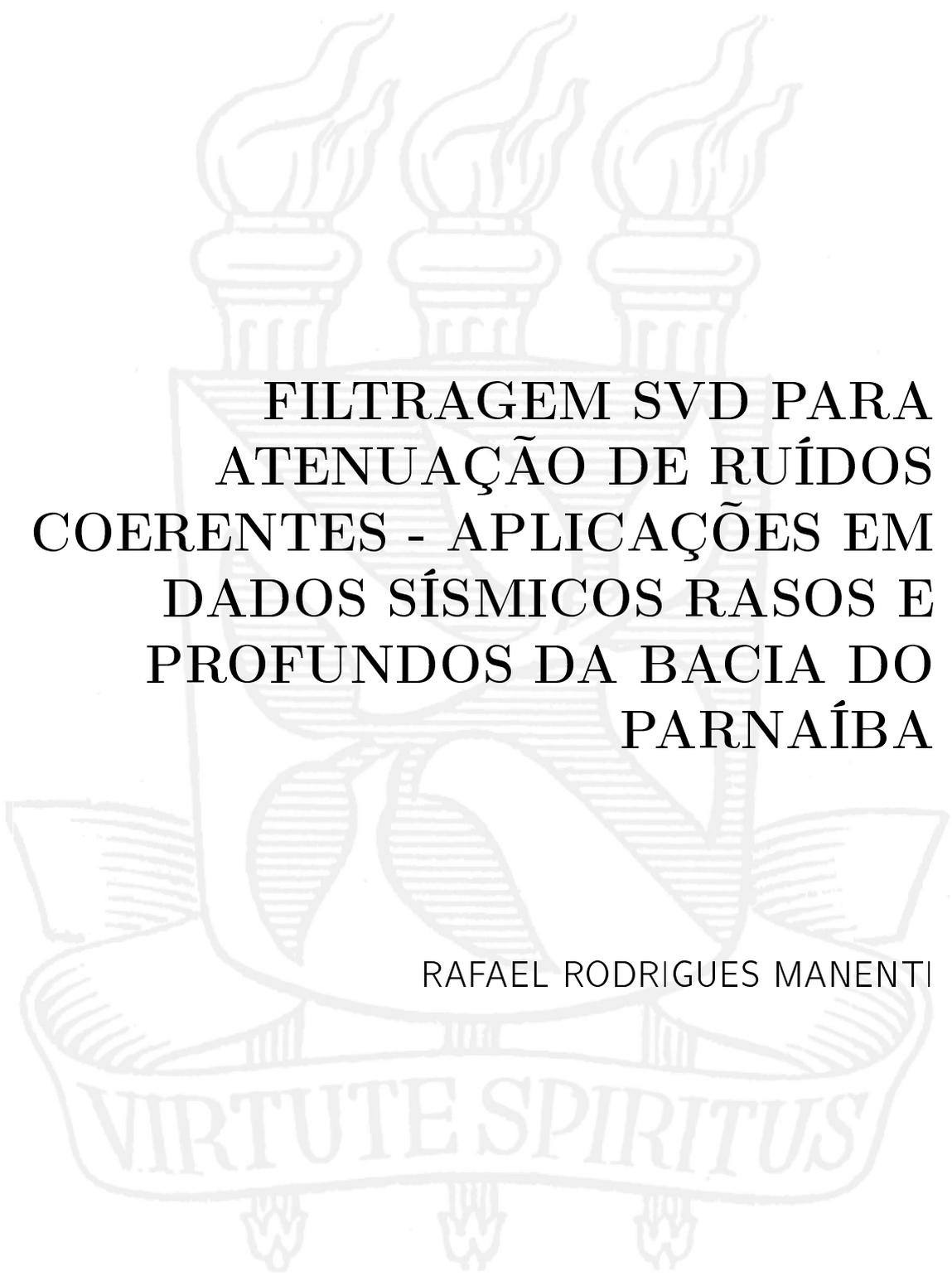


UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Curso de Pós-graduação em Geofísica

TESE DE DOUTORADO



FILTRAGEM SVD PARA
ATENUAÇÃO DE RUÍDOS
COERENTES - APLICAÇÕES EM
DADOS SÍSMICOS RASOS E
PROFUNDOS DA BACIA DO
PARNAÍBA

RAFAEL RODRIGUES MANENTI

SALVADOR – BAHIA
ABRIL – 2018

Filtragem SVD para atenuação de ruídos coerentes - Aplicações em dados sísmicos rasos e profundos da Bacia do Parnaíba

por

RAFAEL RODRIGUES MANENTI

Geofísico (Universidade Federal da Bahia – 2013)

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

TESE DE DOUTORADO

Submetida em satisfação final dos requisitos ao grau de

DOUTOR EM CIÊNCIAS

EM

GEOFÍSICA

ao

Conselho Acadêmico de Ensino

da

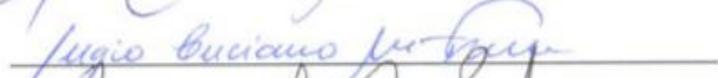
Universidade Federal da Bahia

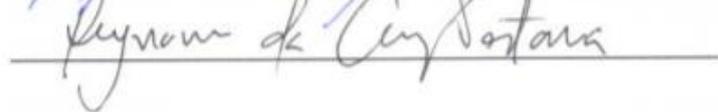
Comissão Examinadora


_____ Dr. Milton José Porsani (orientador)


_____ Dr. Amin Bassrei


_____ Dr. Paulo Eduardo Miranda Cunha


_____ Dr. Sérgio Luciano Moura Freire


_____ Dr. Reynam da Cruz Pestana

Defesa realizada em 09 de Abril de 2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA), com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Manenti, Rafael Rodrigues
Filtragem SVD para atenuação de ruídos coerentes - aplicações em dados sísmicos rasos e profundos da Bacia do Parnaíba / Rafael Rodrigues Manenti. -- Salvador, 2018.
98 f. : il

Orientador: Milton José Porsani.
Tese (Doutorado - Geofísica Aplicada) -- Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências - Departamento de Geofísica, 2018.

1. Filtragem SVD. 2. Atenuação de ruídos. 3. Processamento sísmico. 4. Dados de longo registro. 5. Bacia do Parnaíba. I. Porsani, Milton José. II. Título.

Siga o coelho branco.

Resumo

O processamento de dados sísmicos terrestre é sempre um grande desafio para a indústria, em parte por problemas relacionados à estática e também pelo alto nível de ruído presente. Neste trabalho, o processamento foi dividido em duas partes. A primeira trata-se da filtragem da parte da rasa da bacia, buscando uma atenuação de ruído coerente e aumento da resolução. Na segunda parte, temos como foco o mapeamento e melhor definição da Descontinuidade de Moho. Para tal, um fluxograma diferente do anterior foi aplicado, visando manter apenas a baixa frequência e aumentar a correlação lateral.

Como produto deste trabalho, desenvolvemos três novas técnicas para filtragem de ruídos: Balanceamento Espectral baseado no método SSA; Filtragem SSA Recursiva e Adaptativa no domínio f-x; e o SVD adaptativo.

- O balanceamento espectral utilizando o SSA (SSA-SW - *SSA spectral whitening*) dispensa o uso da transformada de Fourier para a decomposição de traços com diferentes conteúdos de frequência a partir de um traço original. Este método possui a propriedade de ser de fase zero, não modificando a fase do sinal, além de não inserir artefatos (fenômeno de Gibbs) no dado filtrado. O SSA possui como *core* o SVD para a obtenção dos traços decompostos.
- O método SSA Recursivo e Adaptativo no domínio f-x (RA-SSA-fx) é aplicado no dado após a transformada de Fourier, passando o mesmo do domínio t-x (tempo \times distância) para o domínio f-x (frequência \times distância). Desta forma, é aplicado o SSA, tendo como dado de entrada as amplitudes dos traços correspondentes para dada amostra, e conseqüentemente, para dada frequência. Esta filtragem é aplicada de maneira recursiva, ou seja, o resultado da primeira filtragem é a entrada da segunda, e assim sucessivamente. Após o número de recursões ser atingido, passa-se para a próxima amostra. Ao término de todas as amostras, o dado é transformado para o domínio t-x com a Transformada de Fourier inversa.
- O SVD adaptativo utiliza um operador móvel de tamanho a ser escolhido pelo usuário o qual varre a matriz de dados filtrando cada amostra. Pelo fato de o operador filtrar

amplitudes mais de uma vez, é construída em paralelo uma matriz de contagem, a qual é atualizada a cada operação. Ao fim do processo de varredura do dado, é feita uma média, tendo como peso os elementos da matriz de contagem, onde teremos como saída o sismograma filtrado final. Esta metodologia pode ser aplicada em dados tanto no domínio t-x quando no domínio f-x.

A Bacia do Parnaíba está localizada no nordeste do Brasil e a sua formação começou no Arqueano. Apesar de ser uma das maiores bacias na região norte da América do Sul, por estar longe dos grandes centros de tecnologia e produção, a Bacia do Parnaíba não é tão bem explorada quando comparada com outras bacias do Brasil. Em um projeto envolvendo a *Global Geophysical Services Incorporated* e a *BP Energy* do Brasil, um grande dado 2D foi adquirido, cruzando toda a bacia, de Leste a Oeste, partindo do Ceará e chegando ao estado do Pará. Os parâmetros de aquisição foram bastante refinados, especialmente para um dado desta escala, tudo isso visando por uma exploração mais detalhada da bacia. Para este trabalho, nós utilizamos esta linha regional do Parnaíba, cedida pela *BP Energy* do Brasil/Projeto PABIP. Esta transecta possui por volta de 1.400 km de extensão, adquirido ao longo de rodovias, e possui 20 segundos de tempo de registro. O objetivo principal é melhorar a descrição de refletores profundos, abaixo da bacia.

Para a parte rasa da bacia, foi aplicado o SSA-SW a fim de aumentar a amplitude do conteúdo de frequências mais elevadas, enquanto preserva a banda mais baixa, tudo isso visando atenuar ruídos lineares e melhorar a resolução temporal do dado. Resultados numéricos utilizando os dados da Bacia do Parnaíba, delimitados nos primeiros 5 segundos de registro, ilustram o aumento da resolução e da continuidade lateral dos refletores em seções empilhadas.

Para a parte profunda, nos deparamos com um tipo de processamento focado para um aumento da razão sinal/ruído, especialmente para eventos profundos, como a Descontinuidade de Moho. Como as estruturas de interesse estão localizadas entre 8 e 15 segundos de registro, apenas as bandas de baixa frequência são relevantes. Com este propósito, nós utilizamos o RA-SSA no domínio t-x e domínio f-x, para aumentar a razão sinal/ruído, além de aplicarmos por fim o SVD adaptativo nos domínios t-x e f-x.

Apesar da aplicação de um processamento bastante robusto, ainda não é possível mapearmos a Moho em toda a extensão do dado. Isto se dá possivelmente pela falta de contraste de propriedades físicas entre a crosta inferior e o manto superior, ou um gradiente suave de variação nas propriedades, não gerando um horizonte refletivo, e por consequência tornando a Descontinuidade de Moho transparente em determinada porção da linha sísmica. Além disso, em trabalhos recentes foram mapeadas diversas presenças de intrusões de diabásio em

na Bacia do Parnaíba. A presença de soleiras de material ígneo pode ser uma causa, ou pelo menos um fator contribuinte para a dificuldade do registro e imageamento de refletores profundos na bacia. A partir da utilização dos dados sísmicos e mapa de anomalia magnética, foi possível ver uma relação entre a presença de corpos ígneos e a transparência da Moho.

Abstract

Land data seismic processing has always been a task of great challenge for the industry, in part because of statics related problems and also because of the level of noise usually present in this kind of data. In this thesis, the data processing was divided into two parts. The first one deals with the basin's shallower part filtering, focusing on the attenuation of coherent noise and the enhancement of data resolution. On the second part, we focus on the mapping and better characterization of the Moho Discontinuity. For that, another kind of processing was applied, in order to maintain only the low frequency content of the data and lateral coherence.

As a product of this thesis, we have developed three new techniques for noise filtering: spectral whitening, based on SSA method; recursive and adaptive SSA filtering in the f-x domain; and the adaptive SVD.

- The SSA spectral whitening dismisses the use of the Fourier transform for different frequency content trace decomposition. This method have the property of being a zero phase method, preserving the phase of signal, and to not insert artifacts (Gibbs' Phenomena) in the filtered data. The SSA has as its core the SVD to obtain the decomposed traces.
- The recursive and adaptive SSA in f-x domain (RA-SSA-fx) is applied after our data is transformed to f-x domain with Fourier. In this way, the SSA is applied for each sample corresponding to a different frequency of the data. This filtering is applied recursively and after the number of recursions is achieved, the method selects the next sample to filter. After the whole data is processed, it's applied the inverse Fourier transform.
- The adaptive SVD uses a moving operator which its size can be defined by the user. This window goes over the data matrix filtering each sample. Because this operator filter amplitudes more than once, in parallel it built a counting matrix which is updated in each operation. By the end of the process, an average is made, having as weights

the elements of the counting matrix, and as result of this average we have the filtered data. This methodology can be applied in each t-x or f-x domain.

The Parnaíba basin is located in the Northeast of Brazil and its formation started in the Archaean. Although it's one of the largest basins of the northern part of South America, for being far from technological centers, the Parnaíba basin wasn't that much explored, when compared to other basins from Brazil. In a project involving Global Geophysical Services Incorporated and BP Energy do Brasil, a great 2D seismic data was acquired, crossing the whole basin, from East to West, from Ceará state to Pará state. Acquisition parameters were quite refined, specially for a data of this scale, aiming for a more detailed exploration of the basin. For this paper we used a seismic transect from Parnaíba basin, granted by BP Energy do Brasil/PABIP project. This transect is 1400 km long, acquired along roads, and has a 20 seconds two-way time of recording. The main objective was to enhance the deep reflectors, below the Parnaíba basin.

For the shallower part, we applied the SSA-SW in order to enhance the amplitude of more elevated frequency content while preserving the lower frequency content. This process is made focusing on attenuating linear noise and enhance time resolution of the signal. Numerical results using seismic data of the Parnaíba basin illustrates the enhancement in time resolution and lateral continuity of the reflections of stacked sections.

For the deeper part, we had to deal with a much more challenging processing workflow. With that in mind, it was necessary to develop a powerful filtering flow, in order to enhance the signal-to-noise ratio, specially for deep structures, such as the Moho Discontinuity. Since the structures of interest are located between 8 and 15 seconds two-way time, only low frequency component of the data is relevant. For that matter, we have used the RA-SSA in the t-x and f-x domain and the adaptive SVD also in t-x and f-x domain to enhance the signal-to-noise ratio.

Although we have applied a very robust filtering process in our data, it is still not possible to map the Moho in all of its extension. This happens because of the lack of physical properties contrast between the lower crust and upper mantle, or a very smooth gradient of properties variation. These possibilities may not result in a reflective horizon, making the Moho Discontinuity transparent in determined portions of the data. Beyond that, in recent papers there were mapped several diabase intrusions in the Parnaíba Basin. The presence of dykes and sills of igneous material can be one of the causes, or at least a factor, of the difficulty in registering and mapping deep reflectors in the basin. With the use of seismic data and a map of magnetic anomalies it was possible to see a relation between the presence of igneous bodies and the Moho transparency.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumo | 4 |
| Abstract | 7 |
| Índice | 9 |
| Índice de Figuras | 11 |
| Introdução | 18 |
| 1 Filtragens baseadas na decomposição SVD | 21 |
| 1.1 Método <i>Singular Value Decomposition</i> (SVD) | 21 |
| 1.2 Método <i>Singular Spectral Analysis</i> (SSA) | 22 |
| 1.2.1 Propriedade de Fase Zero da decomposição SSA | 27 |
| 2 Aplicações dos Métodos SVD e SSA para filtragens de ruídos coerentes | 29 |
| 2.1 Balanceamento espectral baseado no SSA (SSA-SW) | 29 |
| 2.2 SSA na forma recursiva e adaptativa | 34 |
| 2.2.1 SSA recursivo e adaptativo no domínio t-x (RA-SSA-tx) | 35 |
| 2.2.2 SSA recursivo adaptativo no domínio f-x (RA-SSA-fx) | 36 |
| 2.3 Filtragem SVD adaptativa | 44 |
| 2.3.1 SVD Adaptativo no domínio t-x | 44 |
| 2.3.2 SVD Adaptativo no domínio f-x | 47 |
| 3 Resultados do processamento sísmico da Bacia do Parnaíba | 50 |
| 3.1 Bacia do Parnaíba - Considerações gerais | 50 |
| 3.1.1 Localização | 50 |
| 3.1.2 Principais sequências | 51 |
| 3.2 Processamento da linha regional RL001 | 52 |
| 3.2.1 Parte rasa | 54 |
| 3.2.2 Parte profunda | 67 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.3 | Discussão de resultados | 69 |
| 3.2.4 | Descontinuidade de Moho | 84 |
| 4 | Conclusões | 87 |
| | Agradecimentos | 89 |
| | Referências Bibliográficas | 91 |

Índice de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Ilustração mostrando a organização da matriz \mathbf{D} a partir da replicação do vetor \mathbf{d} . A partir da decomposição SVD, teremos as autoimagens que somadas, reconstituem \mathbf{D}_N | 23 |
| 1.2 | Aplicação do operador $\mathbf{J}\{.\}$ para a obtenção do traço \mathbf{d} . No exemplo ilustrado, é possível reconstituirmos o traço original. | 24 |
| 1.3 | Aplicação do operador $\mathbf{J}\{.\}$ em cada uma das autoimagens \mathbf{D}_{tau} , obtendo, desta forma um autotraço \mathbf{d}_τ | 25 |
| 1.4 | Resultado do SSA em um traço sísmico. De 1 a 7, os traços representando as diferentes bandas de frequência, em ordem crescente. Traço 8 corresponde à soma dos traços 1 a 7. Traço 9 ao traço original que foi decomposto. Nota-se a similaridade entre os traços 6 e 7, responsáveis pelo conteúdo de alta frequência do traço, com amplitudes praticamente nulas em comparação com as amplitudes das frequências mais baixas. | 26 |
| 1.5 | Espectro de amplitude médio dos traços representados na Figura 1.4. Em azul, vermelho, preto, verde, laranja, cinza e lilás os espectros dos traços de índice 1 a 7, respectivamente. | 27 |
| 2.1 | Resultado do balanceamento espectral utilizando SSA para separação de frequências (SW-SSA). Após aplicação de AGC nos traços da Figura 1.4, notamos uma amplitude relativa menor da baixa frequência, em comparação com as demais frequências. Os traços 6 e 7, antes aparentemente zerados, mostram agora uma amplitude considerável. | 32 |
| 2.2 | Espectro de amplitude médio dos traços representados na Figura 2.2. Em azul, vermelho, preto, verde, laranja, cinza e lilás os espectros dos traços de índice 1 a 7, respectivamente. É bastante evidente o aumento considerável das amplitudes, especialmente dos traços 6 e 7. Após 60 Hz, nota-se também amplitudes correspondentes a ruído. | 33 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.3 | Família de tiro comum da Bacia do Tacutu: (a) tiro original; (b) tiro filtrado utilizando o SSA; (c) tiro filtrado utilizando o balanceamento espectral tradicional. | 34 |
| 2.4 | Espectro de amplitude médio mostrando em preto o espectro do dado bruto, em azul o espectro de amplitude do dado filtrado, utilizando a metodologia baseada no SVD, e em vermelho o dado filtrado utilizando o balanceamento espectral tradicional. | 35 |
| 2.5 | Esquema mostrando a recursão do algoritmo SSA para extração da frequência média do dado. Este esquema mostra que frequência central (segunda autoimagem) da recursão anterior serve de dado de entrada para a recursão seguinte, e assim por diante. | 37 |
| 2.6 | Fluxograma descrevendo os passos do algoritmo SSA para obtenção de diferentes bandas de frequência no domínio do tempo. | 38 |
| 2.7 | Conjunto de tiros mostrando a recursão SSA para a extração da frequência média, seguindo o esquema descrito na Figura 2.5. (a) - tiro original; (b) - resultado da primeira recursão; (c) - resultado da segunda recursão; (d) - resultado da terceira recursão. É possível notar a baixa frequência sendo atenuada a cada recursão, preservando somente a frequência média. | 39 |
| 2.8 | Espectro de amplitude médio normalizado referente à Figura 2.7. Notamos que a cada recursão, o pico de amplitude se desloca mais ao centro da banda de frequência. Se mais recursões fossem feitas, mais estreito e mais ao centro estaria o pico de amplitude. | 39 |
| 2.9 | Esquema mostrando a recursão do algoritmo SSA para extração da mais baixa frequência do dado. Este esquema mostra que a baixa frequência (primeira autoimagem) da recursão anterior serve de dado de entrada para a recursão seguinte, e assim por diante. | 40 |
| 2.10 | Filtragem de uma família de <i>offset</i> comum: (a) família de <i>offset</i> comum original; (b) resultado após aplicação do SSA adaptativo no domínio do tempo, correspondendo à baixa frequência; (c) resíduo entre (a) e (b) correspondendo à alta frequência do dado. | 41 |
| 2.11 | Espectro de amplitude médio correspondente à Figura 2.10: original em azul; baixa frequência em vermelho (filtrado); e alta frequência em verde (resíduo). | 42 |
| 2.12 | Filtragem de uma família de <i>offset</i> comum: (a) família de <i>offset</i> comum original; (b) resultado após aplicação do SSA adaptativo no domínio da frequência, correspondendo à baixa frequência; (c) resíduo entre (a) e (b) correspondendo à alta frequência do dado. | 43 |

- 2.13 Espectro de amplitude médio correspondente à Figura 2.12: original em azul; baixa frequência em vermelho (filtrado); e alta frequência em verde (resíduo). 43
- 2.14 Filtragem de uma família de *offset* comum: (a) família de *offset* comum original; (b) resultado após aplicação do RI-SSA no domínio do tempo; (c) resultado do RI-SSA no domínio da frequência usando (b) como dado de entrada; (d) resíduo entre resultado apresentado em (c) e dado original apresentado em (a). 44
- 2.15 Filtragem de uma família de tiro comum: (a) família de tiro comum original; (b) resultado após aplicação do RI-SSA no domínio do tempo; (c) resultado do RI-SSA no domínio da frequência usando (b) como dado de entrada; (d) resíduo entre resultado apresentado em (c) e dado original apresentado em (a). 45
- 2.16 Espectros de amplitude média relacionados com as Figuras 2.14 e 2.15: original em azul; resíduo entre filtragem RI-SSA no domínio do tempo e original em vermelho; resultado da filtragem RI-SSA em preto; resíduo entre filtragem RI-SSA no domínio da frequência e seu dado de entrada (filtragem no domínio do tempo) em laranja; e resultado do RI-SSA no domínio da frequência utilizando a filtragem anterior como dado de entrada. 46
- 2.17 Exemplo da matriz de contagem \mathbf{C} de dimensão 8×8 , utilizando um operador de filtragem, representado pelo quadrado vermelho, de ordem 3×3 . Nesta imagem vemos quatro momentos: (a) início da filtragem, onde cada ponto do operador foi filtrado uma vez; (b) passo seguinte a (a), onde algumas amplitudes já são filtradas duas vezes; (c) após a filtragem da primeira linha inteira, o operador passa para a próxima linha, reiniciando a contagem; (d) após a passagem do operador em todo o dado, podemos notar como a porção central do dado foi filtrada mais vezes em comparação com outras regiões do dado. 47
- 2.18 Comparação de um intervalo do tiro 39 da Bacia do Tacutu, entre 2,5 e 3,5 segundos. A figura é subdividida em: (a) - tiro após a filtragem SW-SSA; (b) - filtragem SVD adaptativo no domínio t-x utilizando operador 3×5 ; (c) - filtragem utilizando operador 5×3 48
- 2.19 Comparação de um intervalo do tiro 39 da Bacia do Tacutu, entre 2,5 e 3,5 segundos. A figura é subdividida em: (a) - tiro após a filtragem SW-SSA; (b) - filtragem SVD adaptativo no domínio fx utilizando operador 3×5 ; (c) - filtragem utilizando operador 5×3 49
- 3.1 Mapa da Bacia do Parnaíba com a transecta regional disposta sobre o mapa. 54

| | | |
|------|---|----|
| 3.2 | Passos do fluxograma de processamento aplicado para a parte rasa da Bacia do Parnaíba. | 55 |
| 3.3 | Família de tiro comum da Bacia do Parnaíba, cortado em 3 segundos: (a) tiro original; (b) tiro filtrado utilizando o ST-SVD; (c) utilizando o método de balanceamento espectral tradicional. | 58 |
| 3.4 | Espectro de amplitude médio mostrando em preto o espectro do dado bruto, em azul o espectro de amplitude do dado filtrado pela metodologia proposta e em vermelho filtrado pelo método de balanceamento espectral tradicional. | 58 |
| 3.5 | Seção empilhada original da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638. | 59 |
| 3.6 | Seção empilhada filtrada da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638. Ruídos lineares, como o <i>ground roll</i> foi atenuado e a resolução do dado apresenta melhoras. | 60 |
| 3.7 | Seção empilhada original da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638, utilizando o atributo de relevo de amplitude. Com este modo de visualização, é mais evidente o ruído linear presente e a baixa resolução do dado. | 61 |
| 3.8 | Seção empilhada filtrada da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638, utilizando o atributo de visualização de relevo de amplitude. Com este modo de visualização, vemos com maior facilidade o ruído atenuado e o aumento da resolução do dado. | 62 |
| 3.9 | Seção empilhada original focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. | 63 |
| 3.10 | Seção empilhada filtrada focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. Nesta figura é possível ver com maior facilidade o aumento da resolução e o aumento da continuidade lateral do dado, quando comparada com a Figura 3.9. | 64 |
| 3.11 | Seção empilhada original focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. Nesta figura temos a utilização do atributo de visualização de amplitude em relevo. | 65 |
| 3.12 | Seção empilhada filtrada focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. Nesta figura é possível ver com maior facilidade o aumento da resolução e o aumento da continuidade lateral do dado, quando comparada com a Figura 3.11. Nesta figura temos a utilização do atributo de visualização de amplitude de relevo, para uma mais fácil visualização dos benefícios da filtragem. | 66 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.13 | Detalhes da seção empilhada original e filtrada com o método SSA-SW. Em (a) e (c) temos um detalhe da seção empilhada original. Em (b) e (d) é mostrado um detalhe na mesma localidade de (a) e (c) após a filtragem SSA-SW. Podemos notar nos trechos filtrados um aumento da coerência lateral do dado, além de um ganho na resolução das reflexões. Notamos também nas figuras filtradas uma aparição de novas reflexões que não apareciam anteriormente. | 67 |
| 3.14 | Passos do fluxograma de processamento aplicado neste trabalho. | 69 |
| 3.15 | Família CMP mostrando a comparação do dado filtrado: (a) família CMP original; (b) resíduo entre (a) e (c); (c) resultado após a filtragem proposta, utilizando RI-ST-SVD no domínio do tempo, seguido pelo RI-SSA no domínio da frequência. | 73 |
| 3.16 | Espectro de amplitude médio relacionado aos dados apresentados na Figura 3.15: Original, em azul; resíduo entre dado original e filtrado, em vermelho; resultado do método de filtragem proposto, em preto. | 74 |
| 3.17 | Seção empilhada original em amplitude. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado. | 75 |
| 3.18 | Seção empilhada original em amplitude em relevo. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado. | 75 |
| 3.19 | Linha regional empilhada após a aplicação da filtragem proposta, em amplitude. É possível notar uma maior continuidade lateral, especialmente em eventos mais profundos, foco da filtragem. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado. | 76 |
| 3.20 | Linha regional filtrada após aplicação da filtragem proposta, em amplitude em relevo. Uma maior continuidade lateral é vista, especialmente na região mais profunda do dado. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado. | 76 |
| 3.21 | Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada bruta, em amplitude. | 77 |
| 3.22 | Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada bruta, em amplitude em relevo. | 77 |
| 3.23 | Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada filtrada, em amplitude. O grande espaço vazio que havia entre os dois grandes refletores de Moho agora se mostra conectado. | 78 |

- 3.24 Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada filtrada, em amplitude em relevo. O grande espaço vazio que havia entre os dois grandes refletores de Moho agora se mostra conectado. 78
- 3.25 Transecta regional após interpretação. No bloco mais a oeste, em verde claro, temos o supergrupo Araguaia. Na borda do supergrupo Araguaia nós temos o AFZ na parte Leste do bloco. Falhas dúcteis também separam o supergrupo Araguaia do Cráton Amazônico (verde escuro). No centro do dado, temos o bloco crustal do Parnaíba, em rosa. Neste bloco temos a presença do MCR. A ideia é que uma zona de falhas entre o MCR e o manto foi o caminho para intrusão magmática, formando a camada marcada em roxo. Na parte mais a Leste da transecta, temos a província da Borborema, em azul claro, com a TBSZ na parte mais a oeste deste bloco. Uma grande zona de transcorrência dúctil foi mapeada neste bloco. Em vermelho, abaixo de todos os blocos, o manto. 79
- 3.26 Parte 1 da linha regional filtrada, em amplitude, com intervalo CMP de 2007 a 20.000 representando o cráton Amazônico. Nesta figura, vemos mais detalhes sobre a continuidade da Moho, iniciando em 13 segundos. 80
- 3.27 Parte 1 da linha regional filtrada, em amplitude em relevo, com intervalo CMP de 2007 a 20.000 representando o cráton Amazônico. Nesta figura, vemos mais detalhes sobre a continuidade da Moho, iniciando em 13 segundos. 80
- 3.28 Parte 2 da linha regional filtrada, em amplitude, com intervalo CMP de 32.000 a 50.000. Esta zona representa o Refletor Central Crustal, do inglês *Mid-Crustal Reflector* (MCR). 81
- 3.29 Parte 2 da linha regional filtrada, em amplitude em relevo, com intervalo CMP de 32.000 a 50.000. Esta zona representa o Refletor Central Crustal, do inglês *Mid-Crustal Reflector* (MCR). 81
- 3.30 Parte 3 da linha regional filtrada, em amplitude, com intervalo de CMP de 57.000 a 82.167. Esta zona representa a Província da Borborema, que se inicia na Zona de Transcorrência Trans-Brasiliana, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ). 82
- 3.31 Parte 3 da linha regional filtrada, em amplitude em relevo, com intervalo de CMP de 57.000 a 82.167. Esta zona representa a Província da Borborema, que se inicia na Zona de Transcorrência Trans-Brasiliana, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ). 82

-
- 3.32 Mapa da Bacia do Parnaíba modificado de Mocitaiba et al. (2017) com afloramentos e anomalias magnéticas correspondentes às formações Sardinha e Mosquito. Em preto a posição da linha regional em relação ao mapa, com os números de CMP referenciados no mapa. 83
- 3.33 Linha regional filtrada inteira em amplitude em relevo, com as zonas das anomalias magnéticas e afloramentos destacadas. Em verde, a Formação Mosquito, e em azul, a Formação Sardinha. 83

Introdução

Ruído pode ser encontrado em todo dado sísmico, e isso ocorre devido a diversos fatores: ambiental; mal-funcionamento de equipamento; e *background*. Em geral, estes são classificados em dois tipos: aleatório, que ocorre sem um padrão predominante; e coerente, o qual tem um certo padrão. O ruído tende a mascarar as reflexões presentes no dado, diminuindo a razão sinal/ruído, tornando diversos processos do fluxograma de processamento, como a análise de velocidade, mais difíceis e reduzindo a qualidade da seção empilhada (Yilmaz, 2001). Enquanto o tipo aleatório é geralmente simples de se atenuar, com filtros de passa banda, o tipo coerente, como por exemplo o *ground roll*, se mostra bastante resiliente, fazendo-se necessário utilizar outras técnicas para a atenuação do mesmo. Além dos ruídos supracitados, também é comum problemas relacionados a estática.

