de qualidade.

Estes tratamentos de imagem estão limitados às características inerentes do sistema sísmico monocanal. Porém foi possível a inclusão de filtros e transformações tanto no sinal quanto na imagem resultante que podem ser testadas em conjunto ou separadamente durante o processamento e a interpretação final dos refletores.

Foram testadas várias combinações diferentes entre filtros e transformadas e obtidas algumas melhorias em algumas seções sísmicas em relação à solução fornecida por softwares comerciais. Alguns filtros testados e incluídos neste sistema muitas vezes não constam em softwares comerciais que se limitam a algumas variações de uma apresentação padronizada. O Clareamento Espectral, o filtro STA/LTA, a Convolução e a Deconvolução são exemplos de filtros que podem acrescentar ou reforçar informações na imagem sísmica.

Finalmente a possibilidade de utilizar várias imagens oriundas das várias filtragens durante a interpretação dos horizontes de uma seção sísmica é outro diferencial importante na obtenção de melhores resultados no processo do mapeamento estratigráfico. Essa metodologia permite acrescentar e comparar informações entre os vários filtros durante a interpretação sísmica.

O código fonte em python está disponível em
https://github.com/cgallea/monochann_process

8 - REFERÊNCIAS

8.1 – Bibliotecas Python Utilizadas

8.1.1- NumPy

O Numpy foi criado por Oliphant [2010] e atualmente serve como o pacote básico de código aberto para computação científica usando a linguagem de programação Python. Oferece a seus usuários um poderoso objeto de matriz N-dimensional, funções sofisticadas de broadcasting, ferramentas para integração de código C/C++ e Fortran, bem como algoritmos numéricos para álgebra linear, transformadas de Fourier e geração de números aleatórios.

No programa, foi amplamente utilizado nas funções das outras bibliotecas que envolveram tratamento matemático dos sinais (Scipy, Pandas etc.).

8.1.2 - Matplotlib

Matplotlib é uma biblioteca de software para criação de gráficos e visualizações de dados em geral, feita para a linguagem de programação Python e sua extensão de matemática NumPy. Originalmente criada pelo biólogo e neurocientista americano John D. Hunter, a biblioteca oferece uma interface de programação orientada a objetos para incluir gráficos em aplicações usando toolkits de interface gráfica, como Tkinter, WxPython, Qt ou GTK.

No programa, foi utilizado na geração de gráficos e imagens dos dados sísmicos dentro das janelas construídas pelo Tkinter.

8.1.3 - SciPy

SciPy é uma biblioteca Open Source em linguagem Python que foi feita para matemáticos, cientistas e engenheiros. Sua biblioteca central é o NumPy que fornece uma manipulação conveniente e rápida de um array N-dimensional. A biblioteca SciPy foi desenvolvida para trabalhar com arrays NumPy, e fornece muitas rotinas amigáveis e bem eficientes como rotinas para integração numérica e otimização. A estrutura de dados básica usada pelo SciPy é uma matriz multidimensional fornecida pelo módulo NumPy. Scipy

fornece algumas funções para álgebra linear, transformadas de Fourier e geração de números aleatórios.

No programa, foi utilizado em várias etapas do tratamento, geração e transformação de sinais (Convolução, Deconvolução, Hilbert, Passa-Banda, etc)

8.1.4 - Tkinter

Baseada em Tcl/Tk, a Tkinter acompanha a distribuição oficial do interpretador Python. É a biblioteca padrão da linguagem Python para a criação de uma interface gráfica ao usuário e para isso utiliza blocos de construção denominados widgets. Os widgets podem ser janelas, botões, escalas, barra de rolagem, listbox, controles deslizantes, menu de opções, caixas de diálogos, avisos, seletor de cores etc.

No programa foi utilizado como interface gráfica baseada em janelas.

8.1.5 - Pandas

Pandas é uma biblioteca Python para manipulação e análise de dados. Em particular, oferece estruturas e operações para manipular tabelas numéricas e séries temporais. Algumas de suas características envolvem: alinhamento de dados e manipulação de dados ausentes, reformatação e pivoteamento de matrizes, divisão (*slicing*), indexação sofisticada e subconjunto de grandes grupos de dados, inserir, deletar, fundir ou juntar colunas. Possui conversor de frequência, estatística móvel, regressão linear e permite a filtração e limpeza de dados. Utiliza o objeto "DataFrame" para manipulação de dados, com indexação integrada.