O *ground roll* é um evento linear presente em dados terrestres, tendo como principais características a baixa velocidade, baixa frequência e alta amplitude, e é causado devido a um tipo particular de ondas Rayleigh. Por causa da sua natureza dispersiva, o *ground roll* mascara reflexões, principalmente na região central do sismograma, prejudicando a qualidade final do dado (Claerbout, 1983; Saatçilar e Canitez, 1988).

Ao longo dos anos, diversos autores desenvolveram novos filtros para atenuar este tipo de ruído. Uma das técnicas mais simples e mais empregadas é a filtragem f-k, a qual consiste em aplicar a transformada de Fourier 2D para obter o espectro f-k. Após sua obtenção, a área correspondente ao *ground roll* é atenuada utilizando um filtro passa banda 2D (Embree et al., 1963; Wiggins, 1966).

Por causa da propriedade não estacionária das ondas sísmicas, a transformada de Fourier não é capaz de precisar tempo e frequência, já que as funções seno e cosseno utilizadas para obter a transformada são funções infinitas no tempo (Graps, 1995). Por isso, uma análise multirresolução foi implementada para obter uma maior eficiência na análise do sinal (Welland, 2003). A transformada Wavelet utiliza funções de suporte compacto e frequência bem definida. Esta técnica é capaz de analisar baixa e alta frequência na mesma transformada, sem fazer o uso de transformadas janeladas (Mallat, 1989). É possível então usar esta técnica

mais robusta para a atenuação de ruídos coerentes, como *ground roll* e *swell noise* (Deighan e Watts, 1997; de Matos et al., 2002; Neelamani et al., 2008; Wang et al., 2013; de Almeida et al., 2017).

Explorando a baixa frequência do *ground roll*, a derivada direcional foi outro filtro bem utilizado para atenuação de ruídos. Este filtro possui um operador de derivada aplicado em diferentes direções por todo o dado, atenuando especialmente ruídos lineares com baixo conteúdo de frequência (Melo et al., 2009; Manenti, 2013; Santos, 2014).

Outros filtros foram desenvolvidos utilizando diferentes propriedades do sinal sísmico, como a coerência espacial. A decomposição em valores singulares, do inglês *singular value decomposition* (SVD) foi utilizado por diversos autores como uma filtragem de eventos sub-verticais coerentes, como o *ground roll* (Freire e Ulrych, 1988; Golub e van Loan, 1996; Chiu e Howell, 2008; Porsani et al., 2009; Porsani et al., 2010; Manenti e Porsani, 2013). Este método é aplicado utilizando uma janela móvel que coleta um subgrupo de traços e então extrai a primeira autoimagem. O efeito deste filtro é um aprimoramento da continuidade das reflexões sísmicas.

A atenuação de ruído coerente sempre foi um tópico bastante presente em pesquisas na área de processamento sísmico, e diversos métodos foram propostos para atingir este objetivo. Em especial, métodos utilizando a transformada de Fourier são bastante tradicionais. Este incluem a filtragem f-k, filtragem f-k em janela, filtros de frequência, entre outros (Yilmaz, 2001; Rosa, 2010). Apesar de serem de certa forma eficientes, estes métodos requerem uma intensa adaptação ao dado e possuem um histórico de deixarem artefatos indesejados (Askari e Siahkoohi, 2008).

Outro filtro bastante útil e comum é o balanceamento espectral, utilizado para atenuação de ruído de baixa frequência e aumento de resolução. Seu método convencional utiliza a transformada de Fourier para separar o dado em diferentes bandas de frequência a fim de que as amplitudes das diferentes bandas possam ser aumentada separadamente (Yilmaz, 2001).

Neste trabalho são apresentadas três novas técnicas para atenuação de ruídos coerentes e aprimoramento da continuidade lateral de reflexões: balanceamento espectral utilizando o método *singular spectral analysis* - SSA - (do inglês *SSA spectral whitening* - SSA-SW); SSA recursivo e adaptativo no domínio f-x (*recursive and adaptive SSA in f-x domain* - RA-SSA-fx); e o SVD adaptativo.

No primeiro capítulo, fazemos uma revisão dos métodos SVD e SSA, mostrando suas principais propriedades e aplicações (Golyandina e Zhigljavsky, 2013; Oropeza e Sacchi, 2011;

Cheng e Sacchi, 2016; Manenti e Porsani, 2016). Ao aplicarmos o SSA em dados sísmicos no domínio do tempo, é possível decompor traços em bandas de frequência diferentes, sem fazer o uso da transformada de Fourier. Silva (2015) utilizou este método de forma análoga a um filtro de corta baixa, para a atenuação de ruídos de baixa frequência.

No segundo capítulo são apresentados os métodos propostos nesta tese, como dito acima, além de métodos já desenvolvidos, mas que foram utilizados durante o fluxo de processamento dos dados da Bacia do Parnaíba. Com o método SSA SW, Manenti et al. (2018) apresentaram resultados prévios mostrando sua eficiência para atenuação de ruídos coerentes e aumento da resolução do sinal. O RA SSA é apresentado com aplicações tanto no domínio tempo espaço (RA SSA tx) quanto no domínio frequência espaço (RA SSA fx). Manenti et al. (2017) utilizaram o RA-SSA conservando apenas a primeira autoimagem a fim de recuperar a baixa frequência do dado (RA SSA tx) e para a melhora de estruturas profundas (RA SSA fx), enquanto Porsani et al. (2017) utilizaram este mesmo processo para a atenuação de ruídos coerentes. Além disso é apresentado o SVD adaptativo aplicado em ambos os domínios t x e f x. Esta técnica utiliza um operador móvel que varre todo o dado, e em paralelo uma matriz de contagem é atualizada. Após toda a varredura da matriz, é feita uma ponderação das amplitudes, tendo como resultado o dado filtrado.

No terceiro capítulo temos uma breve descrição da Bacia do Parnaíba e seus parâmetros de aquisição. Esta bacia foi escolhida como objeto de estudo pelo Projeto de Análise da Bacia Intracratônica do Parnaíba (PABIP), financiado pela BP *Energy* do Brasil, por ser uma bacia não muito bem explorada e com grande potencial de gás natural. Neste capítulo também são apresentados os resultados da metodologia apresentada no capítulo anterior, bem como discussões dos resultados e conjecturas sobre a Descontinuidade de Moho.

1

Filtragens baseadas na decomposição SVD

1.1 Método *Singular Value Decomposition* (SVD)

O SVD é uma técnica que consiste em decompor uma matriz qualquer \mathbf{D} , de ordem $M \times N$ em três matrizes diferentes, como mostrado na equação a seguir:

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T . \quad (1.1)$$

\mathbf{U} e \mathbf{V} são matrizes ortonormais (ortogonais normalizadas), as quais correspondem a autovetores de $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$ e $\mathbf{D}^T\mathbf{D}$, respectivamente, enquanto $\mathbf{\Sigma}$ corresponde a matriz diagonal formada com os valores singulares de \mathbf{D} , organizados em ordem decrescente ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N \geq 0$) (Golub e van Loan, 1996). Esta equação também pode ser escrita na forma de um somatório:

$$\mathbf{D}_N = \sum_{i=0}^{N-1} \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T , \quad (1.2)$$

onde \mathbf{u}_i é o i -ésimo autovetor de \mathbf{U} , \mathbf{v}_i é o i -ésimo autovetor de \mathbf{V} , e σ_i é o i -ésimo valor singular de $\mathbf{\Sigma}$, e N é o número de valores singulares obtidos da matriz original \mathbf{D} . Se todos os N valores forem utilizados no somatório, a matriz \mathbf{D} é totalmente reconstruída.

A forma reduzida SVD da matriz \mathbf{D}_N pode ser representada como (Golub e van Loan, 1996),

$$\mathbf{D}_N = \sum_{\tau=0}^{N-1} \sigma_{\tau} \mathbf{u}_{\tau} \mathbf{v}_{\tau}^T = \sum_{\tau=0}^{N-1} \mathbf{D}_{\tau} , \quad (1.3)$$

onde $\mathbf{D}_\tau = \sigma_\tau \mathbf{u}_\tau \mathbf{v}_\tau^T$ representa a autoimagem de índice τ associada à decomposição SVD de ordem N .

A decomposição em valores singulares é bastante explorada na geofísica, possuindo diversas aplicações. Freire (1986) utilizou o SVD para a separação de ondas ascendentes e descendentes em perfis sísmicos verticais (VSP), atenuação de ruídos coerentes no domínio $\tau - p$ e múltiplas.

Porsani et al. (2009), aproveitando a propriedade de preservação de coerência lateral, aplicou o SVD em forma de uma janela adaptativa para a atenuação de ruídos coerentes, como o *ground-roll*, em sismogramas. Para esta aplicação, era necessário que o dado estivesse corrigido de *normal moveout*. Posteriormente, Porsani et al. (2010) aplicou o SVD em seções empilhadas, aumentando a continuidade dos refletores para um rastreamento automático mais eficiente.

Além disso, o SVD também foi aplicado, desta vez em um operador em cruz, para a melhora de qualidade do *semblance* (Mojica et al., 2011), aumentando a qualidade da análise de velocidades.

Como forma de não ter como obrigatoriedade saber o campo de velocidades previamente para o dado de entrada já estar corrigido de *normal moveout*, Manenti e Porsani (2013) fizeram o uso do SVD aliado com a transformada radial, a qual reorganiza o sismograma de uma forma que os eventos lineares se tornam subverticais e os eventos horizontais e sub-horizontais são conservados, aumentando a eficácia do SVD e dispensando a correção de NMO prévia. Desta forma, ao invés de uma janela adaptativa, o filtro era aplicado como um setor adaptativo em todo o dado.

1.2 Método *Singular Spectral Analysis* (SSA)

Como visto anteriormente, o SVD é uma técnica capaz de decompor uma matriz em autoimagens (Golub e van Loan, 1996).

A partir de Silva et al. (2016), preenche-se a matriz \mathbf{D} com apenas um traço sísmico $\mathbf{d} = (d_0, \dots, d_{M-1})^T$ replicado com deslocamento de uma amostra no tempo, formando a matriz \mathbf{D}_N de ordem $(M + N - 1)$, como mostra a equação 1.4 e a Figura 1.1.

$$\mathbf{D}_N^T = \begin{bmatrix} d_0 \dots d_{M-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_0 \dots d_{M-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_0 \dots d_{M-1} \end{bmatrix}. \quad (1.4)$$

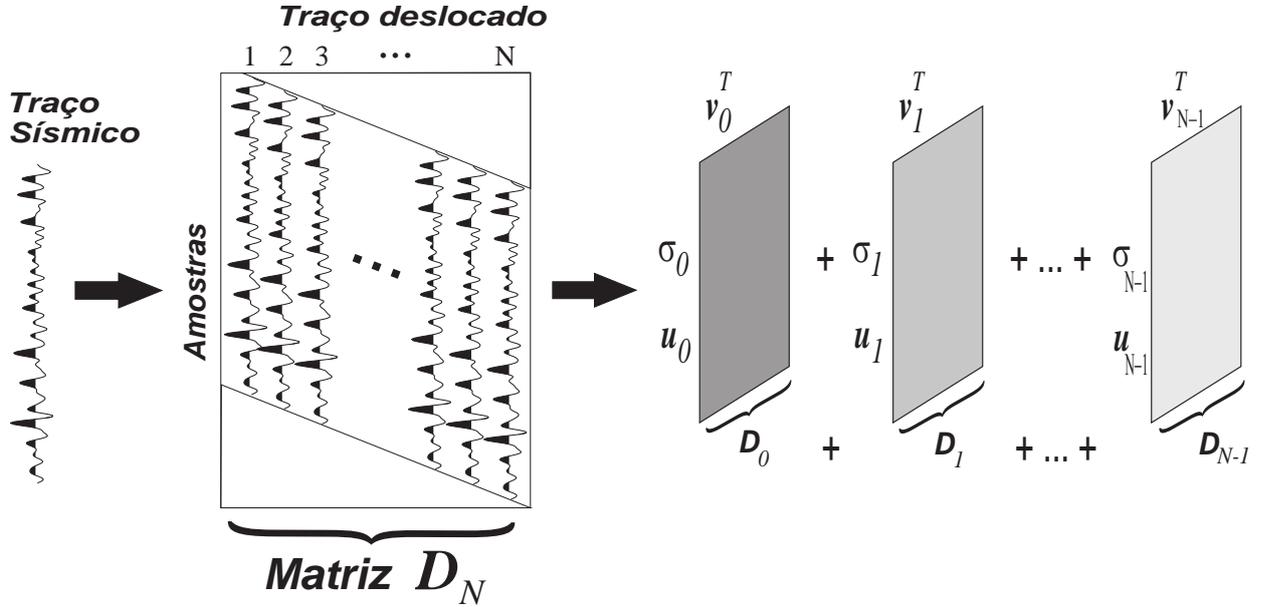


Figura 1.1: Ilustração mostrando a organização da matriz \mathbf{D} a partir da replicação do vetor \mathbf{d} . A partir da decomposição SVD, teremos as autoimagens que somadas, reconstituem \mathbf{D}_N .

Um operador linear definido como $\mathbf{J}\{.\}$, aplicado à matriz \mathbf{D}_N (Silva et al., 2016), tem como objetivo:

- (i) remover *linear moveout*;
- (ii) empilhar as colunas da matriz, e;
- (iii) calcular a média do resultado.

Este operador pode ser visto na Figura 1.2. Nota-se que ao aplicar o operador à matriz \mathbf{D}_N , obtém-se o traço original, assim como na equação 1.5.

$$\mathbf{J}\{\mathbf{D}_N\} = \mathbf{d}. \quad (1.5)$$

Utilizando a decomposição SVD (equação 1.2) em conjunto com o operador $\mathbf{J}\{.\}$, chega-se à equação:

$$\mathbf{J}\{\mathbf{D}_N\} = \sum_{\tau=0}^{N-1} \mathbf{J}\{\sigma_\tau \mathbf{u}_\tau \mathbf{v}_\tau^T\} = \sum_{\tau=0}^{N-1} \mathbf{J}\{\mathbf{D}_\tau\} = \sum_{\tau=0}^{N-1} \mathbf{d}_\tau = \mathbf{d}. \quad (1.6)$$

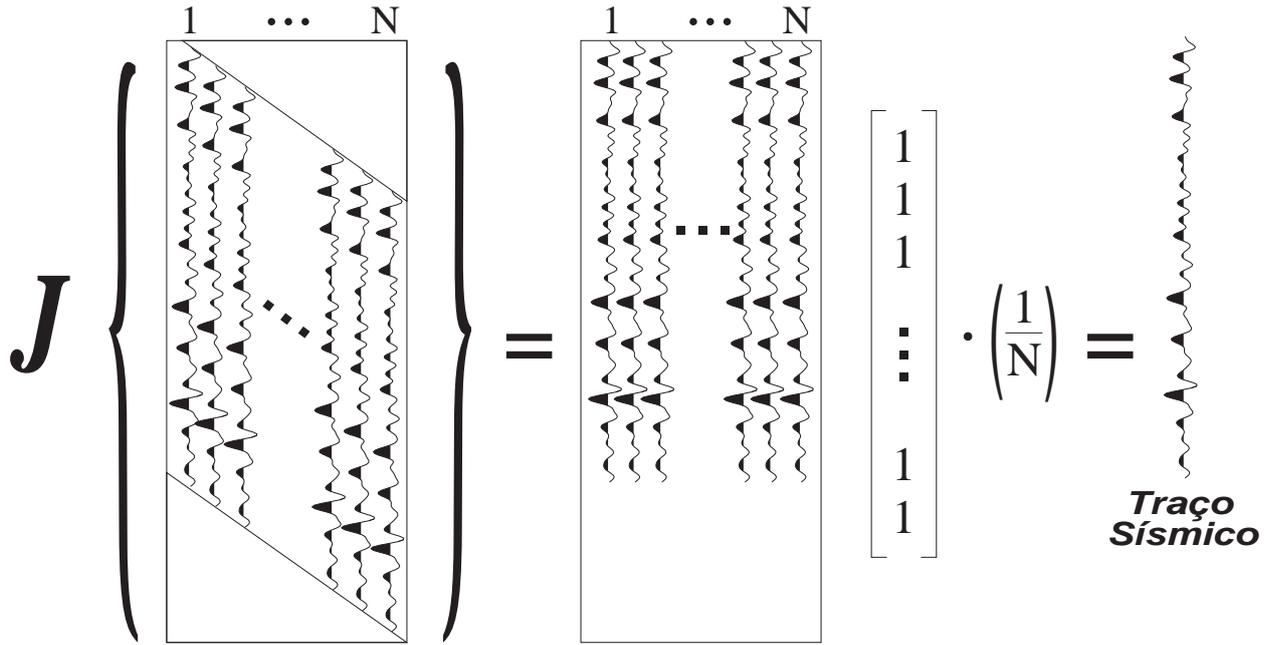


Figura 1.2: Aplicação do operador $J\{.\}$ para a obtenção do traço \mathbf{d} . No exemplo ilustrado, é possível reconstituirmos o traço original.

A equação 1.6 mostra a decomposição SVD de um traço sísmico em termos de N autotraços, \mathbf{d}_τ . Esta decomposição é originalmente aplicada no domínio f-x, para cada frequência. Este processo é chamado de *singular spectral analysis* (SSA) (Golyandina e Zhigljavsky, 2013). Para este trabalho, além de aplicarmos no domínio f-x, também adaptaremos o método para a aplicação no domínio t-x. Uma forma ilustrativa de observarmos o que a equação 1.6 demonstra é a Figura 1.3. Podemos ver que após a aplicação do SVD na matriz \mathbf{D}_N , é possível aplicar o operador $J\{.\}$ em cada uma das autoimagens \mathbf{D}_τ , e assim, obter um autotraço \mathbf{d}_τ .

Como demonstração deste processo de decomposição do traço em diferentes bandas de frequência (com operações no domínio do tempo), podemos analisar a Figura 1.4. Para este exemplo, um traço sísmico retirado do dado terrestre L5090 da Bacia do Tacutu foi decomposto em sete diferentes bandas de frequência. Entre os índices 1 e 7, podemos ver o resultado da decomposição do traço, com o número do índice sendo o índice do valor singular utilizado na restituição do traço. Nota-se um aumento da frequência conforme o aumento do índice do traço, entretanto, é visível a diminuição da amplitude nos traços de maiores frequências, evidenciando o fenômeno de atenuação da alta frequência.

Para uma visualização mais quantitativa, podemos analisar o espectro de amplitude médio dos traços decompostos, na Figura 1.5. Observamos o espectro azul (de mais baixa frequência) carregando boa parte da amplitude no dado, seguindo o comportamento do

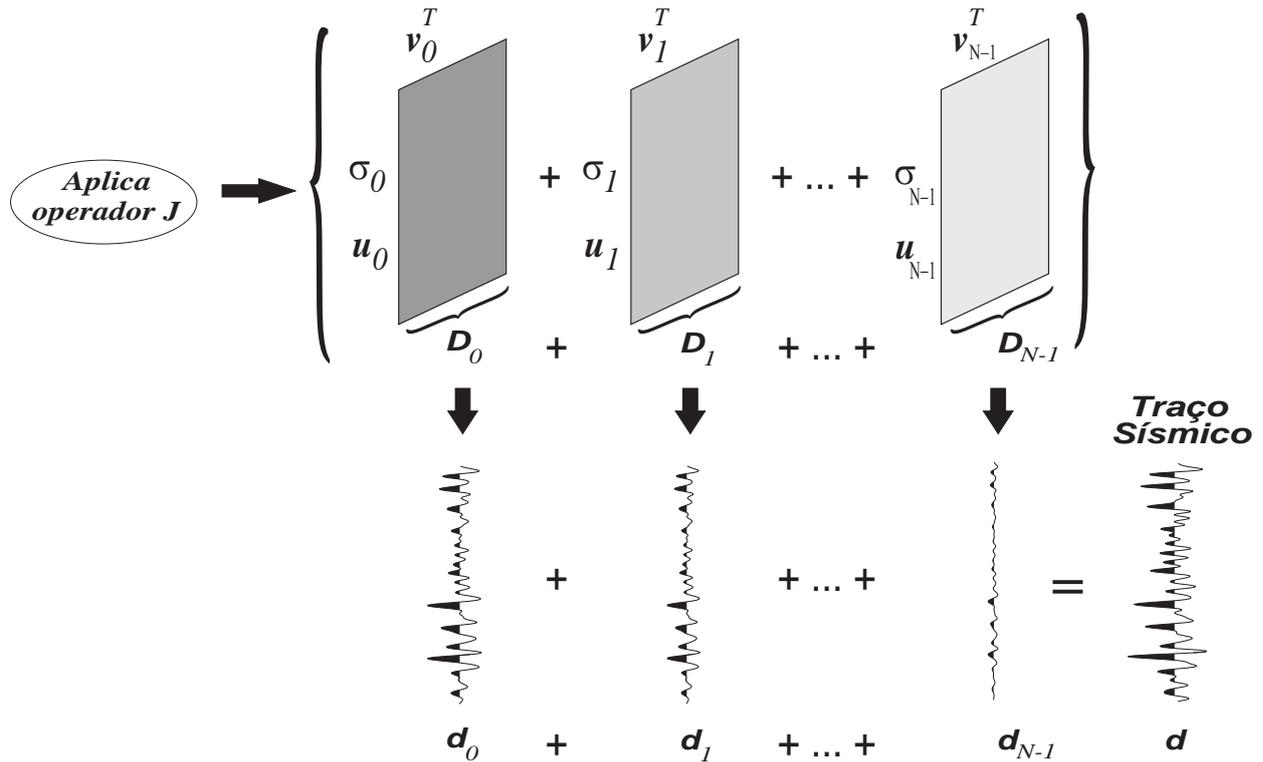


Figura 1.3: Aplicação do operador $J\{\cdot\}$ em cada uma das autoimagens $D_t a u_t$, obtendo, desta forma um autotraço d_t .

espectro preto (traço decomposto), enquanto que o espectro lilás, de maior frequência, possui amplitude praticamente nula.

Voltando à Figura 1.4, vemos a comparação visual entre o traço original, de índice 8, e o empilhamento do traços decompostos, no índice 9. Visualmente, notamos uma reconstituição praticamente perfeita, corroborando com as equações matemáticas do método descritas acima.

Uma observação válida a se fazer quanto a decomposição é o fator de incerteza da decomposição. Para a separação de bandas de frequência aplicando a transformada de Fourier, utilizamos um filtro trapezoidal determinando quatro frequências: duas de corte e duas de atenuação. Isso resulta em uma banda de frequência com intervalos bem definidos. O SSA trabalha de uma maneira diferente, onde determinamos apenas a quantidade de bandas que queremos, e o algoritmo faz a separação automaticamente. Este processo não nos passa nenhuma certeza sobre os limites das bandas de frequência, sendo necessário recorrer ao espectro de amplitude médio.

Outra forma de obtermos apenas os traços de mais baixa frequência, é fazermos a aplicação de um SSA recursivo, onde o dado de entrada será o traço decomposto com mais baixa frequência. Ao aplicarmos diversas vezes esta recursão, poderemos assim obter um traço

com a mais baixa frequência. Para ilustrar os passos desta operação, é possível observar a Figura 2.6 com os passos em forma de fluxograma. Como visto anteriormente, o primeiro traço (de mais baixa frequência dentro da decomposição) é formado utilizando o primeiro autovetor e o primeiro autovalor da matriz de dados. Uma forma de diminuirmos o custo computacional desta operação é utilizarmos a técnica do SVD *power method*, que por meio de iterações, é possível obter somente os primeiros autovetor e autovalor, poupando operações computacionais. Ao aplicarmos esta técnica na recursão, é possível notar uma grande diminuição no custo computacional do filtro.

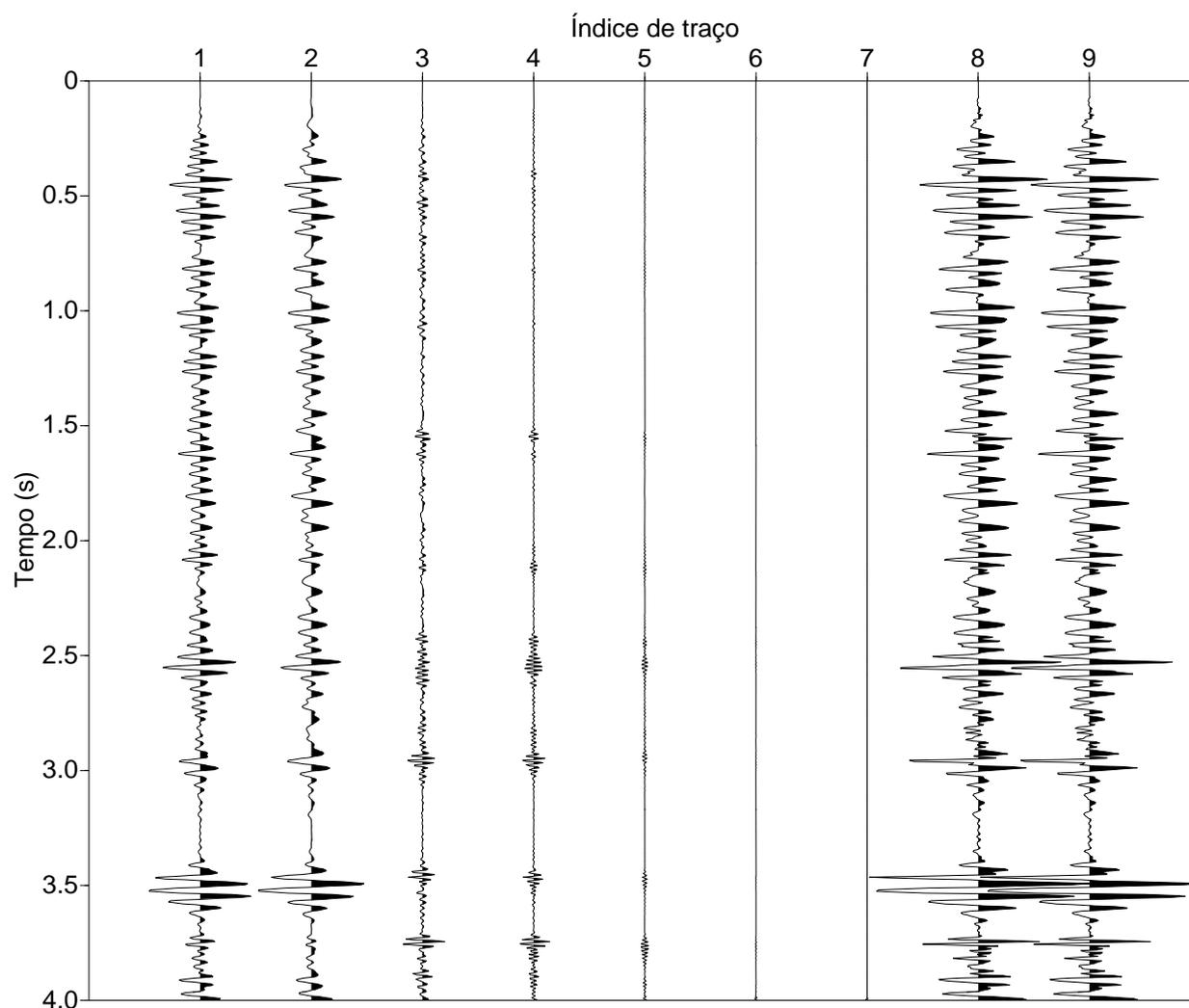


Figura 1.4: Resultado do SSA em um traço sísmico. De 1 a 7, os traços representando as diferentes bandas de frequência, em ordem crescente. Traço 8 corresponde à soma dos traços 1 a 7. Traço 9 ao traço original que foi decomposto. Nota-se a similaridade entre os traços 6 e 7, responsáveis pelo conteúdo de alta frequência do traço, com amplitudes praticamente nulas em comparação com as amplitudes das frequências mais baixas.

Além disso, podemos utilizar o SSA no domínio f-x. Este método proposto discute uma maneira de reforçar a coerência lateral utilizando o SSA no domínio f-x. Sua formulação

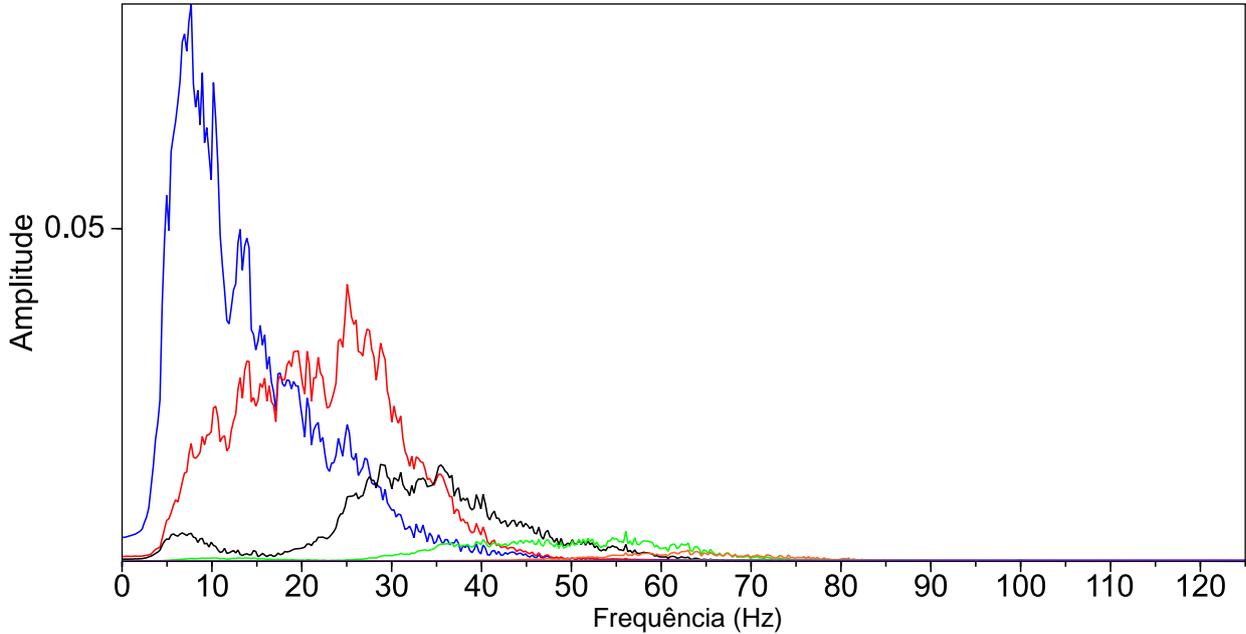


Figura 1.5: Espectro de amplitude médio dos traços representados na Figura 1.4. Em azul, vermelho, preto, verde, laranja, cinza e lilás os espectros dos traços de índice 1 a 7, respectivamente.

matemática é igual à supracitada, tendo apenas como diferença o fato de adaptarmos nossas rotinas para rotinas complexas. Outra diferença em relação ao SSA aplicado ao domínio t-x é que, enquanto no domínio t-x o método é aplicado traço a traço, onde podemos aplicar a qualquer organização do dado sísmico, como por exemplo em famílias de afastamento comum, tiro comum ou ponto médio comum, o SSA aplicado no domínio f-x deixa de ser aplicado a cada traço e passa a ser aplicado ao longo de cada amostra do dado, sendo cada uma dessas uma frequência do dado. Desta forma, este filtro trabalha com a mesma frequência para diversos traços diferentes, sendo um método frequência a frequência.

1.2.1 Propriedade de Fase Zero da decomposição SSA

É possível dizer que $\mathbf{J}\{.\}$ funciona como um operador de correlação. Pode-se verificar que o componente $d_\tau(n)$ do dado, de autotraço \mathbf{d}_τ , corresponde aos termos positivos da correlação cruzada entre os pares de autovetores $\{u_\tau(n), v_\tau(n)\}$, com o peso do seu valor singular correspondente,

$$d_\tau(n) = \sigma_\tau u_\tau(n) \oplus v_\tau(n). \quad (1.7)$$

O símbolo \oplus indica a correlação cruzada. Além disso, considerando a estrutura Toeplitz da matriz \mathbf{D}_N^T (equação 1.4), e a ortogonalidade entre os autovetores \mathbf{v}_τ , é possível se verificar

que $\sigma_\tau \mathbf{u}_\tau$ é igual à multiplicação do autovetor $v_\tau(n)$ e a matriz \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (1.8)$$

$$\mathbf{d} * \mathbf{v}_\tau = \mathbf{U}\Sigma\delta_\tau \quad (1.9)$$

$$\mathbf{d} * \mathbf{v}_\tau = \sigma_\tau \mathbf{u}_\tau \quad (1.10)$$

que implica em:

$$\sigma_\tau u_\tau(n) = d(n) * v_\tau(n). \quad (1.11)$$

Substituindo 1.11 em 1.7, temos que:

$$\sigma_\tau u_\tau(n) \oplus v_\tau(n) = d(n) * v_\tau(n) \oplus v_\tau(n) \quad (1.12)$$

$$d_\tau(n) = d(n) * R_\tau^v(n). \quad (1.13)$$

onde $R_\tau^v(n) = v_\tau(n) \oplus v_\tau(n)$ é a função de autocorrelação (FAC) do autovetor. Porque a FAC é um sinal de fase zero, o autotraço decomposto preserva as características de fase do dado original.

2

Aplicações dos Métodos SVD e SSA para filtragens de ruídos coerentes

Neste capítulo apresentaremos os métodos que foram utilizados para a filtragem dos dados da Bacia do Parnaíba. Dentre os métodos a serem apresentados, três deles foram desenvolvidos para esta tese. São estes os métodos:

1. Balanceamento espectral baseado no SSA, do inglês *SSA Spectral Whitening* (SSA-SW);
2. SSA recursivo e adaptativo no domínio f-x, do inglês *Recursive Adaptive SSA* (RA-SSA-fx);
3. SVD adaptativo, com operador móvel, aplicado no domínio t-x e f-x.

Além destes, outros foram utilizados para complementar a filtragem dos dados, e todos estes serão descritos a seguir neste capítulo.

2.1 Balanceamento espectral baseado no SSA (SSA-SW)

Antes de falarmos sobre o método de filtragem proposto, vamos lembrar como o balanceamento espectral baseado na transformada de Fourier funciona, e seus passos para a aplicação do filtro. O método aplicado em dados contaminados com ruído resulta, na maior parte das vezes, em uma melhora do sinal, devido à amplificação dos componentes do espectro ao

mesmo nível. Este evento causa a diminuição relativa da componente do ruído, aumentando desta forma a razão sinal/ruído. O balanceamento espectral funciona no domínio da frequência em parte dos passos os quais serão descritos a seguir:

- (i) aplica a transformada de Fourier 1D, convertendo o dado de entrada $x(t)$ para $X(\omega)$;
- (ii) seleciona a banda de frequência a qual o filtro irá funcionar e define a quantidade de bandas que se deseja decompor;
- (iii) aplica o filtro de passa banda para separação de bandas de frequência;
- (iv) aplica a transformada 1D inversa de Fourier, obtendo as bandas no domínio t-x ($\Delta x(t)$). Cada traço tem um conteúdo de frequência único;
- (v) aplica uma função ganho AGC (*automatic gain control*) $\Delta g(t)$ para cada traço decomposto utilizando uma janela específica de tempo a ser definida pelo usuário. Após a aplicação do AGC, tem-se $\Delta \tilde{x}(t)$.
- (vi) empilha e tira a média das bandas $\Delta \tilde{x}(t)$ resultantes do AGC, obtendo o traço filtrado $\tilde{x}(t)$.

Seguindo esta operação para todo o dado, obtém-se o dado filtrado. Note que a transformada de Fourier é indispensável para este tipo de filtração. Neste trabalho, uma abordagem diferente é apresentada, suprimindo o uso da transformada de Fourier.

Como mencionado na seção anterior, é possível observar o comportamento do SSA quando aplicado a um traço sísmico. Sem fazer o uso da transformada de Fourier, podemos obter diferentes bandas de frequência de um mesmo traço sem que nenhum tipo de ruído fosse adicionado a eles, fazendo com que a soma de todos eles reconstituísse o traço original. Desta forma, podemos utilizar o SSA para diferentes aplicações, como mostrou Silva et al. (2016), ao utilizar o SSA para atenuação de baixa frequência do sinal. Este tipo de metodologia também pode ser empregado para a aplicação de um filtro passa banda, onde selecionamos um grupo de traços decompostos para a reconstituição parcial do traço sísmico.

Desta forma, é possível observar o quão robusta esta metodologia é, e o quanto ela pode ser explorada para obtenção de diferentes bandas de frequência, bem como a filtração de ruídos com banda de frequência específica. Abaixo abriremos a discussão da utilização do SSA no domínio do tempo para a separação de bandas de frequência e aplicação do balanceamento espectral. Como resultado é esperado que aumente a coerência lateral do

dados, a atenuação do ruído coerente *ground roll* e o aumento da resolução temporal. Vale lembrar que este método, por dispensar o uso da transformada de Fourier, faz com que qualquer supressão de banda de frequência não acarrete em adição de artefatos ou fenômeno de Gibbs no resultado.

A Figura 1.4 mostra, como dito anteriormente, o fenômeno de decrescimento da energia conforme o aumento da banda de frequência do dado. Porém, esta separação é útil para aumentar a razão sinal/ruído direto no domínio do tempo. Desta forma, separando de maneira apropriada um subconjunto de autotraços, é possível enfatizar as frequências mais representativas do sinal.

Abaixo, os passos para que as altas frequências sejam ressaltadas, baseados no balanceamento espectral, porém, utilizando o SSA como separador de frequências. Este método será referenciado como SSA-SW, do inglês *spectral whitening singular spectral analysis*.

- (i) aplica o SSA para decompor cada traço $x(t)$, obtendo as bandas de frequência $\Delta x(t)$;
- (ii) seleciona um subconjunto de traços a serem preservados;
- (iii) aplica a função AGC $\Delta g(t)$ em cada banda $\Delta x(t)$ ($\Delta g(t) \cdot \Delta x(t)$) utilizando uma janela de tempo especificada pelo usuário, tendo como resultado $\Delta \tilde{x}(t)$;
- (iv) empilha as bandas $\Delta \tilde{x}(t)$ fazendo a média, obtendo desta forma o traço $\tilde{x}(t)$.

A Figura 2.1 mostra o resultado da aplicação do AGC nos traços 1-7 da Figura 1.4. Observe que os traços 6 e 7, que antes praticamente não mostravam amplitude alguma, agora são significativos para contribuir na imagem sísmica final. O traço 8 (soma dos traços 1 a 7) demonstra um aumento de resolução, visto que as principais amplitudes (1,5 s, 2,5 s, 3 s e 3,5 s) se mostram mais finas e mais evidentes que no traço original 9. A Figura 2.2 mostra o espectro de amplitude médio dos traços após a aplicação do AGC. Fica bastante evidente a amplificação das amplitudes em todas as bandas de frequência, especialmente nas maiores frequências, onde suas amplitudes eram praticamente desprezíveis em relação às de menores frequências.

Para comparar o método proposto com o método clássico, selecionamos o tiro 39 da linha L5090 da Bacia do Tacutu, mostrada na Figura 2.3a. Este tiro, como podemos ver, possui um alto conteúdo de ruído linear, como ondas refratadas e principalmente *ground roll*, mascarando reflexões presentes no sismograma. Para o método baseado no SVD, nós decomparamos os traços em 12 autotraços ($N = 12$) e preservamos apenas os autotraços 1 a 7, descartando os últimos traços correspondentes à alta frequência, que adotamos como

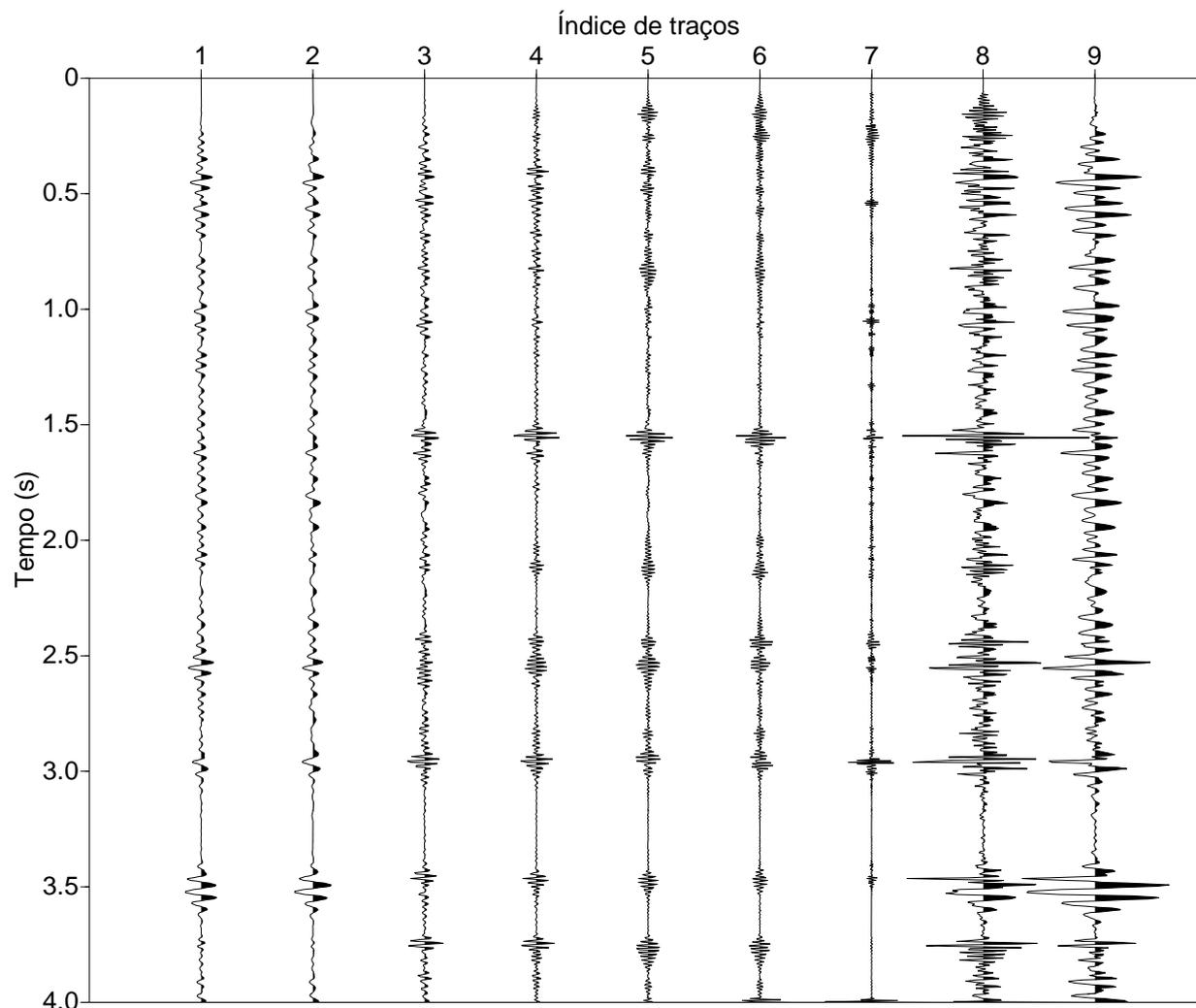


Figura 2.1: Resultado do balanceamento espectral utilizando SSA para separação de frequências (SW-SSA). Após aplicação de AGC nos traços da Figura 1.4, notamos uma amplitude relativa menor da baixa frequência, em comparação com as demais frequências. Os traços 6 e 7, antes aparentemente zerados, mostram agora uma amplitude considerável.

ruído. É importante informar que estes números não são absolutos, e que foram obtidos após diversos testes até encontrarmos a melhor calibração para o dado. Para o método baseado tradicional, utilizamos as frequências 4-8-50-60 Hz para formar o trapézio do filtro, decompondo o sinal em cinco bandas.

As Figuras 2.3b e 2.3c mostram, respectivamente, os resultados do método proposto e do método baseado em Fourier. Apesar de, à primeira impressão, ambos os resultados serem equivalentes, quando analisamos em detalhe, é possível ver que na Figura 2.3c a onda aérea foi atenuada de forma mais eficiente que em 2.3b. Contudo, em 2.3b nós notamos um aumento mais efetivo na resolução das reflexões, em comparação com a metodologia baseada em Fourier. Entre 2,5 e 3 segundos, ambos os filtros apresentaram uma boa performance

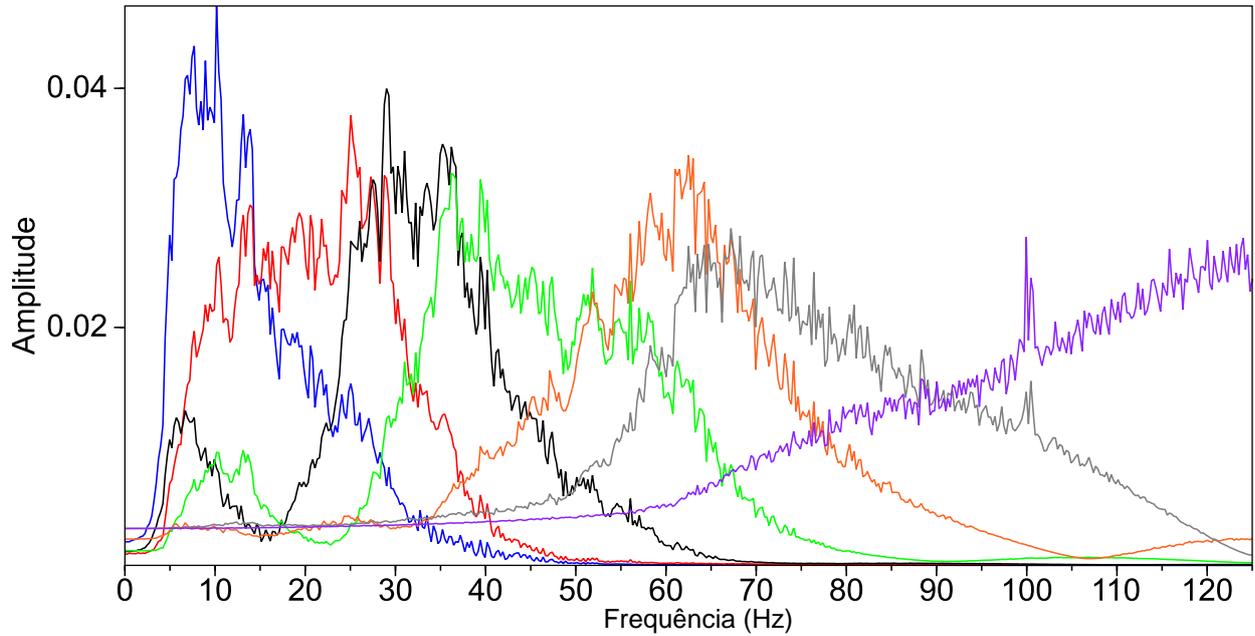


Figura 2.2: Espectro de amplitude médio dos traços representados na Figura 2.2. Em azul, vermelho, preto, verde, laranja, cinza e lilás os espectros dos traços de índice 1 a 7, respectivamente. É bastante evidente o aumento considerável das amplitudes, especialmente dos traços 6 e 7. Após 60 Hz, nota-se também amplitudes correspondentes a ruído.

na atenuação do *ground roll*, desmascarando reflexões não presentes em 2.3a, com o método proposto mostrando um resultado particularmente melhor, com maiores camadas de refletorres e maior resolução. Em outras partes do sismograma, como no intervalo entre 1.5 s e 2 s, o balanceamento espectral clássico obteve um melhor resultado em termos de atenuação de ruído, evidenciando reflexões não vistas antes no dado original.

A Figura 2.4 apresenta o espectro de amplitude médio correspondente ao dado original, ao método SSA e ao método baseado em Fourier nas cores preta, azul e vermelha, respectivamente. Primeiramente, no espectro preto, podemos ver um espectro com características bastante comuns, como esperado, com alta amplitude nas frequências mais baixas e baixa amplitude nas frequências mais altas, devido à característica de filtro passa baixa da Terra, atenuando altas frequências durante a penetração da onda em subsuperfície. Os espectros azul e vermelho são, de certa forma equivalentes, devido à amplificação da alta frequência, quase que ao mesmo nível de amplitude que nas baixas frequências, significando um aumento na resolução do dado e uma diminuição da “importância” do conteúdo de baixa frequência no dado em geral. Cada uma das linhas azul e vermelha possuem seu próprio comportamento, com a linha vermelha apresentando vales devido à junção dos filtros de passabanda. Enquanto que o método baseado em Fourier nós escolhemos atenuar as frequências entre 50 e 60 Hz, eliminando amplitudes com frequências acima de 60 Hz, na linha em azul não é possível fazer este tipo de seleção, mas como foi decidido descartar as 5 últimas autoimagens,

o sinal foi delimitado até 70 Hz.

Desta forma, podemos concluir que, assim como qualquer filtro, a metodologia proposta possui vantagens e desvantagens que o usuário deve levar em conta para que seja escolhido o filtro mais apropriado para o dado o qual está trabalhando. Como os resultados se mostraram promissores, foi levado a diante toda a metodologia a fim de se obter uma seção sísmica empilhada final.

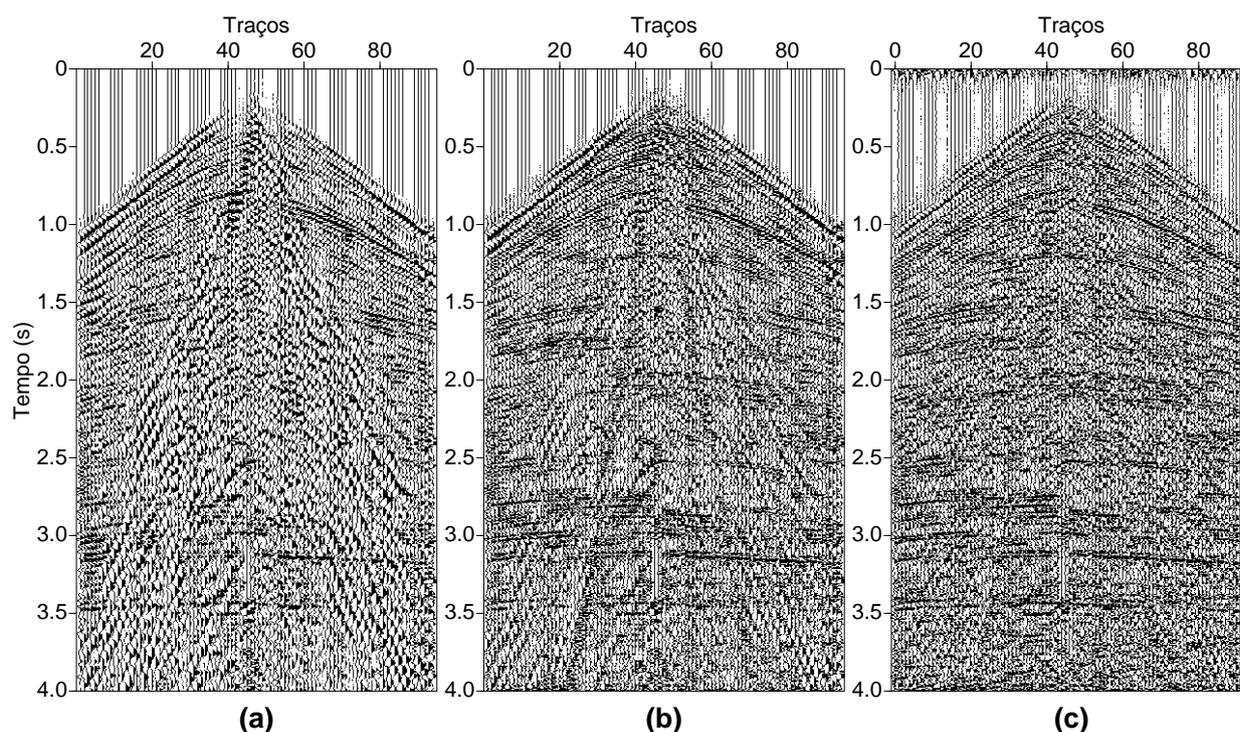


Figura 2.3: Família de tiro comum da Bacia do Tacutu: (a) tiro original; (b) tiro filtrado utilizando o SSA; (c) tiro filtrado utilizando o balanceamento espectral tradicional.