No programa, foi utilizado no armazenamento dos dados obtidos na leitura do arquivo SEG-Y.

8.1.6 - Obspy

ObsPy é um projeto de código aberto dedicado a fornecer uma estrutura Python para processamento de dados sismológicos utilizando o armazenamento de dados em arrays n-dimensionais NumPy. O objetivo do projeto ObsPy é facilitar o desenvolvimento rápido de aplicativos para sismologia.

No programa foi utilizado em algoritmos de processamento de sinais (STA/LTA).

8.1.7 - DXFwrite

DXFwrite é uma biblioteca Python para criar desenhos no formato DXF Release 12 escrita por Manfred Moitzi.

No programa foi utilizado na geração de arquivos vetoriais de posicionamento das linhas sísmicas no formato dxf.

8.1.8 - UTM

UTM é um Conversor UTM-WGS84 bidirecional para python escrita por Tobias Bieniek

No programa, foi utilizado para a conversão de sistemas geodésicos.

8.1.9 - SeiSee

Seisee - versão 2.22.2 (2013) - é um programa gratuito para inspeção e visualização de arquivos SEG-Y - Autor: Sergey Pavlukhin.

No programa, foi utilizado na inspeção de dados sísmicos.

9 – BIBLIOGRAFIA

- Allen, R. L.; Mills, .W. (2004) - Signal analysis: time, frequency, scale and structure – J. Wiley & Sons 2004
- Baradello, L. 2014 – An improved processing sequence for uncorrelated chirp sonar data – Marine Geophysical Researches 35:337-344
- Baradello, L.; Accaino, F. 2013 – Vibroseis deconvolution: A comparison of pre and post correlation vibroseis deconvolution data in real noisy data – Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale
- Baradello, L; Battaglia, F; Vesnaver, A. - Fast method to transform chirp envelope data into pseudo-seismic data - Marine Geophysical Research (2021) 42:14
- Barbosa, B. – 2017 – Redução de ruído em sinais acústicos de explosões através da aplicação do filtro de Wiener – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
- Bousfield, M.M.; Cordioli, J.A.; Barrault. C.F.G – Estimativa de pulso para a Deconvolução de traços sísmicos – Acústica e Vibrações – no. 49 – dezembro 2017
- Bousfield, M.M. 2017 – Deconvolução de traços sísmicos: análise, aplicação e estimativa de pulso – Dissertação de Mestrado – UFSC – Florianópolis – SC
- Box, G.; Jenkins,G.; Reinsel, G. – 1994 – Time Series Analysis – John Wiley & Sons - 2008
- Bull, J.M.; Quinn, R.; Dix, J.K. 1998 – Reflection coefficient calculation from marine high resolution seismic reflection (chirp) data and application to an archaeological case study – Marine Geophysical Researches 20: 1-11 1998
- Caress, D.W. 2009 – Some comments on the signal processing used by chirp subbottom profilers – Monterey Bay Aquarium Research Institute
- Cecilio, A.B. 2019 – Processamento sísmico e análise de atributos em dados monocanal de alta resolução na baía de Bransfield, Antártica. - Universidade Federal Fluminense (UFF)/ Lagemar Niterói - RJ

Ceddia Silva, D. 2020 – Aplicação de bottom tracker e swell filter em sísmica monocanal de alta resolução (.seg e .sgy) - script em linguagem python em formato Jupyter Notebook, com ilustrações – gentilmente cedido.