2.2 SSA na forma recursiva e adaptativa

Para um melhor aproveitamento do filtro, o mesmo foi aplicado de maneira recursiva e adaptativa, preservando sempre a primeira autoimagem, reforçando o conteúdo de frequência entre os traços adjacentes e, portanto, aumentando a coerência lateral do dado. Para um melhor desempenho, foi utilizado o algoritmo SVD *power method* para a obtenção das primeiras autoimagens. A discussão deste método e resultados preliminares será feita na seção a seguir.

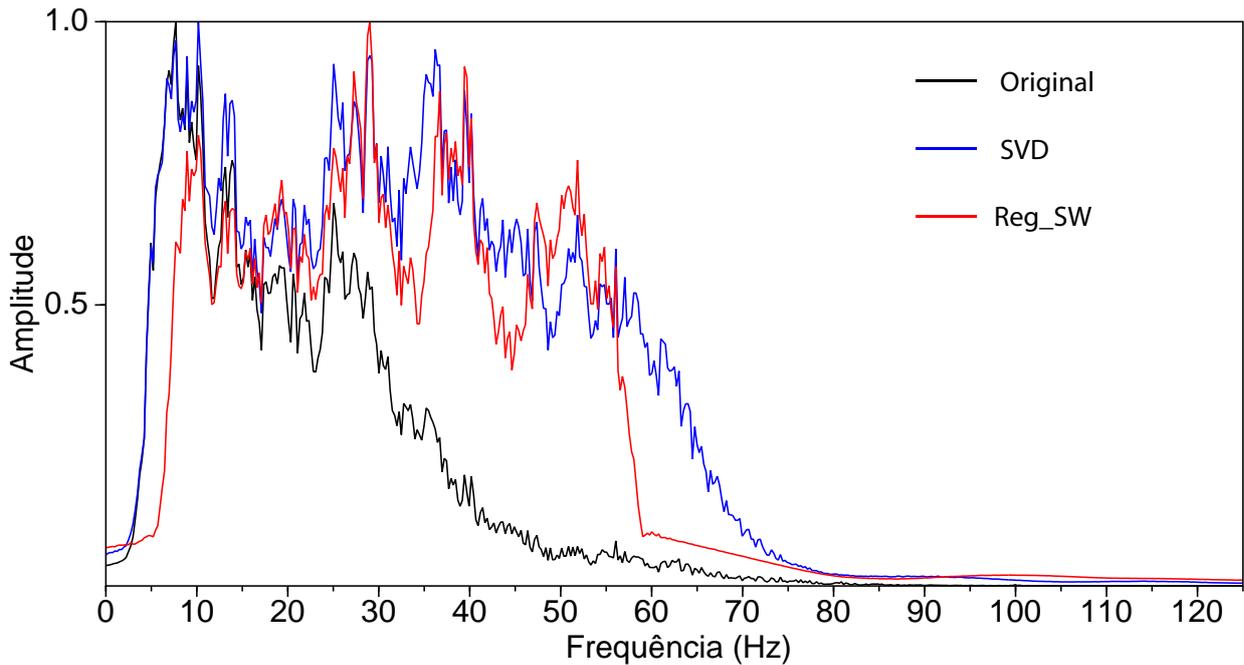


Figura 2.4: Espectro de amplitude médio mostrando em preto o espectro do dado bruto, em azul o espectro de amplitude do dado filtrado, utilizando a metodologia baseada no SVD, e em vermelho o dado filtrado utilizando o balanceamento espectral tradicional.

2.2.1 SSA recursivo e adaptativo no domínio t-x (RA-SSA-tx)

No tópico anterior vimos a utilização do SSA para a separação de frequências tendo como base o SVD, onde, cada par de autovalor e autovetores seria responsável por uma banda de frequência diferente. Sabemos, por sua vez, que quanto mais aumentamos a quantidade de bandas de frequência que desejamos decompor o dado, maior é o custo computacional do processo. Portanto, uma forma de reduzir o custo computacional e aumentar a definição da banda de frequência é fazermos a aplicação do SSA de forma recursiva, utilizando como dado de entrada a banda de frequência que obtivemos anteriormente, e assim por diante. A Figura 2.5 ilustra o comportamento deste método, onde decomparamos o dado em três bandas diferentes, conservamos a segunda, e assim sucessivamente. Em um exemplo simples, utilizando o tiro 39 da linha L5090 da Bacia do Tacutu, aplicamos recursivamente o SSA, como mostrado na Figura 2.5. Podemos ver os resultados ao longo do processo para 3 recursões nas Figuras 2.7 e 2.8, famílias de tiro comum, e espectros de amplitude média normalizado, respectivamente. Com este resultado, podemos observar o fenômeno de que, a cada recursão, mais a banda de frequência vai se estreitando, e se direcionando à frequência entre 30 e 50 Hz, aumentando a definição da banda de frequência no dado.

Porém, veremos agora um outro caso para a utilização do SSA de forma recursiva e iterativa. Para este caso, desejamos obter apenas a mais baixa frequência do dado, significando

que apenas a primeira autoimagem (formada pelo primeiro par de autovalor e autovetores) será conservada. Para que haja um custo computacional diminuído, será utilizado o algoritmo SVD *power method*, onde calculamos de forma numérica apenas o primeiro autovalor e o primeiro autovetor, sem a necessidade de obtermos os demais na decomposição. Neste método, seguiremos os passos do fluxograma mostrando na Figura 2.6 onde partimos de um vetor de dados inicial \mathbf{d}_0 , sendo este vetor um traço da matriz de dados \mathbf{D} . Para cada traço \mathbf{d} , faremos a construção da matriz presente em 1.3 variando seu tamanho de $\tau = 2, 3, 4 \dots N$. Desta matriz, conservamos o primeiro traço $\tilde{\mathbf{d}}$. Vale lembrar que o traço de entrada dessa recursão será resultante da primeira autoimagem conservada da recursão anterior, e assim por diante. Uma forma de visualizarmos esta operação é através da Figura 2.9, a qual mostra que cada autoimagem é decomposta em outras autoimagens, e assim por diante. Quando $\tau = N$, a recursão termina.

Para testarmos esta aplicação, escolhemos uma família de *offset* comum (apenas os 215 primeiros CMPs) da bacia do Parnaíba, do dado regional RL001. Contudo, por ser um método traço a traço, no domínio do tempo, existe a possibilidade de que o mesmo seja aplicado a qualquer organização do dado sísmico. Porém, para efeitos didáticos, manteremos a família de afastamento comum. Ao analisarmos a Figura 2.10a, notamos um alto grau de contaminação por ruído de alta frequência. Após aplicarmos o filtro proposto, notamos uma melhora significativa no dado, por conta até do alto grau de ruído presente nele. Este resultado pode ser observado na Figura 2.10b, e o ruído extraído dele em 2.10c. Podemos observar também na Figura 2.11 o espectro de amplitude médio de 2.10. Notamos que, para este caso, conseguimos preservar boa parte da amplitude por volta de 10 e 30 Hz, com concentração maior entre 15 e 25 Hz, o que consideramos a frequência mais útil para trabalharmos com este dado. Vemos também que o conteúdo de alta frequência foi descartado, não acrescentando nenhum tipo de artefato. Pela sobreposição dos espectros, notamos que parte do conteúdo entre 20 e 30 Hz foi perdido na filtragem. Este conteúdo corresponde ao sinal que foi descartado no resíduo. O método proposto foi de grande valia para este dado principalmente por conta de sua grande profundidade, com tempo de registro de 20 segundos. Vale dizer que, assim como este mesmo filtro foi utilizado apenas para conservar a baixa frequência, o mesmo pode ser facilmente adaptado para conservar a mais alta frequência, ou até a frequência média do dado.

2.2.2 SSA recursivo adaptativo no domínio f-x (RA-SSA-fx)

Para a aplicação do SSA recursivo e adaptativo no domínio f-x, é necessário que seja feita a transformada de Fourier, para transformarmos os traços, antes no domínio t-x ($x(t)$) para

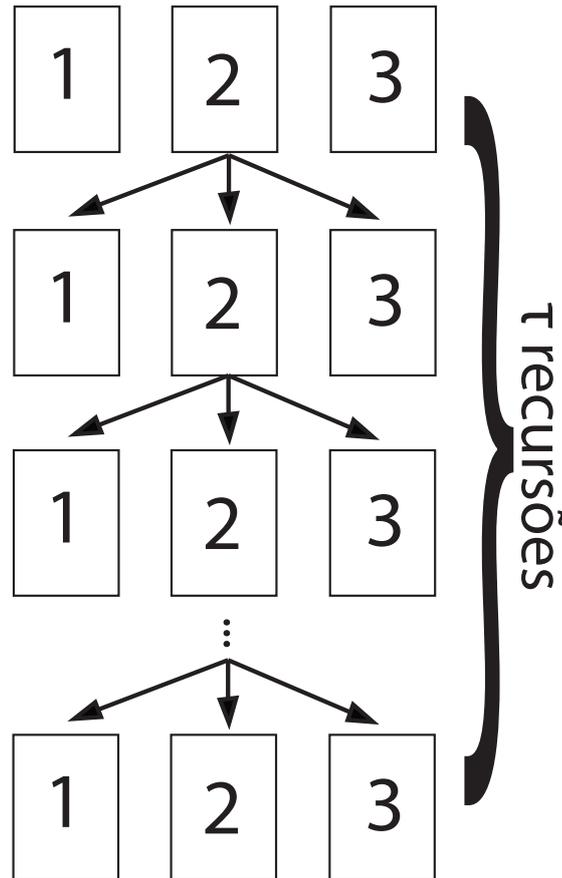


Figura 2.5: Esquema mostrando a recursão do algoritmo SSA para extração da frequência média do dado. Este esquema mostra que frequência central (segunda autoimagem) da recursão anterior serve de dado de entrada para a recursão seguinte, e assim por diante.

o domínio frequência-espço ($X(\omega)$). Porém, o que difere a aplicação do RA-SSA-tx para o RA-SSA-fx é a forma como é feita a aplicação do SSA. Vale lembrar que para a aplicação deste método, foi necessário adaptar a subrotina para coeficientes complexos.

Neste método, o objetivo é aumentar a coerência de uma mesma frequência em relação aos *offsets* vizinhos. Em um primeiro momento, para que houvesse um aproveitamento melhor da técnica, seria necessário ter o dado corrigido de *normal moveout*, semelhante à filtragem SVD (Porsani et al., 2009; Manenti e Porsani, 2013). Para evitar este processo, o qual exige o conhecimento do campo de velocidades do dado, optamos por organizarmos nosso dado em família de *offset* comum. Neste tipo de organização as reflexões presentes no sismograma se arranjarão em uma geometria sub-horizontal, em relação às famílias de tiro comum e CMP. Feita esta organização, para cada amostra de frequência do dado, iremos coletar todas as amplitudes dos traços da família de afastamento comum correspondentes àquela amostra. Ou seja, será selecionado um traço horizontal do sismograma. Após a seleção, aplicaremos o RA-SSA, visando que, caso haja um certo ruído amplificando ou di-

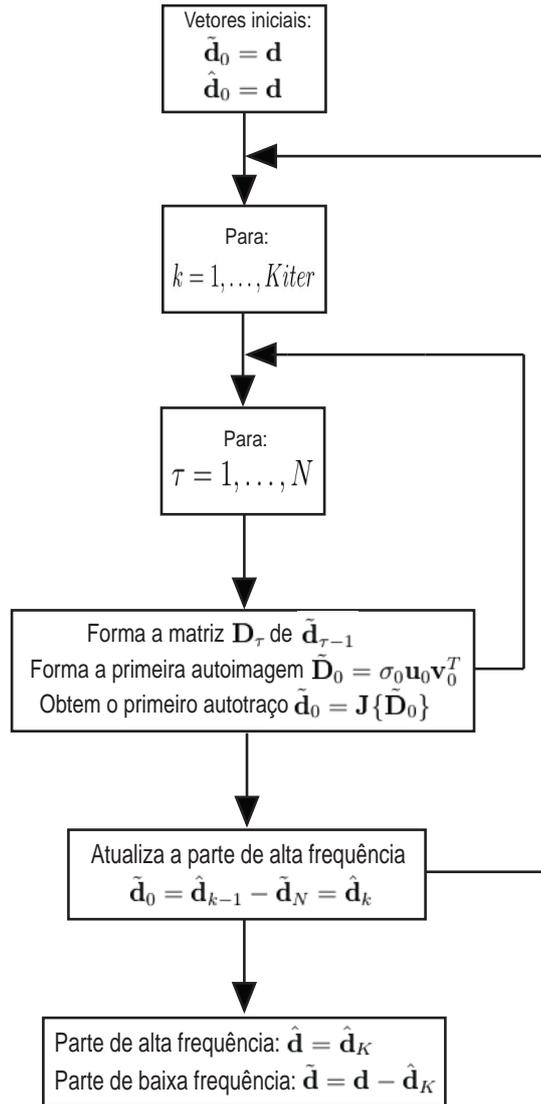


Figura 2.6: Fluxograma descrevendo os passos do algoritmo SSA para obtenção de diferentes bandas de frequência no domínio do tempo.

diminuindo uma frequência que também corresponde a uma reflexão, este ruído seja atenuado. Esta forma de aplicação é bastante interessante pois, em geral no processamento de dados sísmicos, é feita a filtragem selecionando uma certa banda de frequência a qual desejamos preservar ou atenuar. Contudo, neste método proposto, a ideia é, dentro de uma mesma frequência, poder atenuar ruídos e preservar sinal. Este processo de seleção de um traço horizontal, com amplitudes correspondentes a uma dada amostra é repetido para todas as amostras do sismograma. Após a última frequência ser filtrada, aplicamos a transformada de Fourier inversa, retornando de $X(\omega)$ para $x(t)$.

A Figura 2.12a ilustra uma família de *offset* comum (a mesma apresentada na seção anterior). Os números de $N = 7$ recursões e $K = 21$ iterações foram utilizados no algoritmo.

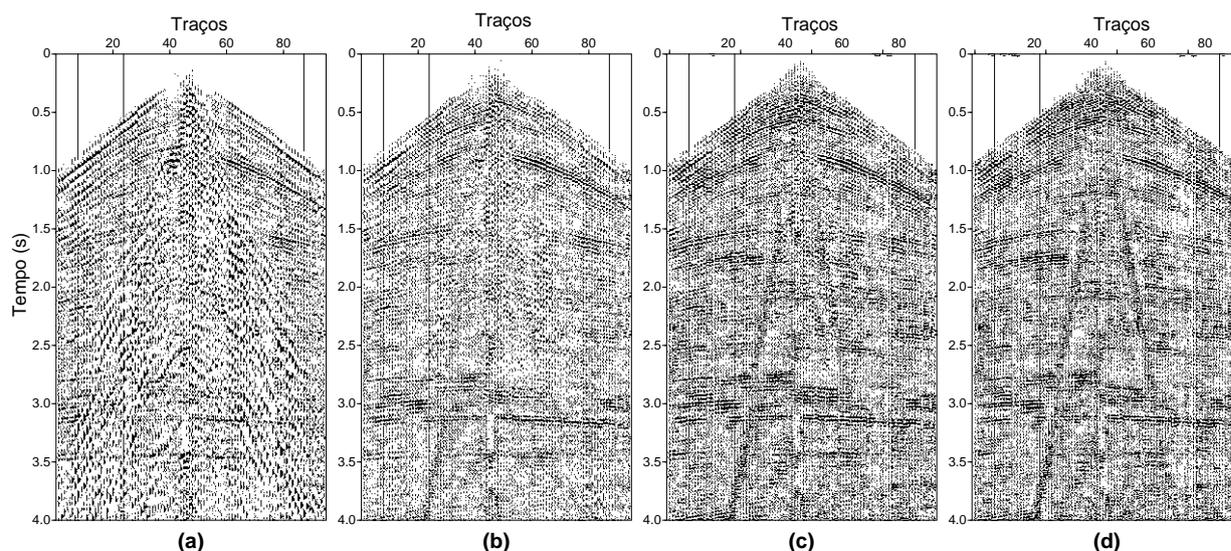


Figura 2.7: Conjunto de tiros mostrando a recursão SSA para a extração da frequência média, seguindo o esquema descrito na Figura 2.5. (a) - tiro original; (b) - resultado da primeira recursão; (c) - resultado da segunda recursão; (d) - resultado da terceira recursão. É possível notar a baixa frequência sendo atenuada a cada recursão, preservando somente a frequência média.

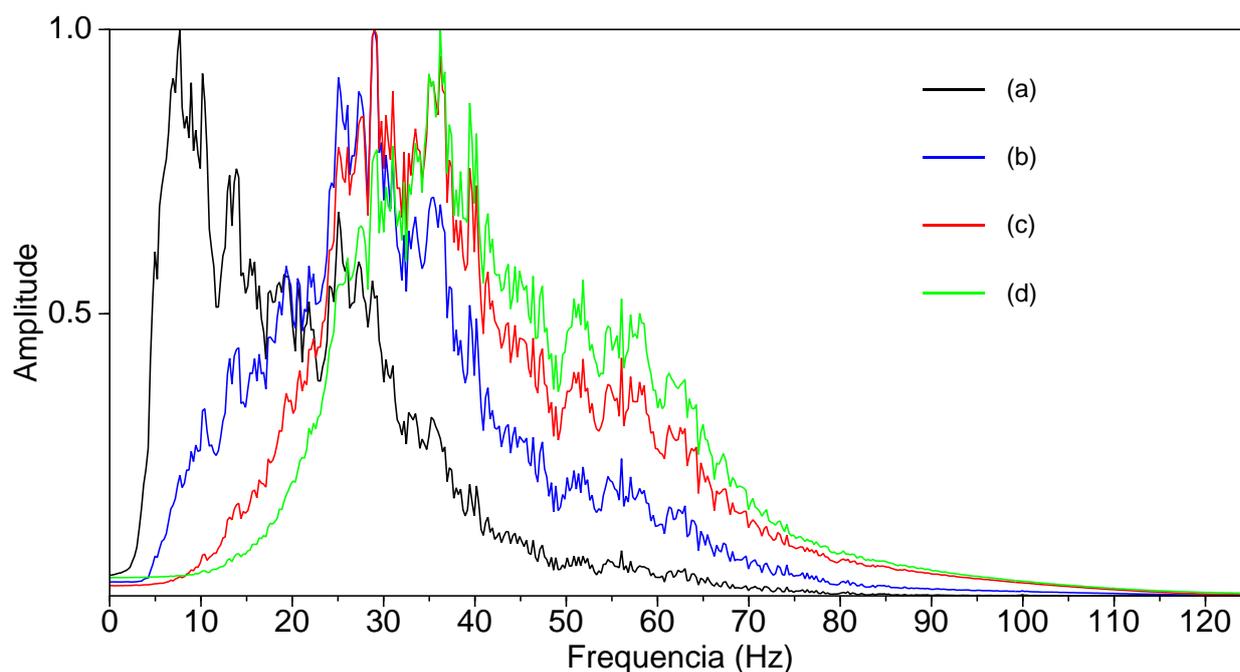


Figura 2.8: Espectro de amplitude médio normalizado referente à Figura 2.7. Notamos que a cada recursão, o pico de amplitude se desloca mais ao centro da banda de frequência. Se mais recursões fossem feitas, mais estreito e mais ao centro estaria o pico de amplitude.

Vale lembrar que a aplicação do RA-SSA, por ser traço a traço, dava-nos uma maior flexibilidade sobre em qual organização de dados aplicar o filtro, por isso o mesmo foi aplicado no domínio mostrado, porém, o mesmo poderia ser aplicado em qualquer família que o usuário

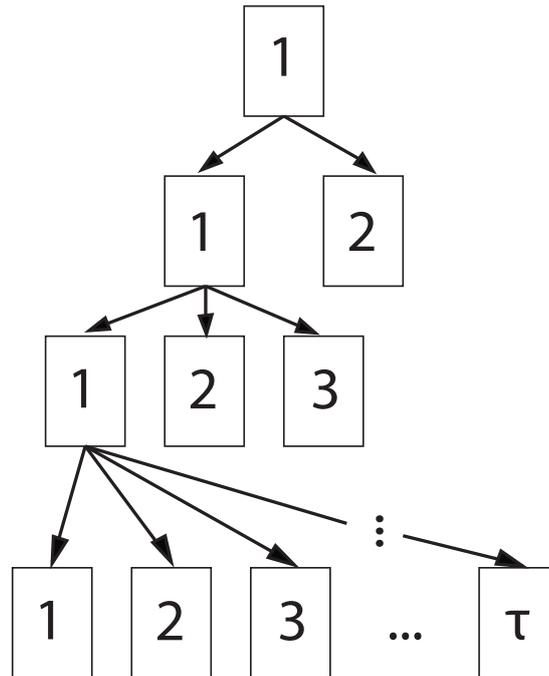


Figura 2.9: Esquema mostrando a recursão do algoritmo SSA para extração da mais baixa frequência do dado. Este esquema mostra que a baixa frequência (primeira autoimagem) da recursão anterior serve de dado de entrada para a recursão seguinte, e assim por diante.

desejar.

Na Figura 2.12a temos a família de *offset* comum mostrando os primeiros 215 CDPs. Podemos notar a falta de continuidade das reflexões presentes no dado. A Figura 2.12b mostra o dado após a aplicação do filtro. É possível ver uma melhora bastante significativa, tanto da coerência lateral quanto da amplitude das reflexões presentes. Já na Figura 2.12c, podemos analisar o resíduo que foi retirado de 2.12b. Notamos a presença de sinal no resíduo, porém o resultado foi bastante expressivo. Na Figura 2.13, vemos o espectro de amplitude médio correspondente à Figura 2.12. Fica bastante claro o quanto de ruído foi removido do dado após a aplicação do filtro, mesmo com este ruído tendo a mesma banda de frequência do nosso sinal desejado. Estes resultados mostram o quão robusto é o método para a filtração de dados que possuem muitos ruídos incoerentes com o sinal que se deseja preservar, não importando a banda de frequência deles.

Sabendo que os eventos que desejamos reforçar são bastante profundos, e portanto, são descritos por baixas frequências. Para isso, aplicamos o RA-SSA-tx para preservar as mais baixas frequências do sinal, dentro do intervalo de 4 Hz e 30 Hz. Em seguida, aplicamos o RA-SSA-fx para atenuação de ruídos de baixa frequência e preservação do sinal.

Na Figura 2.14a, é mostrado uma família de *offset* comum com apenas os 200 primeiros CDPs, a fim de facilitar a visualização. É possível notar a falta de reflexões presentes no

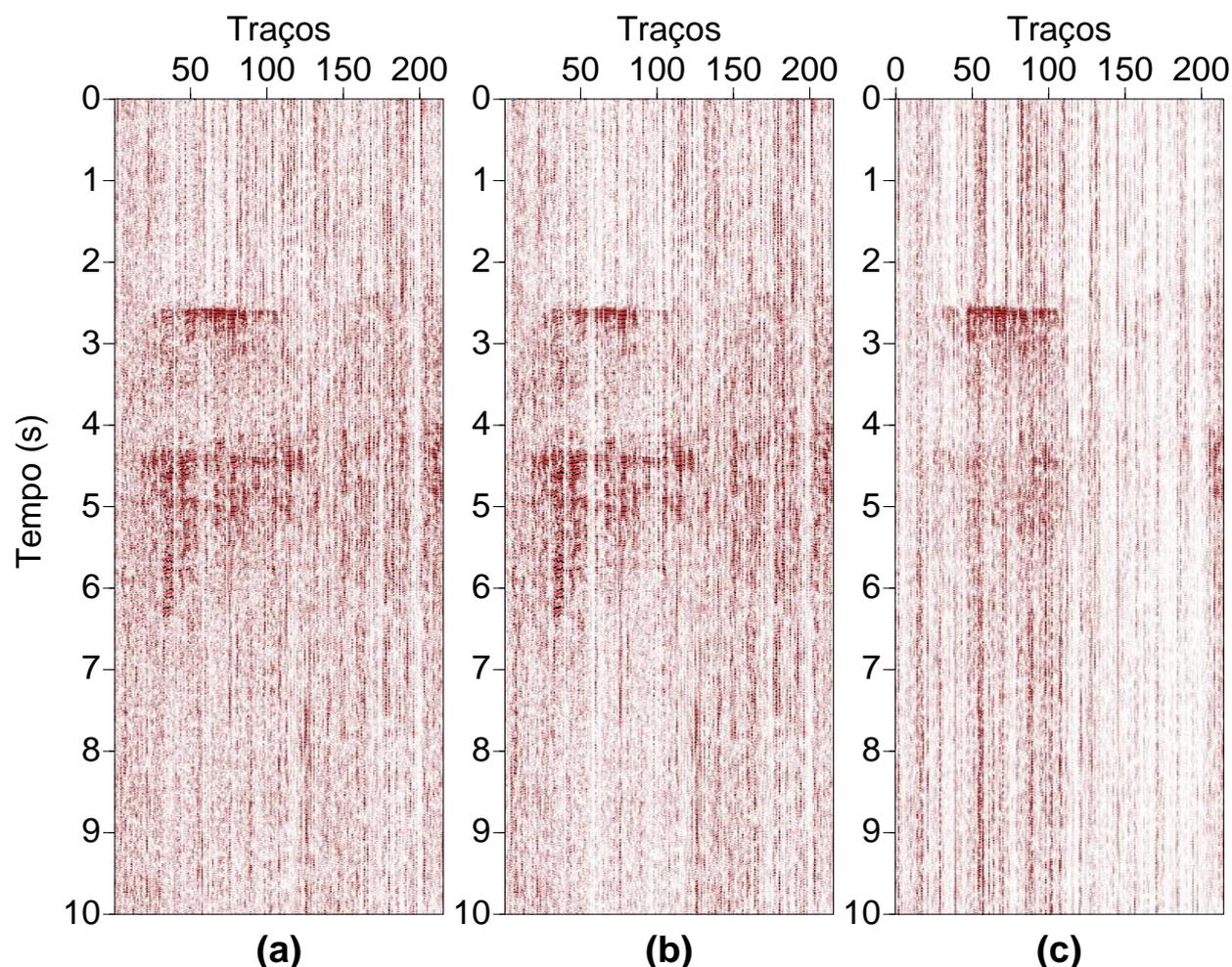


Figura 2.10: Filtragem de uma família de *offset* comum: (a) família de *offset* comum original; (b) resultado após aplicação do SSA adaptativo no domínio do tempo, correspondendo à baixa frequência; (c) resíduo entre (a) e (b) correspondendo à alta frequência do dado.

dado. O primeiro passo foi a aplicação do filtro RA-SSA no domínio do tempo, a fim de preservar apenas a baixa frequência. Este resultado é visto na Figura 2.14b. É possível notar que os ruídos de alta frequência foram atenuados, apesar de não ser possível enxergar muita informação ainda. Com este resultado, aplicamos o RA-SSA, no domínio f-x, após a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês, *fast Fourier transform*) em cada traço da família de *offset* comum. Para cada frequência, o RI-SSA é utilizado com o propósito de reforçar a continuidade lateral, utilizando $N = 2$ recursões e nenhuma iteração. Na Figura 2.14c, vemos o resultado bastante positivo desta filtragem, sobressaltando os refletores em toda a família, especialmente entre 4 e 7 segundos, entre os traços 100 e 200, e nas regiões mais profundas. A Figura 2.14d mostra a diferença entre o dado original original (Figura 2.14a) e o resultado final (Figura 2.14c). A partir da Figura 2.14d é possível ver que, apesar de que bastante ruído foi descartado, alguma informação presente acabou sendo excluída também.

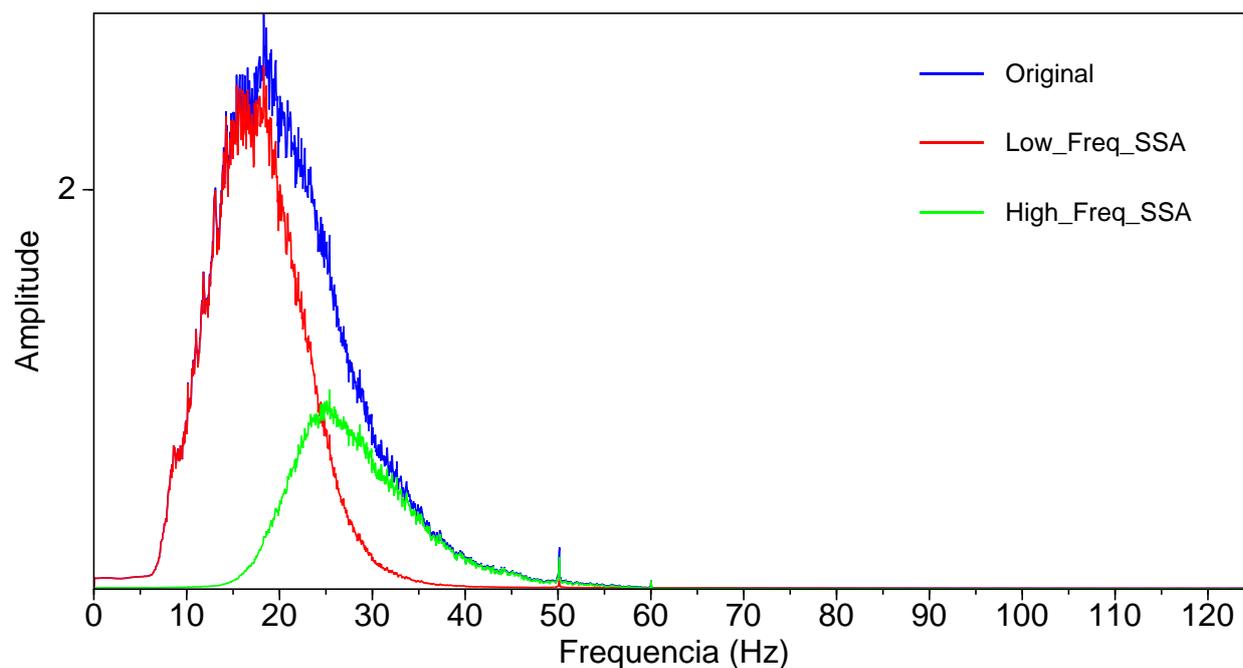


Figura 2.11: Espectro de amplitude média correspondente à Figura 2.10: original em azul; baixa frequência em vermelho (filtrado); e alta frequência em verde (resíduo).

A Figura 2.16 mostra o espectro de amplitude média dos dados original e filtrado no domínio t - x e f - x . O espectro do dado filtrado está centrado em 20 Hz, e possui uma distribuição entre 5 e 40 Hz, correspondendo aos eventos mais profundos, coincidindo com as características das informações a qual estamos focando.

No domínio do tiro (na Figura 2.15a) é possível enxergar de outra maneira o ruído presente em nosso dado. Após todos os processos de filtração pelos algoritmos, vemos que o ruído ambiental presente no dado foi atenuado, como vistos nas Figuras 2.15b e 2.15c. Apesar de neste tiro não haver tantos refletores, é claramente vista a atenuação dos ruídos ambientais e aleatórios atenuados. A Figura 2.15d mostra quanto ruído foi descartado após todo o processo de filtração, sendo este uma diferença entre as Figuras 2.15a e 2.15c.

Avaliando os resultados, na Figura 2.16 nós temos o espectro de amplitude média das Figuras 2.14 e 2.15. Em azul vemos o espectro de frequência do tiro original, com frequência variando entre 8 e 60 Hz. A linha preta mostra o tiro após o RI-SSA no domínio do tempo, preservando apenas a banda de mais baixa frequência, enquanto que a linha vermelha mostra o espectro do resíduo deste processo, com conteúdo de mais alta frequência. As linhas em roxo e laranja mostram os espectros após o RI-SSA, no domínio da frequência, demonstrando que a amplitude da baixa frequência foi atenuada, preservando a maior parte do sinal enquanto atenuando o ruído de baixa frequência.

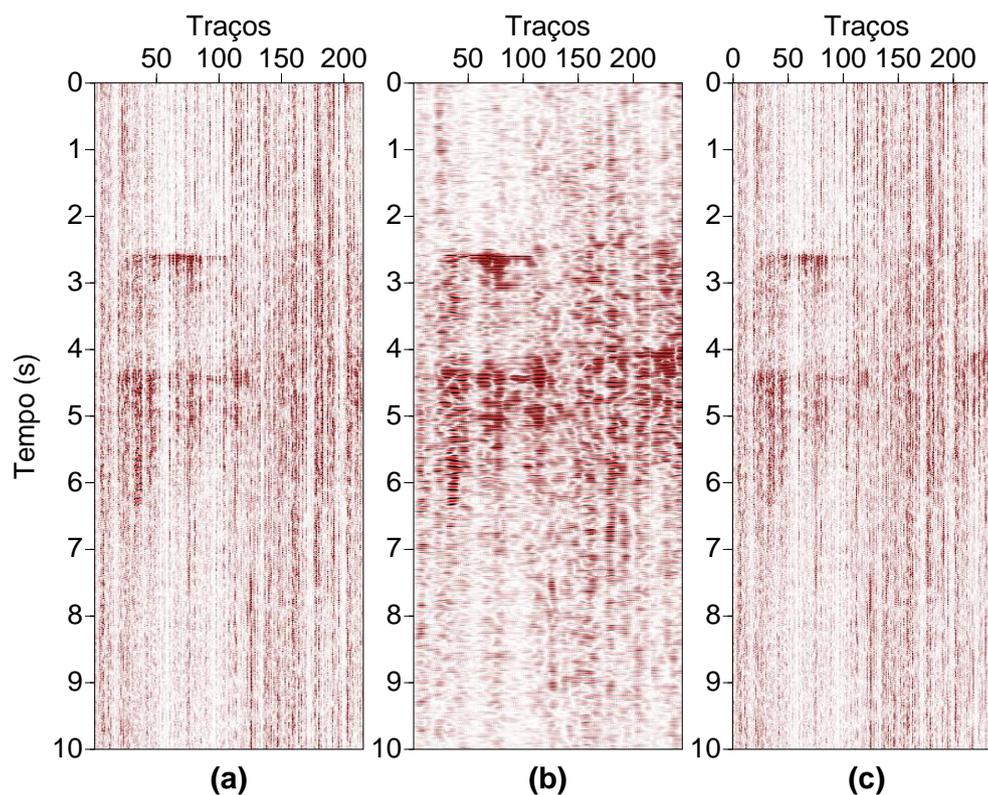


Figura 2.12: Filtragem de uma família de *offset* comum: (a) família de *offset* comum original; (b) resultado após aplicação do SSA adaptativo no domínio da frequência, correspondendo à baixa frequência; (c) resíduo entre (a) e (b) correspondendo à alta frequência do dado.

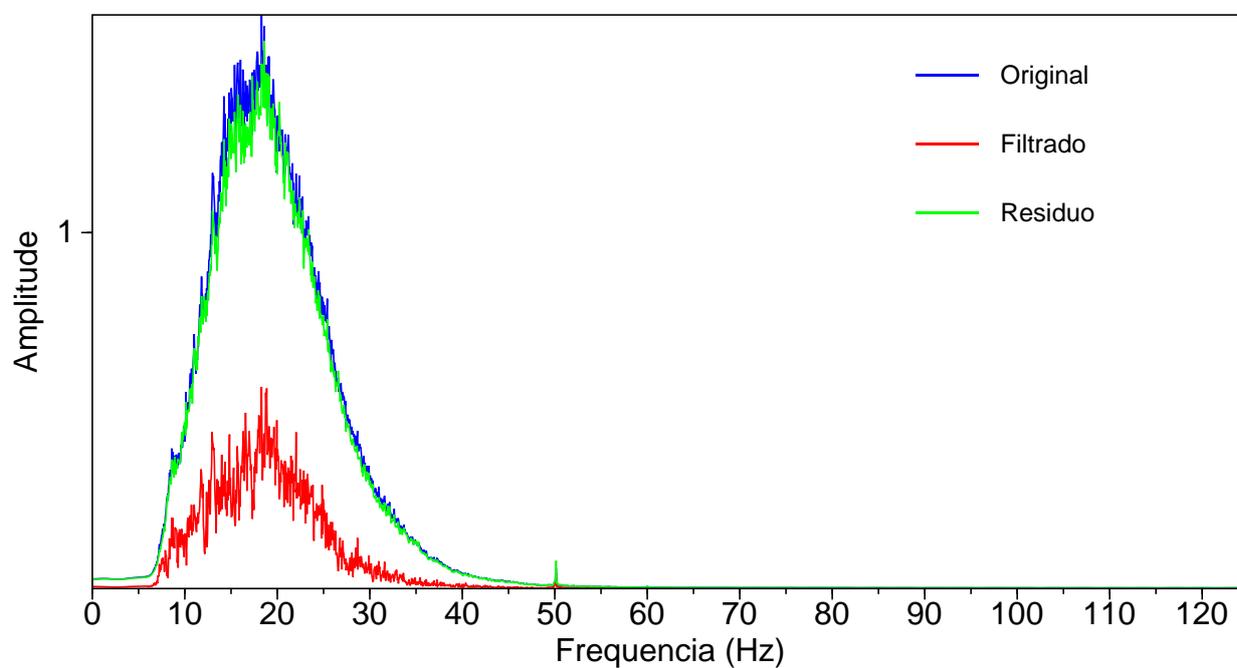


Figura 2.13: Espectro de amplitude médio correspondente à Figura 2.12: original em azul; baixa frequência em vermelho (filtrado); e alta frequência em verde (resíduo).

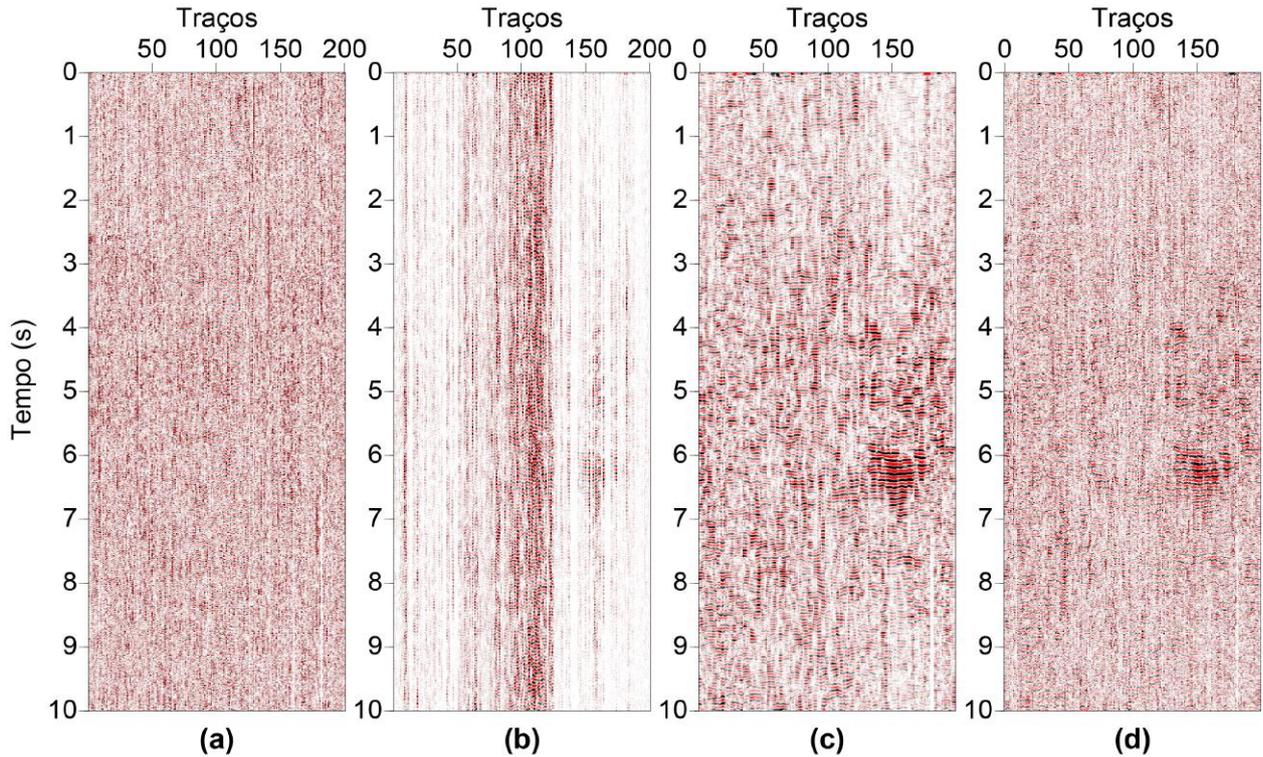


Figura 2.14: Filtragem de uma família de *offset* comum: (a) família de *offset* comum original; (b) resultado após aplicação do RI-SSA no domínio do tempo; (c) resultado do RI-SSA no domínio da frequência usando (b) como dado de entrada; (d) resíduo entre resultado apresentado em (c) e dado original apresentado em (a).

2.3 Filtragem SVD adaptativa

2.3.1 SVD Adaptativo no domínio t-x

Vimos anteriormente filtragens a partir do SVD. Ao utilizarmos uma matriz com um traço sísmico \mathbf{d} replicado e defasado em uma amostra de uma coluna para a outra, a decomposição em valores singulares age como um segregador de frequências, sendo essa quantidade de bandas de frequências igual ao número de colunas da matriz. Porém, notamos que este método não é adaptativo. Este utiliza o traço \mathbf{d} inteiro para produzir o traço filtrado $\tilde{\mathbf{d}}$.

Nesta seção, introduziremos o SVD de janela móvel adaptativo no domínio t-x. A forma como esta filtragem trabalha é bastante simples. Observemos a Figura 2.17 e consideremos que a matriz ilustrada nela é um sismograma. Para cada amplitude na posição x_{ij} , teremos um operador centrado na posição ij , com $-L_x \leq i \leq L_x$, e $-L_y \leq j \leq L_y$. Desta forma, a partir da matriz de dados \mathbf{D} , iremos formar uma janela \mathbf{B} , de ordem $(2L_x + 1) \times (2L_y + 1)$, como mostra na Figura 2.17 o operador representado por um quadrado vermelho para um caso de $L_x = L_y = 2$. Após a formação da janela, aplicamos o SVD utilizando o algoritmo *power method*, pois desejamos recuperar apenas a primeira autoimagem da matriz \mathbf{B} . Feita

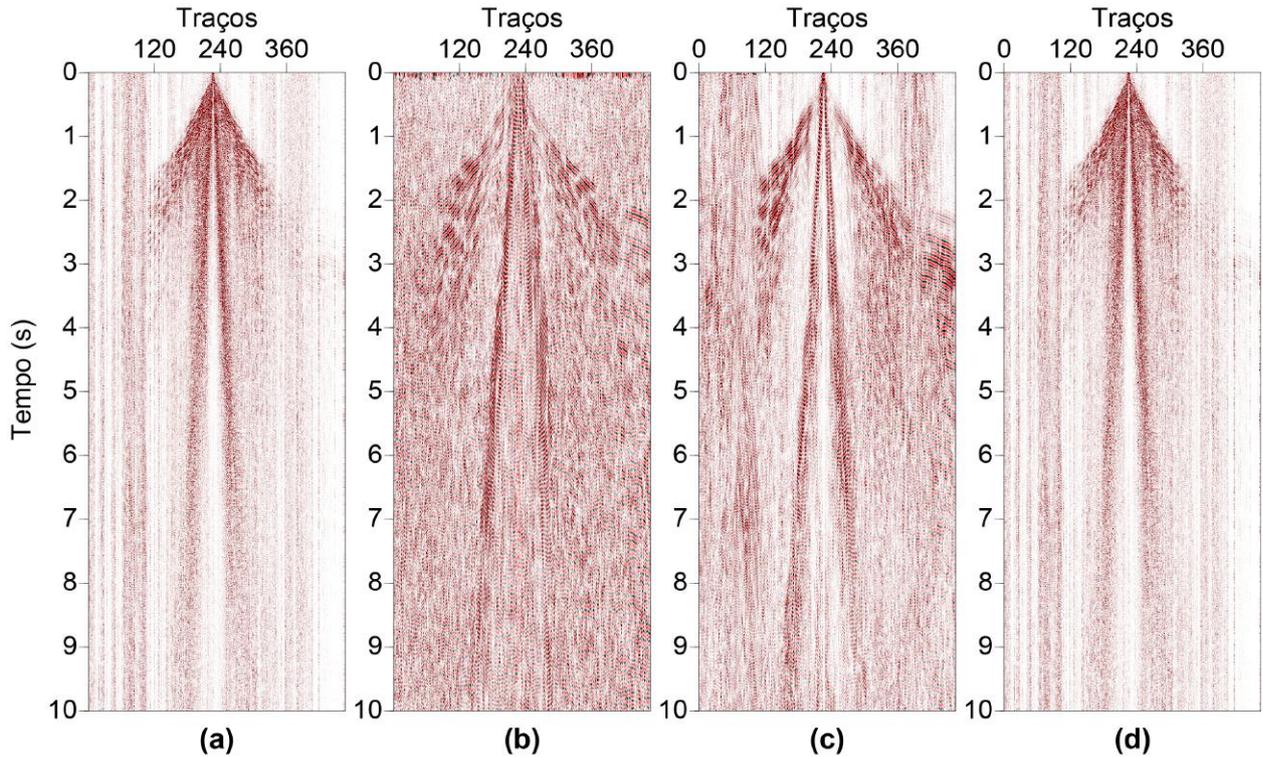


Figura 2.15: Filtragem de uma família de tiro comum: (a) família de tiro comum original; (b) resultado após aplicação do RI-SSA no domínio do tempo; (c) resultado do RI-SSA no domínio da frequência usando (b) como dado de entrada; (d) resíduo entre resultado apresentado em (c) e dado original apresentado em (a).

a decomposição da matriz, guardamos os valores de \mathbf{B} em $\tilde{\mathbf{D}}$. Em paralelo, montamos uma matriz de contagem \mathbf{C} , com o objetivo de manter um controle de quantas vezes a amplitude na posição ij foi filtrada, como podemos ver na Figura 2.17, para o caso de uma matriz 8×8 . Após a aplicação da filtragem em todo o sismograma, dividimos o valor das amplitudes resultantes de $\tilde{\mathbf{D}}$ pelos valores das mesmas posições ij da matriz \mathbf{C} , conforme mostra a Figura 2.17.

Para ilustrarmos o efeito deste operador, foram feitas duas aplicações da filtragem, utilizando como dado o tiro 39 da Bacia do Tacutu filtrado utilizando o balanceamento espectral baseado no SSA. A escolha de um tiro filtrado se deu para que pudéssemos observar com maior facilidade as implicações da filtragem proposta nesta seção. Os parâmetros utilizados para o primeiro exemplo foram $Lx = 4$ e $Ly = 2$, e para o segundo exemplo, utilizamos os parâmetro $Lx = 2$ e $Ly = 4$. Estes exemplos foram escolhidos com o intuito de compreendermos o funcionamento deste filtro a depender da dimensão de sua janela adaptativa. Podemos observar que a Figura 2.18 limitou o dado entre 2,5 e 3,5 segundos, a fim de vermos os resultados em uma escala de detalhe. A Figura 2.18a mostra o tiro 39 filtrado utilizando o SW-SSA (*spectral whitening SSA*), que foi utilizado como dado de entrada. A Figura 2.18b

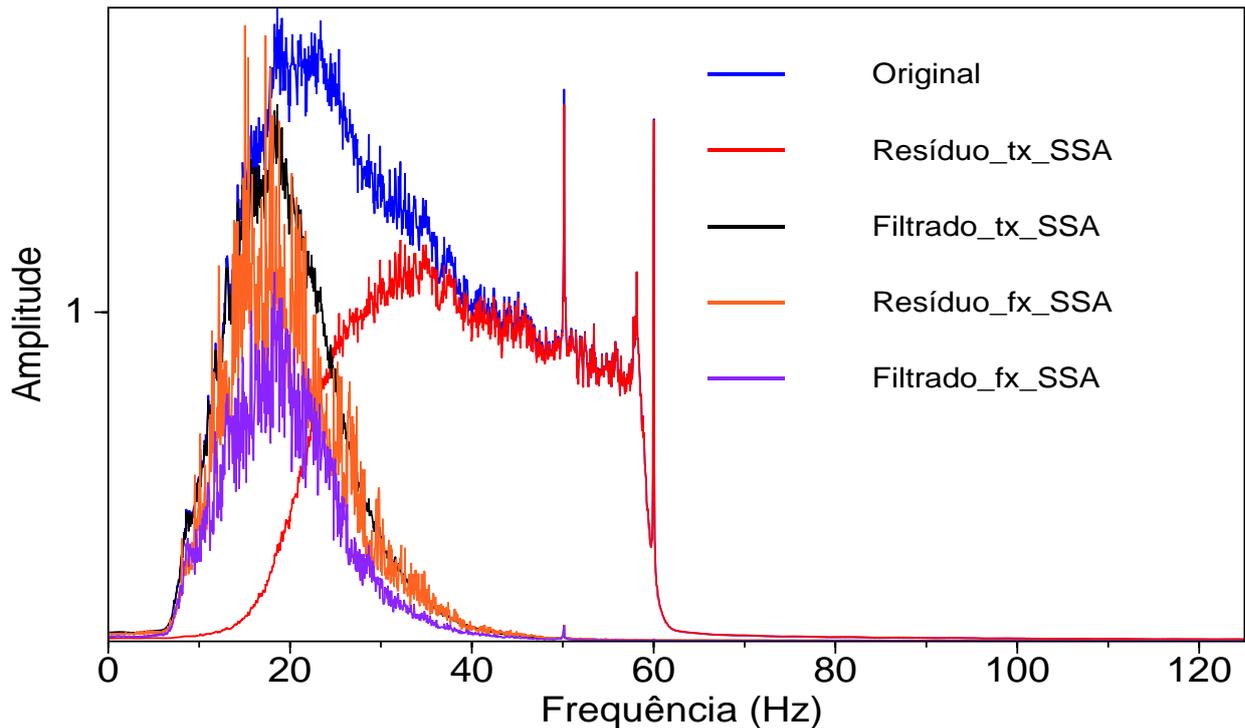


Figura 2.16: Espectros de amplitude média relacionados com as Figuras 2.14 e 2.15: original em azul; resíduo entre filtragem RI-SSA no domínio do tempo e original em vermelho; resultado da filtragem RI-SSA em preto; resíduo entre filtragem RI-SSA no domínio da frequência e seu dado de entrada (filtragem no domínio do tempo) em laranja; e resultado do RI-SSA no domínio da frequência utilizando a filtragem anterior como dado de entrada.

mostra o resultado da filtragem utilizando um operador de tamanho 3×5 . Podemos notar um dado mais com uma aparência mais suave, onde os refletores possuem uma maior continuidade lateral em relação à primeira figura. Ruídos subverticais que antes apareciam no dado de entrada foram quase que totalmente suprimidos após a filtragem proposta. Apesar disso, vemos que este tipo de filtragem preserva bastante eventos subhorizontais quando observamos o refletor entre os traços 45 e 60, entre 3,1 e 3,2 segundos. Notamos que este, antes um refletor quase que inclinado se encontra agora “quebrado” no dado filtrado. Isto ocorre devido ao fato de a filtragem reforçar o máximo possível os eventos subhorizontais. Já a Figura 2.18c apresenta o resultado do operador de tamanho 5×3 , onde notamos também um aumento de coerência lateral quando comparamos com o dado original (Figura 2.18a). Podemos dizer que os resultados na Figura 2.18b e na Figura 2.18c são bastante parecidos, porém, analisando os refletores com maior cuidado, como por exemplo o refletor entre os traços 45 e 75, e entre 3,4 e 3,5 segundos, vemos que em 2.18c, este não se apresenta tão contínuo quanto em 2.18b. Este fenômeno denota que, apesar de ainda preservar os eventos subhorizontais, se aumentarmos o tamanho horizontal do operador, aumentamos a eficácia na preservação e reforço dos eventos lineares. Podemos notar também que na Figura 2.18c

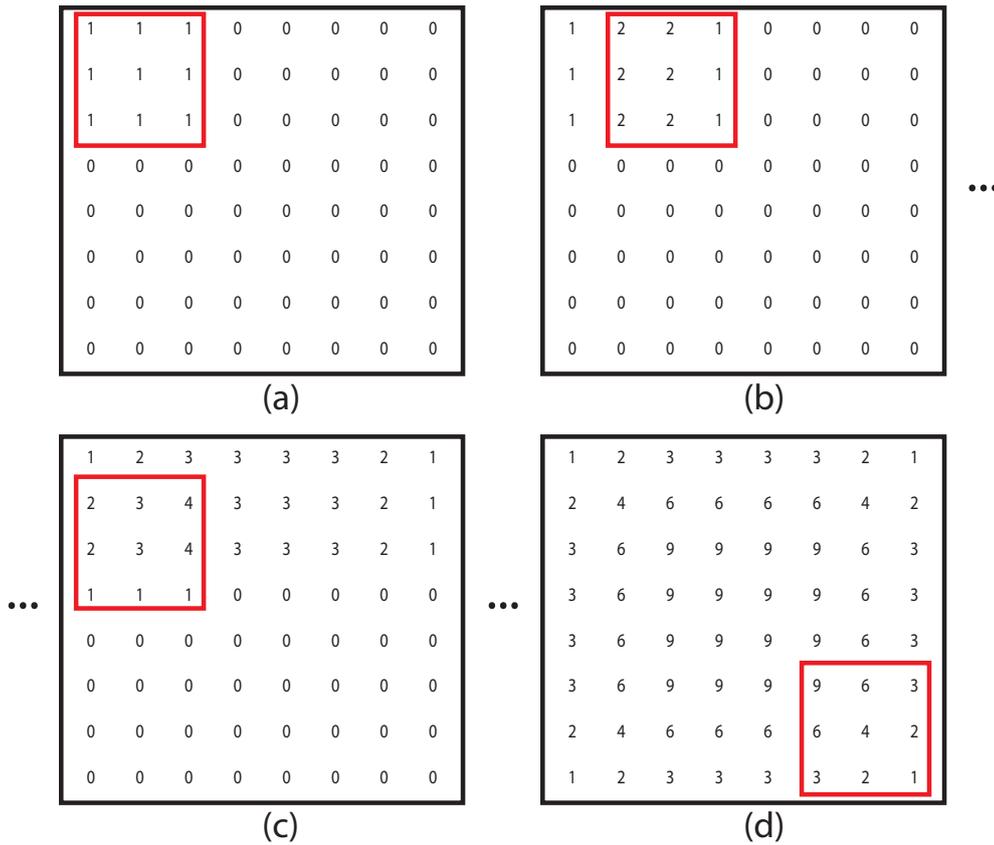


Figura 2.17: Exemplo da matriz de contagem \mathbf{C} de dimensão 8×8 , utilizando um operador de filtragem, representado pelo quadrado vermelho, de ordem 3×3 . Nesta imagem vemos quatro momentos: (a) início da filtragem, onde cada ponto do operador foi filtrado uma vez; (b) passo seguinte a (a), onde algumas amplitudes já são filtradas duas vezes; (c) após a filtragem da primeira linha inteira, o operador passa para a próxima linha, reiniciando a contagem; (d) após a passagem do operador em todo o dado, podemos notar como a porção central do dado foi filtrada mais vezes em comparação com outras regiões do dado.

tivemos uma maior perpetuação dos eventos subverticais, quando comparada com a Figura 2.18b. Portanto, vemos que quanto maior o operador na direção do tempo (horizontal) maior a o reforço dos eventos subhorizontais. Contudo, vimos que caso utilizemos um operador demasiadamente grande, iremos criar falhas nos refletores, como discutido anteriormente. Desta forma, é necessário que encontremos um meio termo para o tamanho do operador, a fim de que aumentemos a razão sinal/ruído do nosso dado sem inserir ruídos e artefatos no dado.