Claudino, C.- Método de Empilhamento espectral – Tese – DOT - Universidade Federal Fluminense – UFF - 2020

Dal Forno, G.; Gasperini, L. - ChirCor: A new tool for generating synthetic chirp-sonar seismograms - - Computers & Geosciences 34 (2008) 104-114 - Elsevier

Davis, N. 2017 - An introduction to filters - <https://www.allaboutcircuits.com>

Dey, A. K. - An Analysis of Seismic Wavelet Estimation - Thesis -Department of geology and geophysics - Calgary - Alberta - Canada - 1999

Dondurur, D. - Acquisition and processing of marine seismic data - Elsevier - 2018

Gasperini, L.; Stanghelini, G. - SeisPhro: An interactive computer program for processing and interpretation of high-resolution seismic reflection profiles - Computers & Geosciences 35 (2009) 1497-1507 – Elsevier

Gomes, M.P; Vital, H.; Macedo, J.W.P. – Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de plataforma continental – Revista Brasileira de Geofísica – SBGf – 2011

Kim, S.; Park, H. 2022 - Optimizing Source Wavelets Extracted from the Chirp Sub-Bottom Profiler Using an Adaptive Filter with Machine Learning - Journal of Marine Science and Engineering 10, 449

Kong, Q; Siauw, T.; Bayen, A. 2020 - Python programming and numerical methods - Elsevier

Lyons, R. 2004 - Understanding Digital Signal Processing - Pearson (2nd Edition) - Prentice Hall

Marino, I. K.; Santos, M.A.C.; Silva, C.G. – Processing High Resolution, Shallow Seismic Profiles, Guanabara Bay – Rio de Janeiro – Revista Brasileira de Geofísica - SBGf - 2013

Park, C.; Kim, M.; Shin, J.; Shin, H.; Jeong, J.B.– Study on acoustic impedance conversion using an optimal chirplet analyzed in chirp SBP raw data - Marine Geophysical Research (2019) 40:385–393

Pacific Northwest Seismic Network - Spectrogram - Sonic Signals em:

<https://pnsn.org/spectrograms/what-is-a-spectrogram>

Park C., Kim W., Shin J., Kim H., Jeong J.B. - Study on acoustic impedance conversion using an optimal chirplet analyzed in chirp SBP raw data - Marine Geophysical Research (2019) 40:385–393

Purves, S 2014 - Phase and the Hilbert Transform - The leading Edge - October 2014

Quinn, R; Bull, J.M.; Dix, J.K. 1998 – Optimal processing of marine high-resolution seismic reflection (chirp) data – Marine Geophysical Research 20: 13-20, 1998

Robertson, N (2018) - https://www.dsprelated.com/blogs-1/nf/Neil_Robertson.php

Rodrigues, M.C. 2019 - Processamento de dados sísmicos para a detecção de possíveis reservatórios não convencionais de gás na Bacia do Recôncavo - Dissertação de Mestrado - UFBA - Salvador - Bahia

Santos, I.D. – High Resolution Marine Seismic Data Processing Using Single-Channel Sparker System - SBGf - 2021

Souza, L. A. P.; Gandolfo, O.C.B. 2021 – Geofísica aplicada a Geologia de Engenharia e Meio Ambiente – Manual de Boas Práticas – ABGE – Associação Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental – SP

Souza, L.A.P. 2006 – Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. – Tese de Doutorado – Instituto Oceanográfico – USP

Simm, R.; Bacon, M. 2014 – Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook – Cambridge University Press

Stanghelini, G.; Carrara, G. - Segy-change: The swiss army knife for the SEG-Y files - SoftwareX - (2017) 42-47 - Elsevier

Teixeira, B.P. – Processamento sísmico aplicado a dados de alta resolução para caracterização da feição geológica do fundo oceânico ao largo de Cabo Frio _RJ – Monografia Bacharel Geofísica – UFF – 2013

Trnkoczy, A. 1998 – Understanding & setting STA/LTA trigger algorithm parameters for the K2 – Application note #41

Uge, M. A.; Alp, H. – 2018 – Two different processing methods for Chirp seismic data – New Trends in Geophysics and Engineering – International Symposium – NTGE 2018

Valimaki, V.; Reiss, J. - All about audio equalization: Solutions and Frontiers -Applied Sciences - 2016.

Ylmaz, O. 2001 – Seismic Data Analysis Vol I – Society of Exploration Geophysicists

Zhenkun, L. - Estimating time-of-flight-superimposed ultrasonic echo signal through envelope - Engineering Materials Science - 2014