2.3.2 SVD Adaptativo no domínio f-x

Assim como os filtros anteriores, o filtro apresentado nesta seção é bastante análogo ao filtro apresentado na seção 2.3.1. A principal diferença para esta seção é o dado, antes no

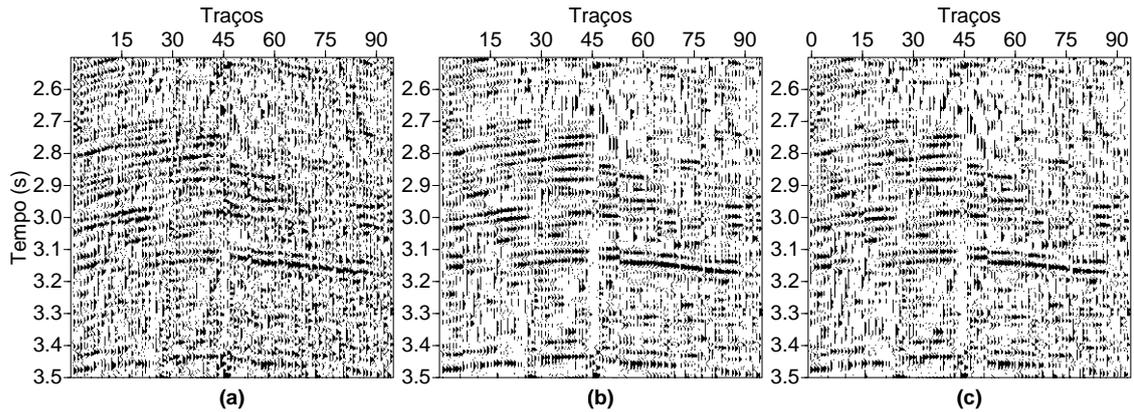


Figura 2.18: Comparação de um intervalo do tiro 39 da Bacía do Tacutu, entre 2,5 e 3,5 segundos. A figura é subdividida em: (a) - tiro após a filtragem SW-SSA; (b) - filtragem SVD adaptativo no domínio t-x utilizando operador 3×5 ; (c) - filtragem utilizando operador 5×3 .

domínio t-x, ser transformado através da transformada de Fourier de cada traço sísmico para o domínio f-x. Conseqüentemente, todas nossas rotinas devem estar adaptadas para tratar dados complexos. Para isto, foi necessária a adaptação dos nossos programas uma vez aplicados no domínio t-x para a aplicação no domínio f-x.

Assim como o SVD adaptativo no domínio t-x, o SVD no domínio f-x também opera em janela móvel \mathbf{B} de ordem $(2Lx + 1 \times 2Ly + 1)$. Para cada vez que a amplitude na posição ij é filtrada, a matriz \mathbf{C} é atualizada. Este processo pode ser melhor observado com o exemplo da Figura 2.17. O operador SVD adaptativo tem como propriedade o aumento da coerência das frequências entre os traços vizinhos (os quais representam traços de afastamento próximo). Eventos coerentes tendem a ter uma frequência característica dentro do dado, e geralmente se espalham em traços vizinhos. Temos como exemplo as reflexões sísmicas, que em partes mais rasas do sismograma apresentam frequências mais altas, e em regiões mais profundas, possuem frequências mais baixas. Estas reflexões se espalham por traços vizinhos. Através do operador adaptativo, podemos reforçar as frequências entre estes traços, criando este aumento na coerência lateral no sismograma.

Para ilustrarmos o resultado deste filtro, escolhemos operadores das mesmas ordens que os utilizados na seção 2.3.1. Faremos testes utilizando operadores de ordem (5×3) e (3×5) . Para estes testes, escolhemos novamente o tiro 39 da Bacía do Tacutu após filtragem SSA-SW.

Na Figura 2.19b (operador 3×5) podemos observar um aumento na continuidade lateral do dado, além de um reforço nas amplitudes das reflexões, quando comparadas com as reflexões presentes na Figura 2.19a. Devido ao fato deste filtro atuar no domínio da frequência, e não no domínio do tempo, como na seção 2.3.1, vemos que as curvaturas das reflexões

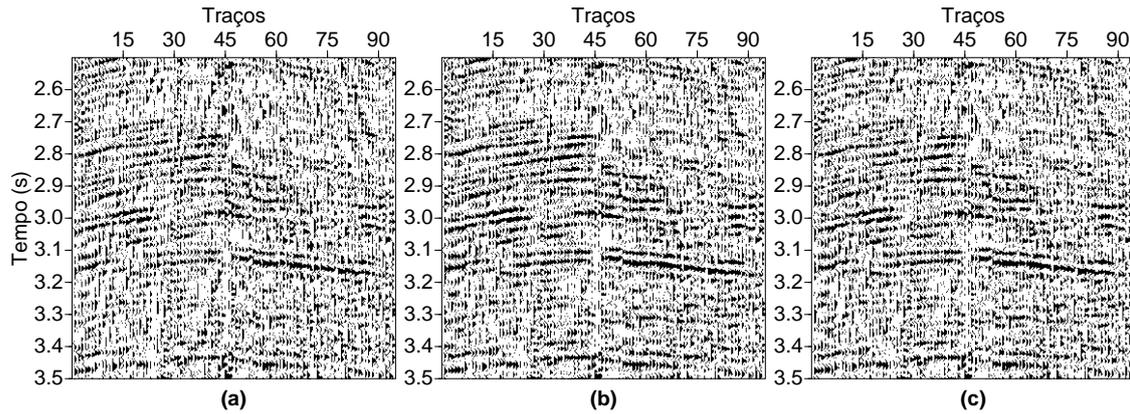


Figura 2.19: Comparação de um intervalo do tiro 39 da Bacia do Tacutu, entre 2,5 e 3,5 segundos. A figura é subdividida em: (a) - tiro após a filtragem SW-SSA; (b) - filtragem SVD adaptativo no domínio fx utilizando operador 3×5 ; (c) - filtragem utilizando operador 5×3 .

são mais bem preservadas, mostrando que este filtro não força lateralmente nenhum evento. Vamos analisar o mesmo evento que foi mencionado na seção 2.3.1, entre os traços 45 e 60 e entre 3,1 e 3,2 segundos. Vemos que a reflexão se mostra mais contínua, com suas amplitudes reforçadas, porém não vemos a “quebra” do refletor como observado no resultado do SVD adaptativo no domínio do tempo. Esta maior preservação dos eventos ocorre pelo fato de atuarmos no domínio da frequência, onde o filtro retira uma maior coerência das frequências com seus traços adjacentes. Como a janela do operador é relativamente pequena quando comparada com o tamanho do dado (3×5 contra 1001×94), a frequência contida no operador que tiver uma coerência lateral, ou seja, que se apresente da mesma forma nos traços adjacentes no operador, será correspondente a um evento subhorizontal, neste caso, um refletor. Desta forma, obtemos um aproveitamento maior utilizando o operador 3×5 no domínio da frequência. Já na Figura 2.19c observamos o resultado do operador 5×3 no domínio da frequência. Assim como na seção 2.3.1, este resultado é bastante parecido com o que obtivemos na Figura 2.19b. Como diferença entre os resultados, podemos ver a nível de detalhe o refletor que ocorre entre os traços 45 e 90, entre 2,5 e 2,6 segundos, onde em 2.19b este se apresenta mais contínuo, quando comparado com 2.19c. Podemos observar este mesmo fenômeno no conjunto de reflexões entre os traços 1 e 30, e entre 2,9 e 3,1 segundos, onde os refletores presentes na Figura 2.19c se apresentam menos contínuos quando comparados com os refletores da Figura 2.19b. Porém, as amplitudes do resultado de 2.19c se apresentam bastante reforçados, mostrando que é importante que haja uma abertura horizontal relevante no operador do filtro. Em ambos os resultados do SVD adaptativo no domínio da frequência os eventos subverticais se apresentaram da mesma forma, sem uma atenuação mais efetiva.

3

Resultados do processamento sísmico da Bacia do Parnaíba

Neste capítulo falaremos algumas considerações gerais sobre a Bacia do Parnaíba, além de discutirmos as metodologias empregadas e os resultados obtidos através destas metodologias. Ao final do capítulo iremos conjecturar sobre o que podemos observar com os resultados obtidos ao focarmos o processamento na parte profunda do dado regional.

3.1 Bacia do Parnaíba - Considerações gerais

3.1.1 Localização

Localizada no Nordeste do Brasil, a Bacia do Parnaíba tem uma área de mais de 600,000 km^2 , e é uma das três maiores bacias sedimentares do fanerozóico na parte norte da América do Sul (as outras duas são bacia do Paraná e bacia do Amazonas), estando entre os cratons Amazônico e do São Francisco (Almeida et al., 1981; Brito Neves e Fuck, 2013; Cordani et al., 2013; Góes et al., 1990). Encontra-se inserida na plataforma Sul-Americana, sobreposta a um embasamento cristalino cratonizado após o término do evento Brasileiro, datado entre o fim do Proterozóico e início do Cambriano.

Estes blocos estão separados por limites inclinados os quais fazem a separação de padrões de sismofácies, que mudam abruptamente e se estendem pela crosta. No bloco Oeste, as rochas do supergrupo Araguaia se sobrepõem ao cráton Amazônico. Ambos terminam na margem Oeste do bloco do Parnaíba, na Zona de Falha do Araguaia, do inglês *Araguaia Fault Zone* (AFZ). Um segundo limite crustal define o limite entre a margem Leste do bloco

do Parnaíba e a margem Oeste da província da Borborema. Este limite é interpretado como uma extensão da zona de transcorrência do Trans-Brasiliano, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ) (Daly et al., 2014).

Porém, com a distância dos grandes centros de pesquisa, poucos dados foram coletados, se compararmos com outras bacias exploradas no Brasil. Dessa forma, existe um grande debate sobre o mecanismo de formação e história tectônica, mas sem nenhum consenso (Sloss e Scherer, 1975; Sleep e Snell, 1976; Hartley e Allen, 1994; Downey e Gurnis, 2009; Crosby et al., 2010; Armitage e Allen, 2010).

3.1.2 Principais sequências

O embasamento arqueano da Bacia do Parnaíba foi delimitado com base nos estudos de geologia de campo e poços exploratórios feitos pela Petrobras. Constituído de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, essas rochas possuem idades que vão do Arqueano ao Ordoviciano. Pode haver também a ocorrência de rochas neoproterozoicas e eopaleozoicas, que correspondem ao tempo de consolidação da Plataforma Sul-Americana (Vaz et al., 2007). As unidades sedimentares que compõem o embasamento são as formações Riachão e o Grupo Jaibaras.

A bacia possui três principais sequências deposicionais, que correspondem aos Grupos Serra Grande, Canindé e Balsas. Todos esses grupos citados foram depositados em um regime de sinéclise e foram, em sua maioria, depositados em um ambiente fluvial. Nessas grandes sequências, existe a predominância de sedimentação siliciclástica com algum magmatismo. No Grupo Balsas existe também a ocorrência de sedimentação carbonática.

A sequência Siluriana (Grupo Serra Grande) possui as Formações Ipu, Tianguá e Jaicós. A Formação Ipu é composta por arenitos com seixos e conglomerados com matriz argilosa. A Formação Tianguá tem o prevaletimento de folhelhos cinzas. Na Formação Jaicós predominam arenitos grossos mal selecionados. O término da sedimentação do Serra Grande é marcado pela Orogenia Caledoniana, segundo Góes et al. (1990).

A sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera - Grupo Canindé - é composta pelas Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. A Formação Itaim é composta por arenitos finos a médios, com intercalação de folhelhos. A Formação Pimenteiras é composta por folhelhos escuros. Na Formação Cabeças, há o predomínio de arenitos de ambiente plataformal. A Formação Longá também consiste de folhelhos escuros, assim como a Formação Pimenteiras. Já a Formação Poti é composta por arenitos com lâminas de siltitos (Góes e Feijó, 1994). O encerramento desta sequência é marcado pela discordância regional associada à

Orogenia EoHerciniana (Góes et al., 1990).

A última das três sequências principais, a Neocarbonífera-Eotriássica, conhecida como Grupo Balsas, é composta pelas Formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. A Formação Piauí possui uma predominância de arenitos intercalados com folhelhos. A Formação Pedra de Fogo detém uma certa variedade de deposições, com ocorrência de sílex, calcário, estromatólitos intercalados com arenito, folhelho, siltito, anidrita e por vezes dolomito. A Formação Motuca é composta por siltitos, arenitos e folhelhos, além de pequenas ocorrências de anidrita e calcários. Na Formação Sambaíba, predominam arenitos bem selecionados.

Além destas sequências, vale também citar as Formações Riachão (Neoproterozóico) e Itapecuru (Cretáceo), que ocorreram durante o rifteamento dos continentes Rodínia e Gondwana, respectivamente e possuem uma sedimentação continental. Apesar de deposições relativamente breves, ambas possuem espessuras consideráveis. A Formação Riachão, juntamente com a Formação Jaibaras compõe o embasamento da bacia, preenchendo estruturas grabeniformes (Fernandes, 2011). Já a Formação Itapecuru é constituída de arenitos com algumas ocorrências de pelitos e arenitos conglomeráticos.

Como dito anteriormente, houve ocorrências de magmatismo durante todo o processo de formação da Bacia do Parnaíba. Porém, duas formações se destacam: Mosquito (EoJurássico) e Sardinha (Neocretáceo). Essas duas formações possuem rochas ígneas intrusivas e extrusivas de composição básica, que se diferenciam quanto a sua ocorrência. A Formação Mosquito é caracterizada por grandes derrames e pequenas soleiras. Já a Formação Sardinha possui grandes diques e pequenas soleiras (Fernandes, 2011).

3.2 Processamento da linha regional RL001

Visando demonstrar a eficiência dos métodos de filtragem propostos baseados no RA-SSA, foi escolhida a linha regional RL001, da bacia do Parnaíba. Com mais de 1.400 km de extensão e 20 segundos de registro, a aquisição vai desde o cráton Amazônico até a província da Borborema (Daly et al., 2014), cruzando toda a bacia (Figura 3.1). O processamento deste dado se mostrou um grande desafio devido ao grande volume de dados, aproximadamente 800 GB.

Este volume é bastante particular para um dado 2D, devido ao seu *gran range* de *offset*, de -12000 m a -50 m e de 50 m a 12000 m. Dois terços da aquisição foram feitos utilizando 480 grupos de receptores, espaçados em 50 m. O terço final foi adquirido utilizando 960 grupos de receptores, espaçados entre si em 25 m. Apesar da variação da quantidade de grupos de receptores, a distância entre tiros foi mantida durante toda a campanha: 50 m.

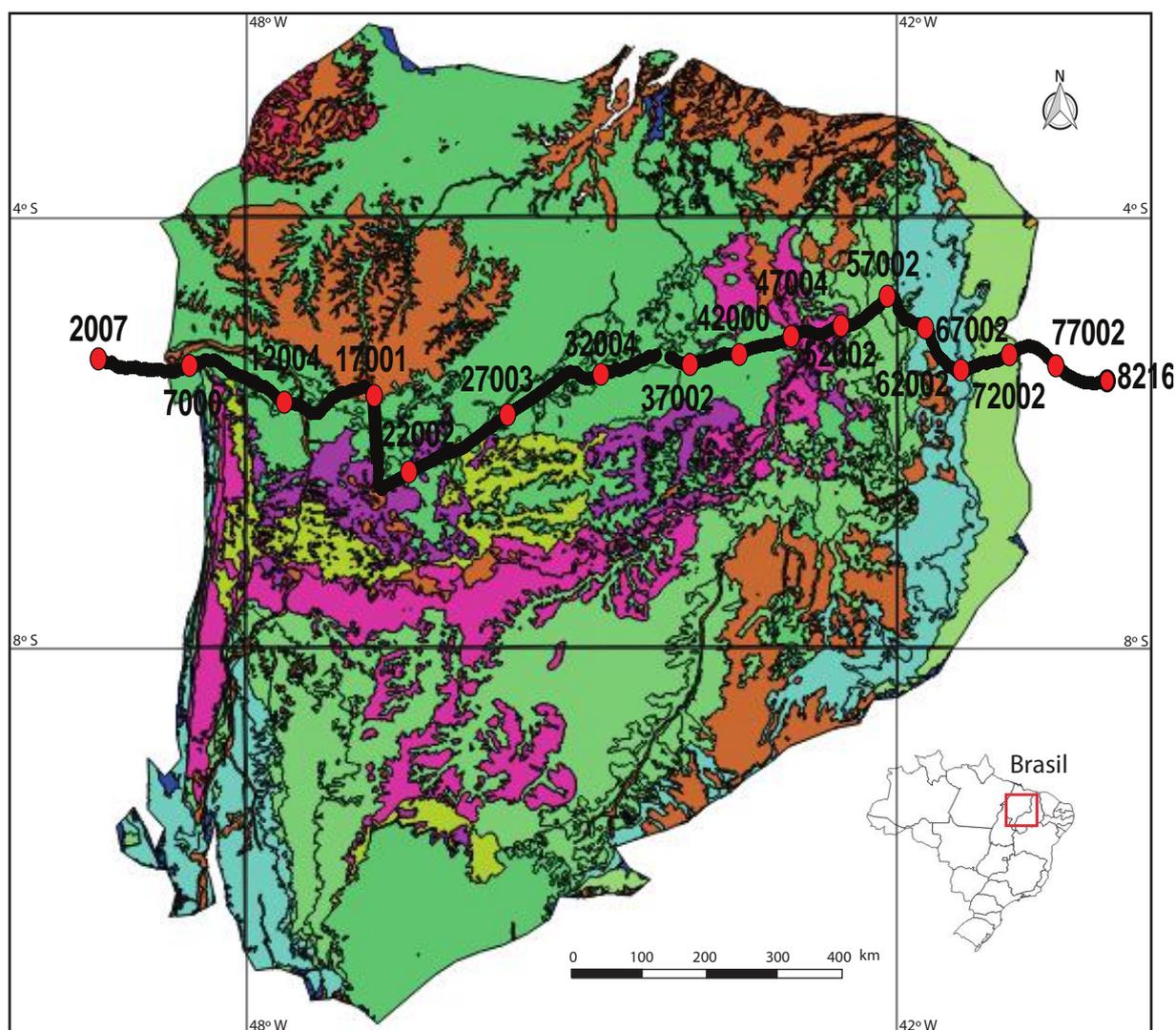
| Parâmetro de aquisição | Reflexão | Dimensão |
|----------------------------|----------|----------|
| Intervalo de receptores | 50 | (m) |
| Intervalo de fonte | 50 | (m) |
| Número de canais | 480/960 | |
| <i>Offset</i> máximo | 12,000 | (m) |
| Número de <i>sweeps</i> | 2 | |
| Duração de <i>sweep</i> | 24 | (s) |
| Tempo de registro | 20 | (s) |
| Intervalo de amostragem | 2 | (ms) |
| Frequência de <i>sweep</i> | 6-60 | (Hz) |
| Cobertura CDP | 240 | |
| Pico de força/vibração | 27.200 | (kg) |
| Número de vibradores/frota | 4 | |
| Força total/ <i>sweep</i> | 109.000 | (kg) |

Tabela 3.1: Tabela com parâmetros de aquisição da transecta sísmica regional. Retirado e traduzido de Daly et al. (2014).

Como resultado destes parâmetros, a cobertura máxima de 240 traços foi mantida durante toda a aquisição. Toda a aquisição foi feita em um arranjo *split-spread* simétrico utilizando como fonte caminhões *vibroiseis*.

Toda a linha de aquisição acompanhou a lateral de estradas rodoviárias. Devido a todas essas particularidades, é esperado um nível bastante alto de ruído, como *ground-roll*, eventos lineares e ruídos ambientais. Também, visando obter uma imagem em grandes profundidades, e considerando o grande volume de dado (20 segundos de tempo de registro com intervalo de amostras de 2 ms), um dos primeiros passos foi diminuir a quantidade de amostras do dado para 4 ms de intervalo. Nós acreditamos que com 4 ms de amostragem não haverá grandes perdas na qualidade final da imagem sísmica, e faria toda a parte de processamento de dados ser mais rápida. Mais detalhes sobre a aquisição estão disponíveis na Tabela 3.1.

Como observado na Figura 3.3a, o dado em questão está altamente contaminado com diversos tipos de ruído, como ruído ambiental, aleatório, e de superfície. Desta forma, é bastante difícil de localizar reflexões, especialmente abaixo de 3 segundos, e devido ao nível de ruído detectado, é necessário um fluxograma de processamento robusto para que possamos obter uma imagem empilhada final de boa qualidade. Na família de tiro comum, na Figura 3.3a, podemos ver o quão ruidoso é o nosso dado. Após todos os procedimentos, é possível observar que o ruído ambiental, que antes era bastante presente em nosso dado, foi bastante atenuado, como podemos ver nas Figuras 3.3b e 3.3c. Apesar de neste tiro não haver muitos refletores, podemos observar que particularmente o ruído ambiental foi atenuado.



Legenda

| | | | | |
|---|----------------|-----------|-------------|--------------|
| — | Linha regional | Neógeno | Triássico | Siluriano |
| • | Número CMP | Paleógeno | Permiano | Ordoviciano |
| | | Cretáceo | Carbonífero | Cambriano |
| | | Jurássico | Devoniano | Proterozóico |

Figura 3.1: Mapa da Bacia do Parnaíba com a transecta regional disposta sobre o mapa.

3.2.1 Parte rasa

Como o propósito desta sessão é a parte rasa da bacia, ao invés de utilizarmos 480 canais de receptores, utilizaremos apenas os 200 mais centrais de cada um dos tiros. Além da utilização apenas dos canais centrais, foi escolhido que utilizaríamos apenas os 5 primeiros segundos dos tempos de registro do dado. O intervalo CDP escolhido para apresentação deste trabalho foi entre 35.989 e 40.638.

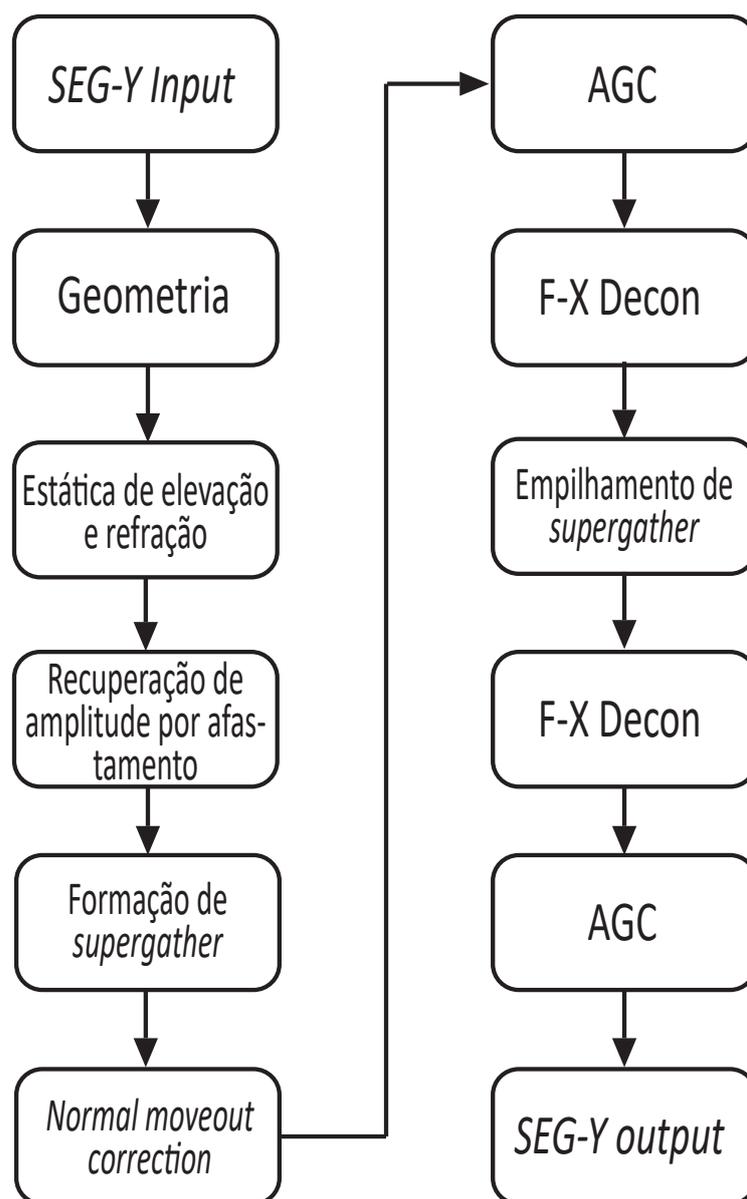


Figura 3.2: Passos do fluxograma de processamento aplicado para a parte rasa da Bacia do Parnaíba.

Após vários testes para encontrar o melhor fluxo de processamento para obtenção da seção empilhada de maior qualidade, chegou-se ao fluxograma apresentado na Figura 3.2. Primeiro foi carregado o dado no *software*, seguido do carregamento da geometria. A correção estática foi aplicada, seguida do módulo de recuperação de amplitude por afastamento do SeisSpace *offset-amplitude recovery* (OAR), utilizado para correção de divergência esférica. A aplicação deste módulo teve como propósito um melhor balance de amplitudes por todo o dado. Para o OAR neste estágio, assim como a correção NMO, em estágios mais avançados do fluxo, o campo de velocidades utilizado foi o mesmo, o que significa que este campo foi obtivo previamente.

Após este procedimento inicial, o método de balanceamento espectral proposto foi aplicado utilizando subrotinas em código FORTRAN. Essas subrotinas foram aplicadas em conjunto com o pacote gratuito de processamento Seismic Unix. Por causa da relativa baixa cobertura CMP - apenas 50 traços -, e baixa razão sinal/ruído, *supergathers* foram construídos como forma de atenuação de ruídos aleatórios e de reforço de eventos coerentes como reflexões. Como lado negativo, temos que, os *supergathers* também reforçam ruídos coerentes. Entretanto, analisando as perdas e ganhos, foi considerado positivo o uso da construção de *supergathers*. Após isso, a correção NMO foi aplicada, seguida do f-x Decon, para um aumento da coerência lateral. Seguindo o fluxograma, o dado foi empilhado, e assim, mais um f-x Decon foi aplicado para um aumento da continuidade lateral do dado final. Após todos estes processos, foi aplicado um ganho AGC, de janela de 1 segundo, seguido da conversão do dado para SEG-Y. Para uma melhor referência visual, pode-se observar os passos do processamento em forma de fluxograma na Figura 2.6. Todos os processos, com exceção dos filtros em códigos FORTRAN, foram aplicados no *software* comercial SeisSpace ProMAX, da Landmark. Para efeitos de comparação, o mesmo fluxo foi empregado para a filtragem baseada em Fourier, com a finalidade de compararmos a seção empilhada original, obtida pelo método proposto, e obtida com a metodologia tradicional.

O método SSA foi aplicado em um tiro, mostrado na Figura 3.3a. Para a aplicação do método, foi escolhido um número $N = 12$ autotraços a serem decompostos. Após a decomposição, o AGC foi aplicado nos autotraços de índice 4 a 7, devido a sua banda de frequência se encaixar no intervalo de 8 a 60 Hz, considerado um intervalo de banda de frequência útil para o processamento. Os resultados desta filtragem são mostrados na Figura 3.3b.

Na Figura 3.4, temos em preto o espectro de amplitude preto correspondente ao dado da Figura 3.3a, e em azul, o espectro de amplitude correspondente à Figura 3.3b. Vemos uma atenuação da baixa frequência, em relação ao dado original, enquanto que a parte da alta frequência ficou mais amplificada. Apesar da atenuação da baixa frequência, notamos um pico de baixa frequência ainda presente no dado. Em tentativas de uma maior atenuação, foi visto que a qualidade do dado filtrado diminuía bastante ao atenuar ainda mais a baixa frequência, por isso não a preservação deste pico. Podemos ver uma predominância de baixa frequência (*ground roll*) na Figura 3.3a, enquanto que na Figura 3.3b vemos uma atenuação deste ruído e um aumento da resolução das reflexões, justamente pela amplificação da alta frequência.

Como resultado final, temos a comparação entre a seção empilhada original e a seção empilhada filtrada. É válido mencionar que a única diferença entre os fluxos de processamento

entre os dois resultados é o método de filtragem proposto. Todos os outros passos aplicados no *software* SeisSpace foram aplicados em ambos os dados para uma comparação mais justa. A Figura 3.5 mostra a seção empilhada original, enquanto a Figura 3.6 mostra a seção empilhada filtrada. Uma melhor resolução é observada no dado filtrado, em comparação com o original. Vemos a aparição de novos refletores presentes no dado, quando comparamos com o dado original. Estes novos refletores mais evidentes podem ser observados no intervalo de CMPs 36.600 e 37.200, e entre 39.400 e 40.600, e no intervalo de registro de 1 e 2 segundos. É possível observar outros refletores ao longo do dado, porém os citados são os mais evidentes. Além dos novos refletores, notamos uma maior resolução nos refletores, se mostrando mais delgados, em comparação com o dado original. Além disso, vemos uma maior continuidade lateral no dado filtrado, demonstrando a eficiência do filtro proposto para a atenuação de ruídos e aumento de resolução, devido ao aumento das amplitudes da banda de alta frequência.

Para uma melhor visualização, foi aplicado um atributo de amplitude em relevo (Bullhões e Amorim, 2005). Vale lembrar que este atributo é aplicado com o único intuito de visualização, não fazendo nenhum tipo de filtragem no dado. O resultado deste atributo pode ser visto nas Figuras 3.7 e 3.8, mostrando os dados original e filtrado, respectivamente. Neste tipo de visualização, fica mais fácil de perceber o aumento da continuidade lateral do dado e a atenuação do ruído de baixa frequência no dado.

Para uma visualização mais a nível de detalhe, nossa imagem foi cortada a partir dos 3 segundos de tempo de trânsito, mostrando apenas a parte mais rasa. Na Figura 3.9 é possível ver a presença de ruídos de eventos lineares. Já na Figura 3.10, vemos uma imagem com maior conteúdo de alta frequência, quando comparado com o dado original, trazendo por consequência essa maior resolução. Além do aumento de resolução, o ruído linear foi bastante atenuado, melhorando também a continuidade lateral dos refletores, além da aparição de refletores antes mascarados pelo ruído. Para facilitar a visualização destes dados, foi aplicado novamente o atributo de visualização de amplitude em relevo em ambas as figuras, tendo como imagens resultantes as Figuras 3.11 e 3.12, para o dado original e filtrado, respectivamente. Para analisar mais detalhadamente os resultados, foi feito um zoom em dois trechos do dado, conforme visto na Figura 3.13. Em 3.13a e 3.13c vemos uma região da seção empilhada original, com a primeira estando no intervalo de CDP 36.600 a 37.800 e entre os tempos de registro de 0.9 s a 2 s, enquanto que a segunda região está entre o intervalo de CDP 39.500 a 40.600 e dentro do intervalo de registro de 0.7 s a 2 s. É possível observar nas Figuras 3.13b e 3.13d uma quantidade maior de refletores, em comparação com o dado original. Além disso, observamos uma maior continuidade dos refletores, além de um aumento na resolução temporal do dado, devido ao aumento das amplitudes das altas frequências. Deste modo, vemos que o método SSA-SW se mostrou bastante efetivo.

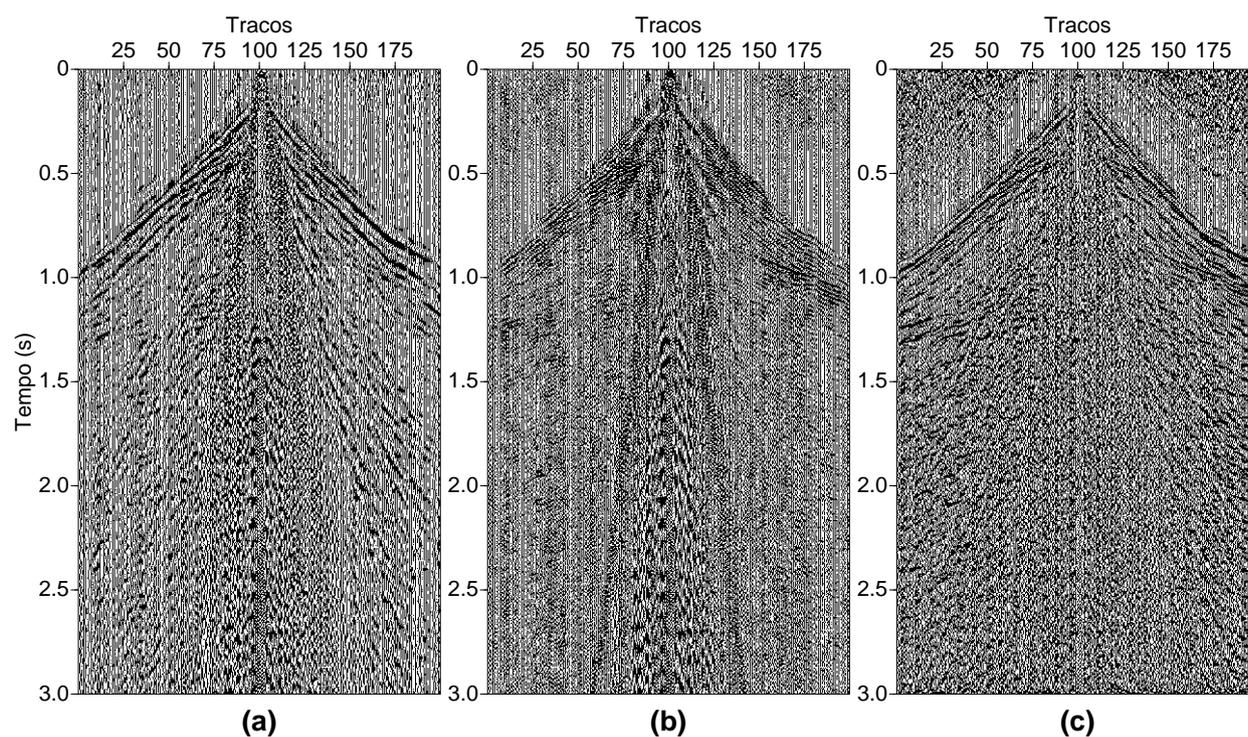


Figura 3.3: Família de tiro comum da Bacia do Parnaíba, cortado em 3 segundos: (a) tiro original; (b) tiro filtrado utilizando o ST-SVD; (c) utilizando o método de balanceamento espectral tradicional.

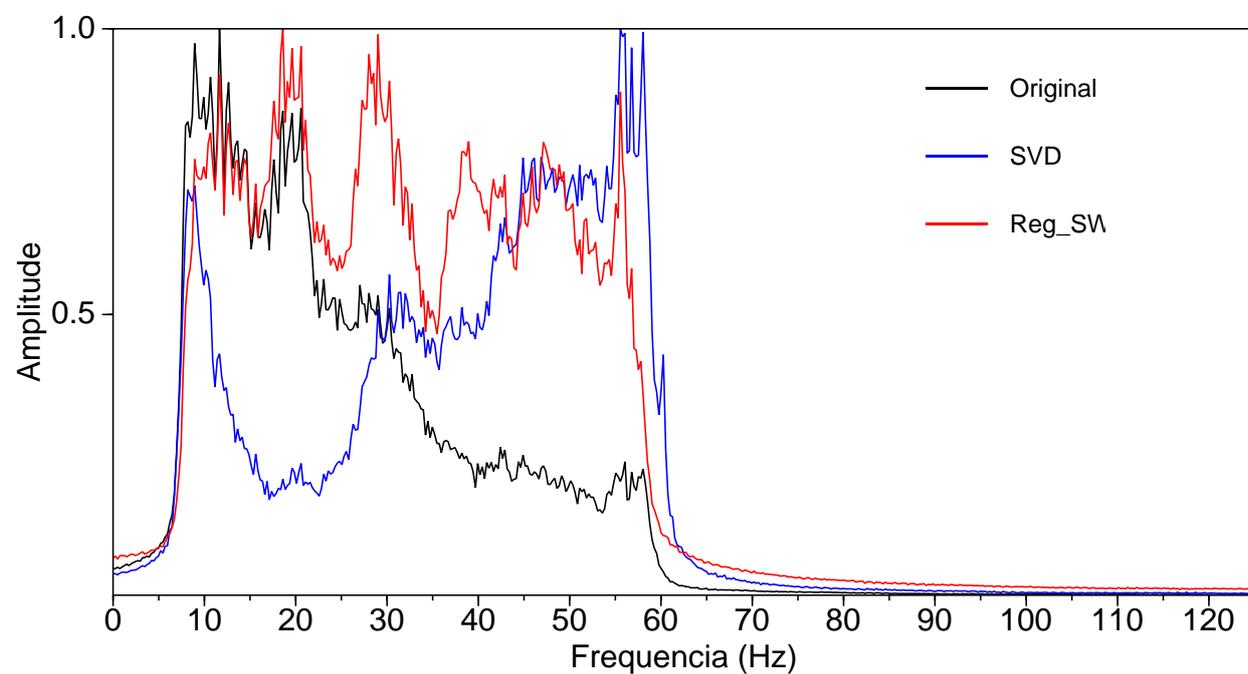


Figura 3.4: Espectro de amplitude médio mostrando em preto o espectro do dado bruto, em azul o espectro de amplitude do dado filtrado pela metodologia proposta e em vermelho filtrado pelo método de balanceamento espectral tradicional.

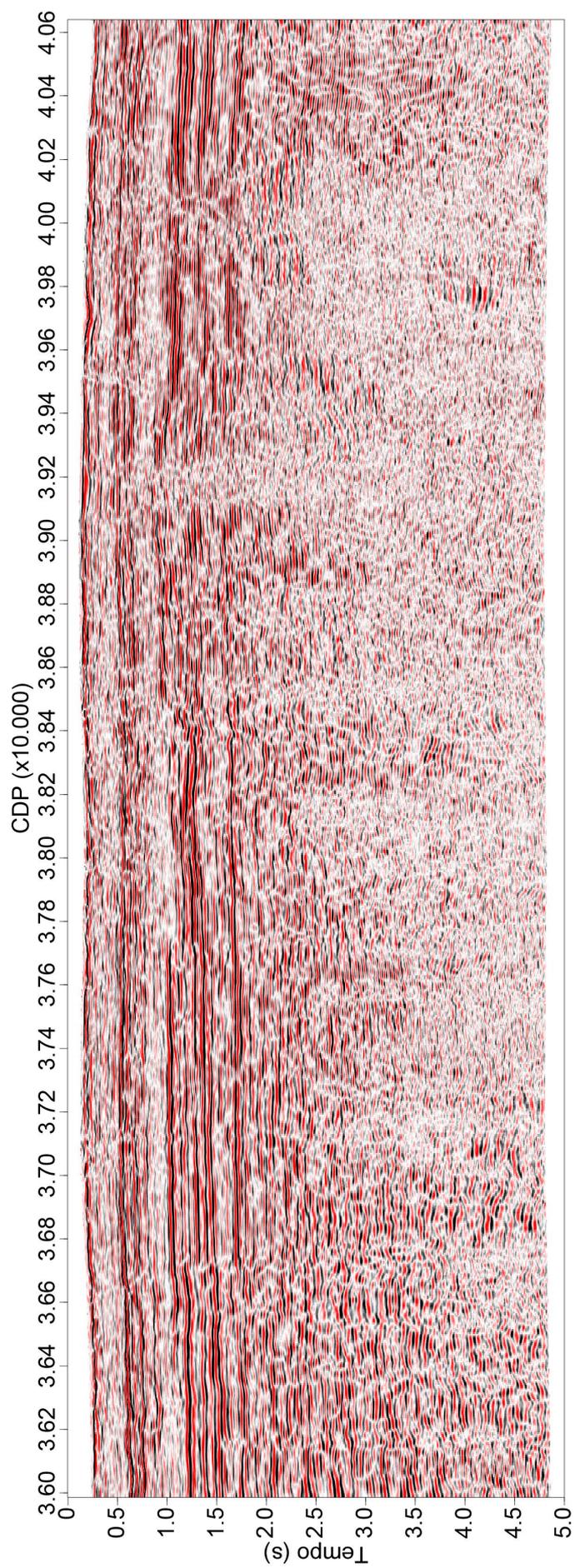


Figura 3.5: Seção empilhada original da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638.

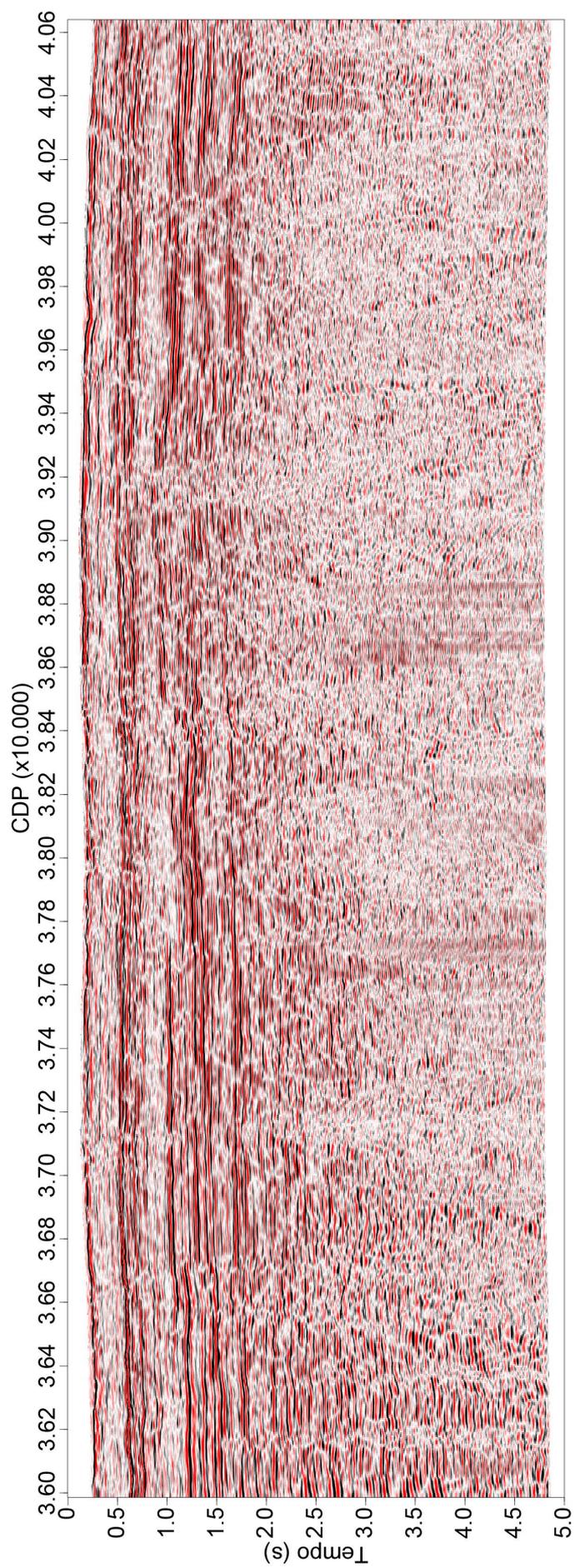


Figura 3.6: Seção empilhada filtrada da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638. Ruídos lineares, como o *ground roll* foi atenuado e a resolução do dado apresenta melhoras.

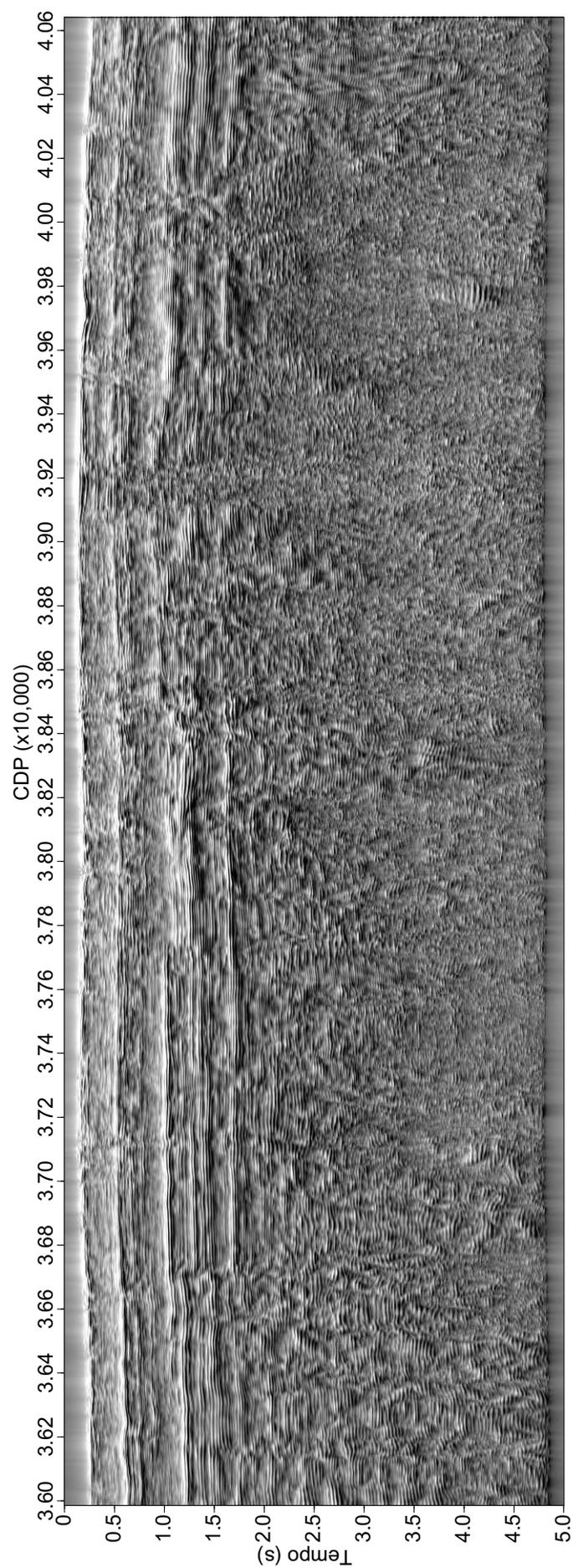


Figura 3.7: Seção empilhada original da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638, utilizando o atributo de relevo de amplitude. Com este modo de visualização, é mais evidente o ruído linear presente e a baixa resolução do dado.

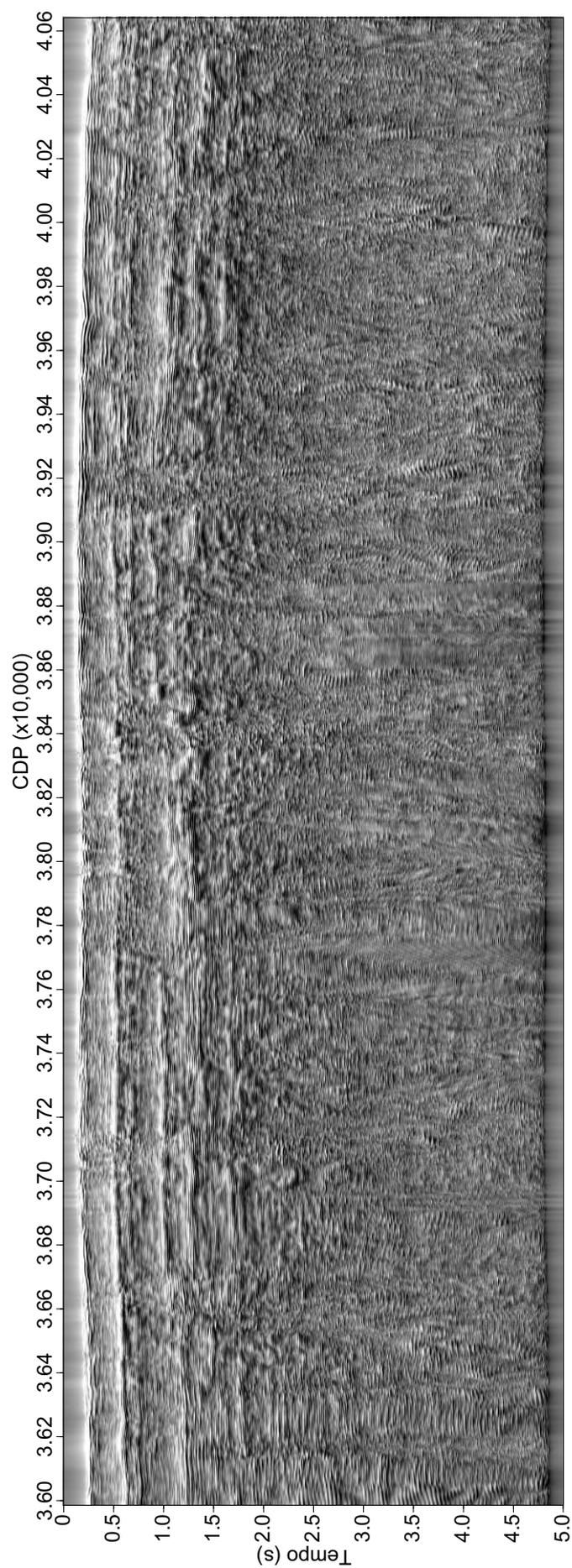


Figura 3.8: Seção empilhada filtrada da linha regional RL001, da Bacia do Parnaíba. Intervalo de empilhamento CMPs de 35988 a 40638, utilizando o atributo de visualização de relevo de amplitude. Com este modo de visualização, vemos com maior facilidade o ruído atenuado e o aumento da resolução do dado.

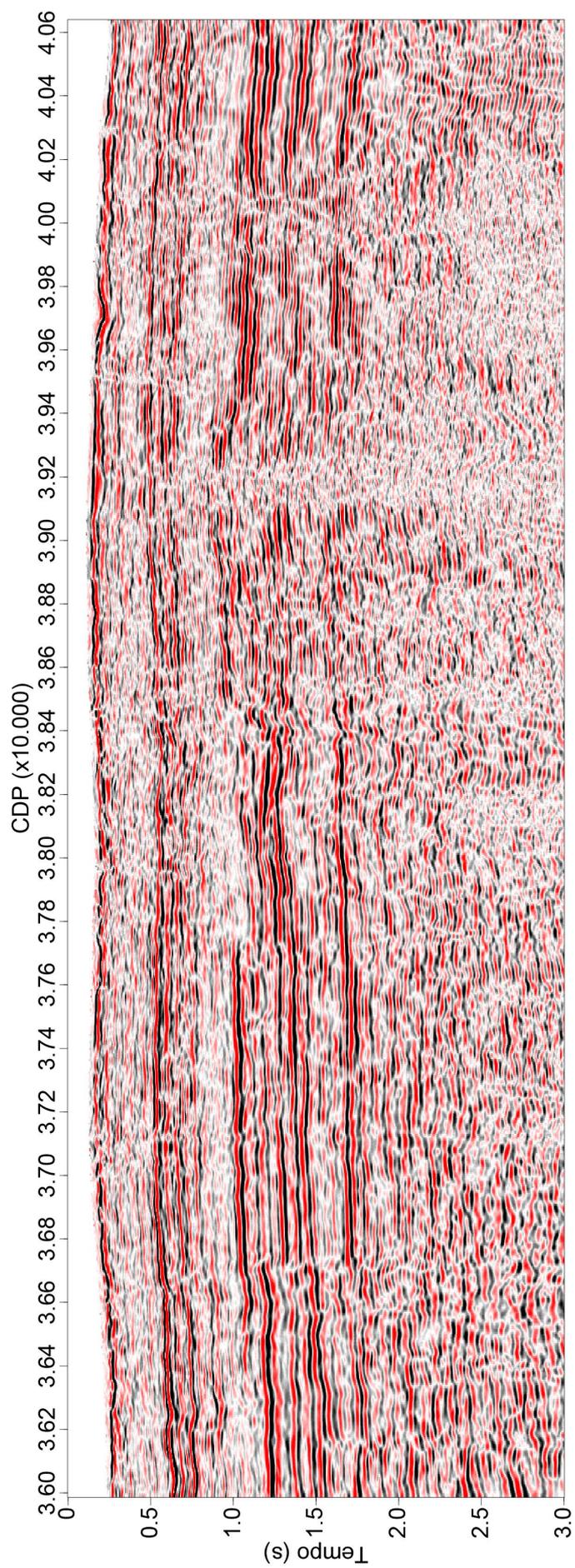


Figura 3.9: Seção empilhada original focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638.

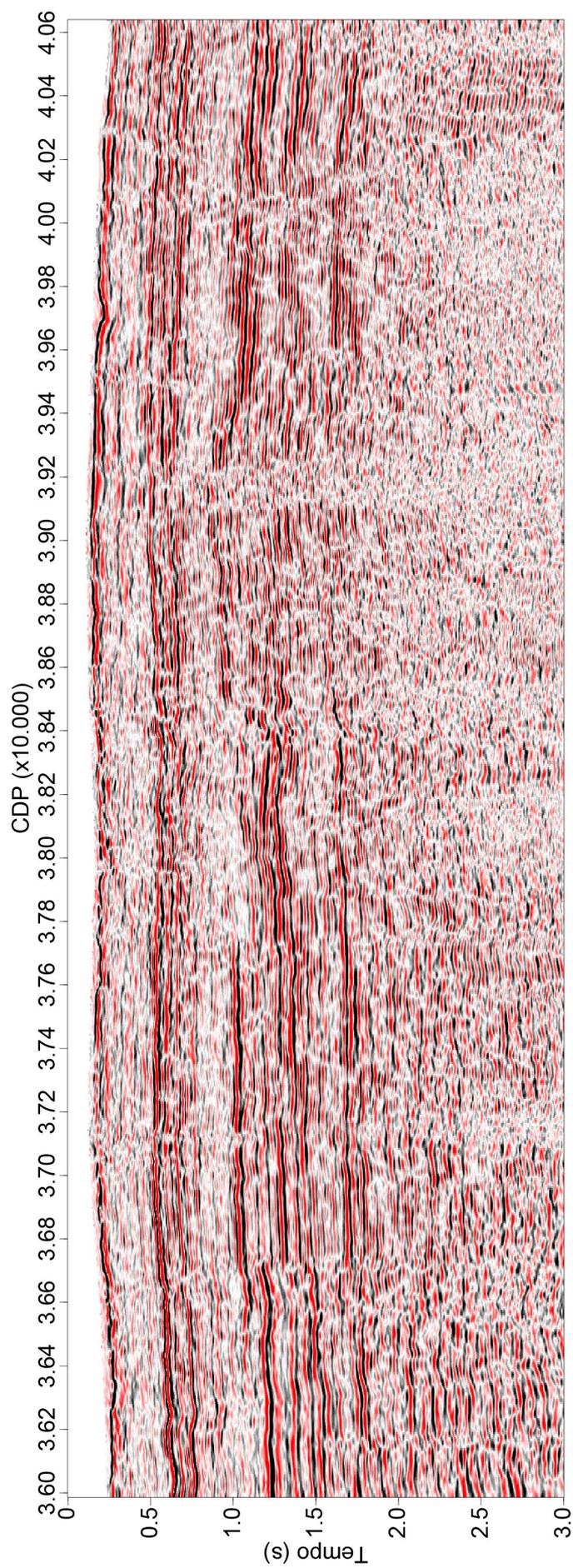


Figura 3.10: Seção empilhada filtrada focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. Nesta figura é possível ver com maior facilidade o aumento da resolução e o aumento da continuidade lateral do dado, quando comparada com a Figura 3.9.

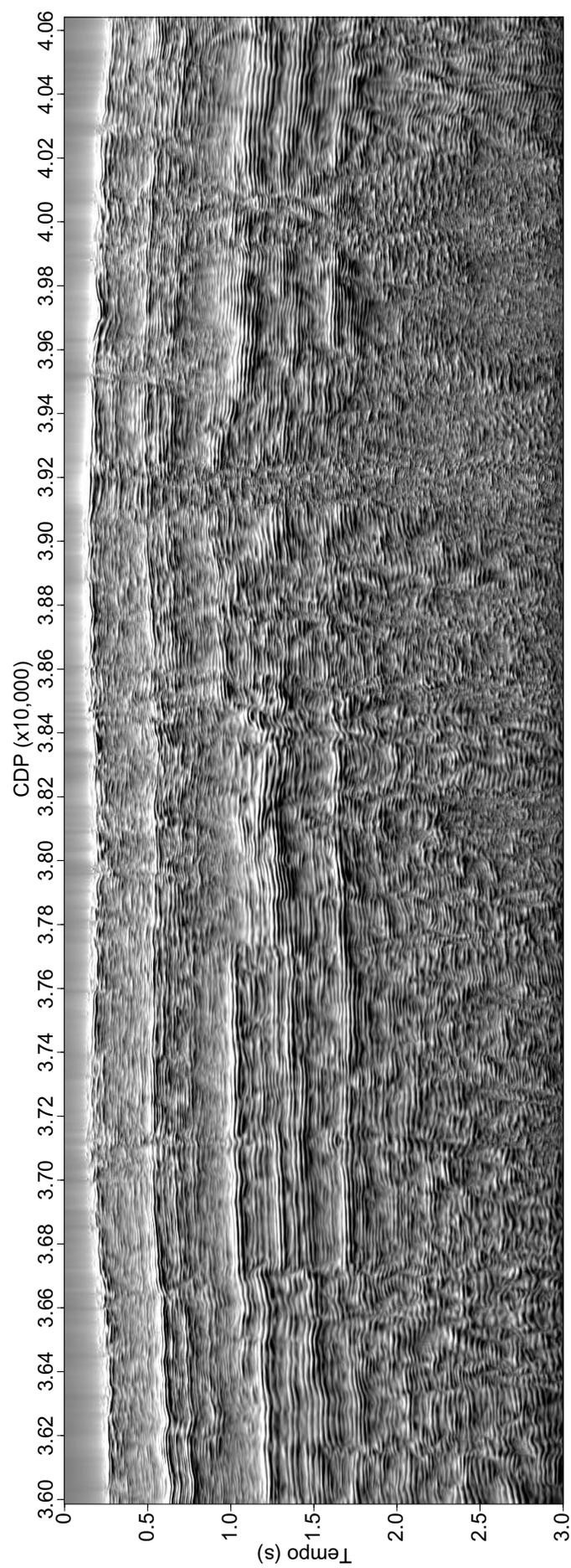


Figura 3.11: Seção empilhada original focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. Nesta figura temos a utilização do atributo de visualização de amplitude em relevo.

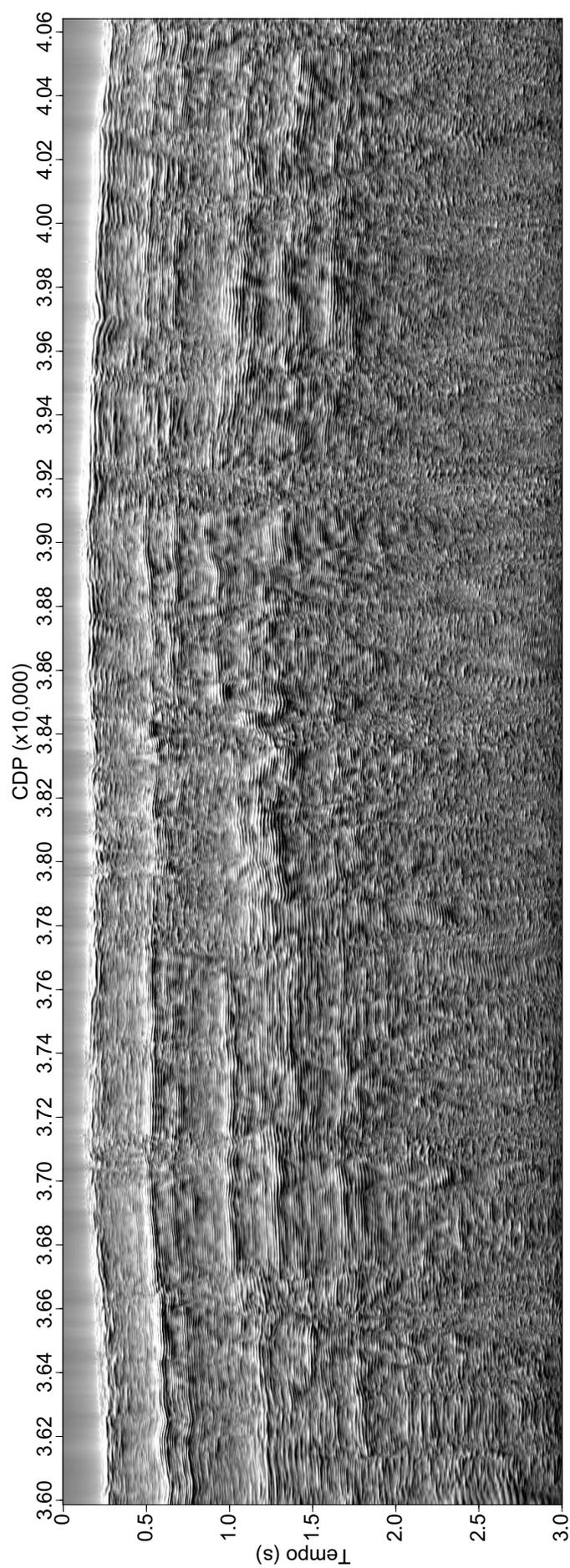


Figura 3.12: Seção empilhada filtrada focando nos três primeiros segundos, mantendo o intervalo de observação dos CMPs 35988 a 40638. Nesta figura é possível ver com maior facilidade o aumento da resolução e o aumento da continuidade lateral do dado, quando comparada com a Figura 3.11. Nesta figura temos a utilização do atributo de visualização de amplitude de relevo, para uma mais fácil visualização dos benefícios da filtragem.

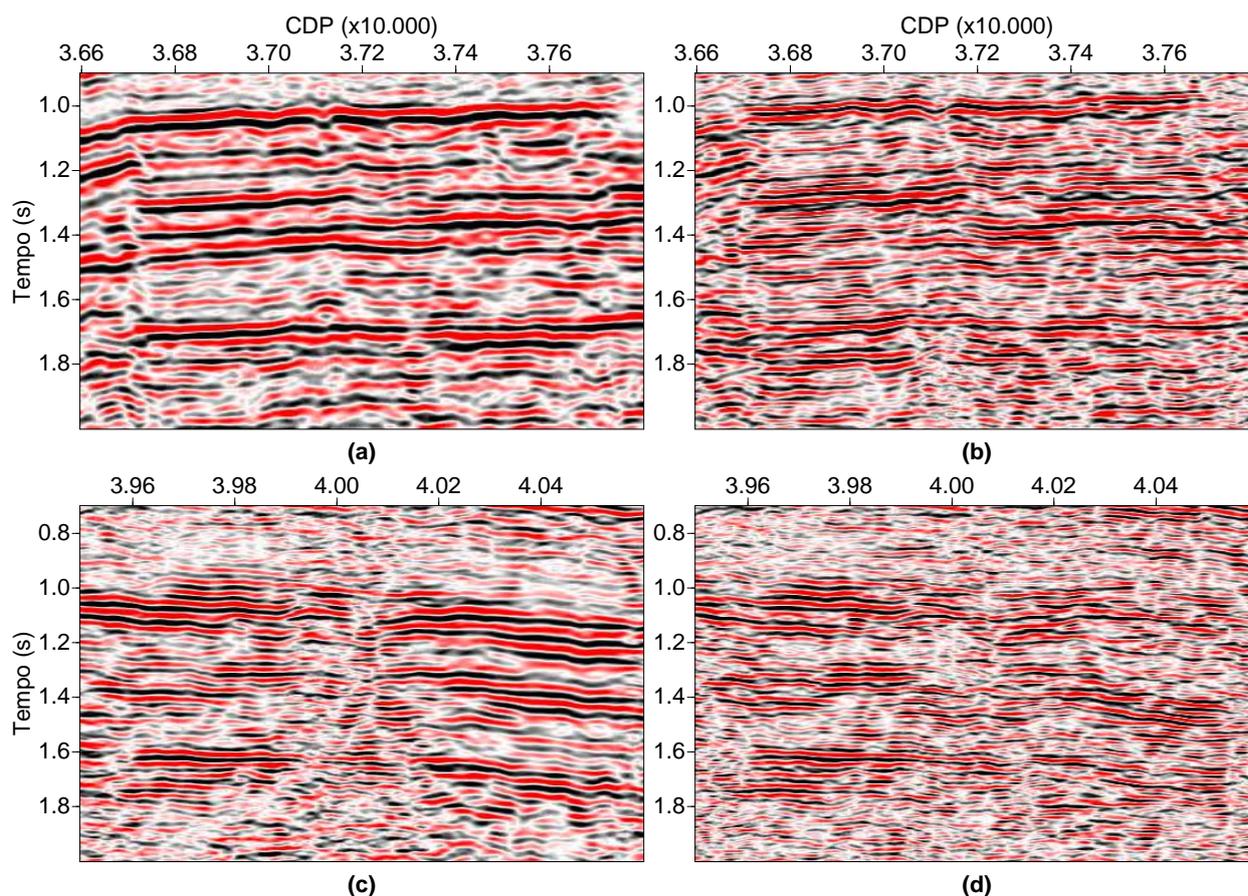


Figura 3.13: Detalhes da seção empilhada original e filtrada com o método SSA-SW. Em (a) e (c) temos um detalhe da seção empilhada original. Em (b) e (d) é mostrado um detalhe na mesma localidade de (a) e (c) após a filtragem SSA-SW. Podemos notar nos trechos filtrados um aumento da coerência lateral do dado, além de um ganho na resolução das reflexões. Notamos também nas figuras filtradas uma aparição de novas reflexões que não apareciam anteriormente.

3.2.2 Parte profunda

Devido a grande profundidade dos alvos, é necessário preservar o conteúdo de baixa frequência do dado sísmico. De acordo com Yilmaz (2001), as altas frequências são responsáveis pela resolução dos dados e pela caracterização dos eventos mais rasos, enquanto que as baixas frequências são responsáveis pelo eventos em grandes profundidades. Somado a isso, temos que, quanto maior a profundidade, maior a atenuação das altas frequências do sinal sísmico. Desta forma, o primeiro passo é a aplicação da filtragem RA-SSA para cada traço sísmico no domínio tx (para toda a variável do tempo), com o intuito de preservar o conteúdo de baixa frequência do dado. O próximo passo é aplicar o filtro SSA em painéis de *offset* comum, no domínio fx , para cada frequência, na direção da variável x , com o objetivo de enfatizar a continuidade lateral dos eventos de reflexão. Para esta finalidade, uma versão complexa do

método SSA foi utilizada.

Para este exemplo, temos o CMP *bin number* 21460. A Figura 3.15a mostra uma família 21460 original. A Figura 3.15b corresponde ao resíduo, mostrando o quão efetivo foi o método ST-SVD para a atenuação de ruído não coerente e com conteúdo de alta frequência. O reforço das reflexões é observado na Figura 3.15c, o CMP filtrado. A Figura 3.16 mostra os espectros de amplitude média das famílias CMPs mostradas na Figura 3.15. O espectro de amplitude médio possui uma banda de frequência entre 5 e 40 Hz, e o espectro do ruído é distribuído entre 5 e 60 Hz.

Com este resultado possível ver o quão efetivo foi o método SSA para a filtragem de ruídos de alta frequência. Estes resultados se mostraram bons o suficiente para que pudéssemos avançar para o próximo passo, que seria aplicar o RA-SSA a fim de encaminharmos o dado para um fluxograma ótimo para obtenção da sessão empilhada final.

Com a exceção dos métodos que foram apresentados neste trabalho, que foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN, todos os outros processos foram feitos no *software* comercial ProMAX *SeisSpace*, da Landmark. Após a filtragem do dado, foi seguido o fluxo apresentado na Figura 3.14.

Primeiro, nosso dado foi carregado e convertido do formato universal SEG-Y para o formato ProMAX. Devido ao fato do nosso dado ser bastante pesado, ele foi dividido em 13 partes, com uma sobreposição de CMPs entre eles, para garantir a cobertura máxima (o dado foi recebido da BP *Energy* do Brasil já dividido entre os 13 arquivos). Após isso, foi carregada a geometria do *header* para o *database*, seguido pela correção estática com *datum* flutuante (este passo foi aplicado antes da filtragem proposta). Apesar de haver uma grande cobertura (240 traços no CMP), todo o dado é altamente contaminado com diversos tipos de ruído, como ruído aleatório, ambiental e de superfície, diminuindo a qualidade e continuidade dos refletores, especialmente os que representam a descontinuidade de Moho. Mantendo isso em mente, para atenuar o ruído que ficou presente após os processos de filtragem, foi decidido combinar os CMPs para formar *supergathers* (5 CMPs para cada *gather*). Após a construção dos *gathers*, foi aplicada a correção *normal moveout*, seguida do ganho AGC com janela de 5 segundos. Após alguns testes, chegou-se a este valor da janela como o melhor tamanho de janela para o caso. Para aumentar a continuidade dos refletores, o módulo f-x Decon foi aplicado duas vezes, primeiro antes e depois após o empilhamento. Após o segundo f-x Decon, outro AGC com janela de 5 segundos foi aplicado, aumentando a qualidade de visualização dos refletores mais profundos. O último passo do processo foi exportar o dado para SEG-Y.

O pacote gratuito *Seismic Unix* foi utilizado para juntar todas as 13 partes em um

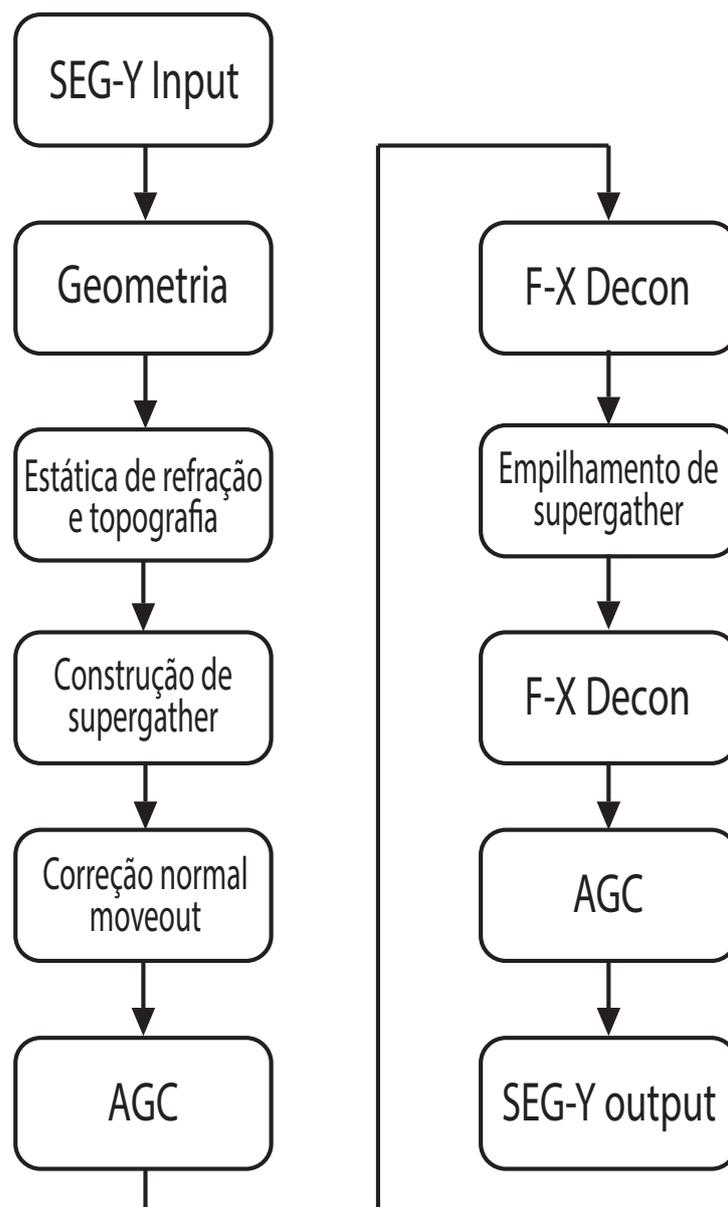


Figura 3.14: Passos do fluxograma de processamento aplicado neste trabalho.

arquivo só. É válido afirmar que este fluxo de processamento apresentado foi o fluxo ótimo após diversos testes e filtros, como balanceamento espectral, *surface noise*, SVD, f-k, e outros tipos de ganho, como AGC com diferentes tamanhos de janela e divergência esférica.

3.2.3 Discussão de resultados

Após seguir o fluxograma apresentado na Figura 3.14 e juntar as treze partes do dado regional da Parnaíba, é possível apresentar a linha RL001 completa filtrada. Nas Figuras 3.17 e 3.18 é apresentado o dado bruto, sem o método de filtragem proposto, sendo eles apresentados em amplitude e em amplitude em relevo, respectivamente (Bulhões e Amorim, 2005). Estes

resultados brutos nos servem para compararmos com os resultados obtidos após a aplicação do método proposto, nas Figuras 3.19 e 3.20, a fim de termos uma referência.

Com o atributo de visualização amplitude em relevo, eventos como a Descontinuidade de Moho (convencionada como o conjunto de reflexões mais profundo) são vistos mais facilmente. Primeiramente, é possível ver como o filtro foi eficiente, especialmente nos refletores de Moho. Na parte mais oeste, nos primeiros CMPs, vemos como Moho é mais evidente na Figura 3.19, quando comparada com a Figura 3.17. Na região do *Mid-Crustal Reflector* (MCR), notamos que o refletor acima de Moho foi atenuado, especialmente na região perto do CMP 50.000. Entretanto, o refletor Moho se mostrou mais destacado. Já na parte leste do dado, vemos que algumas “clareiras” são vistas na Moho, na Figura 3.17. Após a aplicação do filtro proposto, estes espaços em branco se conectam quase que inteiramente, com refletores fortes e fracos ligando o refletor de Moho. Esta conexão pode ser vista em detalhe com mais qualidade nas figuras mostradas mais a frente.

As Figuras 3.21 e 3.22 mostram uma dessas “clareiras”, em amplitude, e em amplitude em relevo, respectivamente. Após a metodologia proposta aplicada, foi possível conectar os refletores de Moho de ambos os lados, e este resultado pode ser visto nas Figuras 3.23 e 3.24. Apesar dos eventos mais profundos ficarem mais destacados e mais contínuos, como observado, em comparação com as figuras do dado original, vemos que estruturas um pouco mais rasas e inclinadas, entre 6 e 10 segundos, foram atenuadas. Entretanto, como estas estruturas não eram o foco principal da filtragem e do trabalho, este resultado foi considerado positivo, visto que temos Moho como o objetivo principal deste trabalho.

As Figuras 3.17 e 3.18 mostram seções empilhadas sem o filtro proposto em amplitude, e em amplitude em relevo, respectivamente, enquanto que as Figuras 3.19 e 3.20 mostram as seções empilhadas filtradas com o filtro proposto, em amplitude e amplitude em relevo, respectivamente.

Devido ao fato de nosso dado ser bastante extenso, o mesmo não pode exibido inteiramente em apenas uma figura. Para isso, as Figuras 3.19 e 3.20, correspondentes aos resultados obtidos, foram divididas em três partes, as quais consideramos as partes principais para o trabalho. Alguns intervalos de CMP foram descartados devido à falta de informação no dado. Nas Figuras 3.17 a 3.31 foi colocada uma linha vermelha representando um trecho que foi retirado do dado por representar um segmento Norte-Sul, enquanto que a intenção deste trabalho é de mapear a bacia em um perfil Oeste-Leste. Enquanto nosso índice de CMP vai de 2.007 a 82.167, a parte descartada vai de 17.166 a 19.403 (este intervalo é visto em mapa, na Figura 3.32). Isso explica o pulo de índice CMP nas figuras.

Como o método de filtragem RI-SSA utiliza apenas a primeira autoimagem obtida com

o SVD, o algoritmo SVD *Power Method* foi implementado. Com isso, nosso custo computacional caiu substancialmente.

A transecta mostrada na Figura 3.25 foi processada em filtrada no domínio do tempo. Nosso dado é equivalente ao discutido em Daly et al. (2014) e Tozer et al. (2017). Entretanto, em nosso dado, tanto uma nova filtragem (RI-SSA) quanto um fluxo de processamento mais específico, foram aplicados a fim de melhorar as reflexões crustais profundas. Outra ferramenta bastante utilizada neste trabalho foi a amplitude em relevo (Bulhões e Amorim, 2005), por apresentar uma maneira melhor de visualização das figuras de seções empilhadas.

Em nosso dado, é possível ver três grandes zonas de reflexões bastante profundas, e duas grandes zonas de vazios, ou “clareiras”. Estes aspectos podem ser observados na Figura 3.25 com imagens dos blocos separados na linha regional.

A bacia do Parnaíba foi desenvolvida em uma crosta heterogenea, composta por três blocos distintos separados por zonas de falha dúcteis. A primeira zona, correspondente à margem Oeste do nosso dado, do CMP 2.007 a 20.000, corresponde à parte Leste do Cráton Amazônico. Este bloco possui um padrão complexo de refletores na parte superior da crosta com mergulho tendendo a Leste, e uma reflexão de Moho por volta dos 13 segundos de registro. O limite entre o cráton Amazônico e o supergrupo Araguaia é bem marcado por um refletor, mostrado no dado interpretado na Figura 3.25. Este primeiro bloco é caracterizado por uma Moho que começa por volta dos 13 segundos, e conforme segue em direção ao Leste, este refletor começa a se aprofundar, até por volta dos 15 segundos, como podemos ver nas Figuras 3.26 e 3.27. Apesar de não ser totalmente conectada, é possível ver na Figura 3.17, e mais facilmente de ver na seção em amplitude em relevo na Figura 3.18, estruturas conectando os dois refletores. Na parte superior desta zona, é possível ver um padrão complexo de refletores, com amplitudes fortes e fracas, em general com mergulhos em direção ao leste. No fim desta zona (Figura 3.25), ou seja, a terminação abrupta de refletores, marca a Zona de Falhas do Araguaia (AFZ - *Araguaia Fault Zone*) (Daly et al., 2014; Fonseca et al., 2004). A AFZ é a fronteira entre o supergrupo Araguaia e a margem oeste do bloco do Parnaíba.

A segunda grande zona de refletores está ao centro do dado (Figura 3.25), entre os CMPs 32.000 e 50.000, e é mostrada em maior detalhe nas Figuras 3.28 e 3.29, em amplitude e amplitude em relevo, respectivamente. Infelizmente o filtro proposto não foi eficiente o bastante para preservar a parte superior leste do refletor do *Mid-Crustal Reflector* (MCR), o qual é bem observado no dado sem a filtragem proposta. Mas o refletor mais profundo possui o mesmo padrão da zona do bloco oeste, significando a probabilidade de este refletor também corresponder a Moho. É claro que entre estas duas zonas, vemos um grande vazio de sinal,

mas se compararmos ao último ponto da Moho da primeira zona e o início da MCR, nós vemos que os refletores aparecem aproximadamente na mesma profundidade (por volta de 15 segundos de registro). O refletor superior, o qual varia entre 7 e 10 segundos foi detectado como um corpo magnético, mas ainda assim não há evidências de sua origem. Porém, já que este contém um grande contraste de impedância dentro da crosta, existem chances de que este é um corpo ígneo, provavelmente relacionado à Formação Sardinha (Daly et al., 2014; Tozer et al., 2017).

A terceira e última zona de refletores (Figura 3.25) vai dos CMP 57.000 a 82.167, e é mostrada em maiores detalhes nas Figuras 3.30 e 3.31 em amplitude e em amplitude em relevo. Esta zona se inicia com o começo abrupto de refletores, de 5 a 15,5 segundos. A mudança abrupta das fácies é interpretada como a Zona de Transcorrência Trans-Brasiliana, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ), o qual é o limite entre o bloco Parnaíba e a província da Borborema. Esta zona é caracterizada por uma Moho bastante forte, a qual é quase que inteiramente conectada após a aplicação da filtragem proposta. Os refletores de Moho variam entre as profundidades de 11 a 15 segundos, em direção ao Leste. Esta zona é caracterizada também por diversos refletores mergulhando em direção ao leste. De acordo com Daly et al. (2014), estes refletores estão relacionados ao início do período Brasiliano, com geometria de uma zona de transcorrência de escala crustal.

Pela transecta, na Figura 3.25, é possível ver alguns vazios, onde nenhum sinal é registrado abaixo de 2,5 segundos (abaixo da bacia). Apesar de em grande parte da linha não ser possível observar o refletor de Moho, se analisarmos o comportamento da descontinuidade nos limites dos blocos, é possível ver uma tendência dos eventos em direção da profundidade onde encontramos a Moho abaixo da MCR. Nós podemos portanto supor que o refletor possui esta tendência ao ser comparado com os limites dos bloco, como demonstrado na Figura 3.25. De acordo com Daly et al. (2014) e de Castro et al. (2014), na Bacia do Parnaíba existem diversas ocorrências de magmatismo relacionados às formações Mosquito e Sardinha. Na Figura 3.32, modificada de Mocitaiba et al. (2017), é possível ver um mapa mostrando afloramentos e anomalias magnéticas das duas formações e a seção regional, com os índices dos CMPs plotados na linha, a fim de localizar as figuras discutidas acima. Hanssen (2003) mostra como a presença de corpos simples e complexos de basalto podem interferir na propagação da onda. Por causa do alto contraste de impedância, grande parte da energia incidente não pode ser transmitida através das intrusões.

Para discutir essa possibilidade, a Figura 3.33 está marcada nos intervalos em que as anomalias magnéticas e os afloramentos foram mapeados, como visto no mapa da Figura 3.32. Para o primeiro intervalo, em verde, existe a relação entre a presença de diabásio e

oa falta de sinal nas regiões mais profundas, com a exceção de um último sinal de Moho, na região oeste da primeira zona. Coincidentemente, assim que a detecção de corpos ígneos próximos à superfície termina, nós temos a aparição do MCR. Após o MCR, uma nova zona, em azul, é mostrada na transecta. Para a parte leste do dado, esta relação entre o mapa e o dado não é se encaixa tanto. Uma das possibilidades é a forma em que estas intrusões se apresentam neste setor, podendo se diferenciar do padrão de intrusões da zona oeste do dado. Intrusões como soleiras simples e complexas são mais capazes de prejudicarem na propagação das ondas sísmicas, enquanto que diques são mais tendenciosos em espalhar as ondas do que atenuar sua propagação.

Para trabalhos futuros, uma interpretação da parte mais rasa da bacia, até por volta dos 5 segundos de registro, focando no mapeamento dos corpos ígneos, acrescentaria mais informação a essa discussão sobre a presença das intrusões na dificuldade da propagação do sinal. Também, com a ajuda de dados de poços, seria possível analisar o tipo de sedimentos presentes próximos à superfície, e entender se esta camada de sedimentos pode também estar sendo responsável na absorção e atenuação do sinal, atrapalhando o processamento sísmico e nos impossibilitando de ver os refletores de Moho.

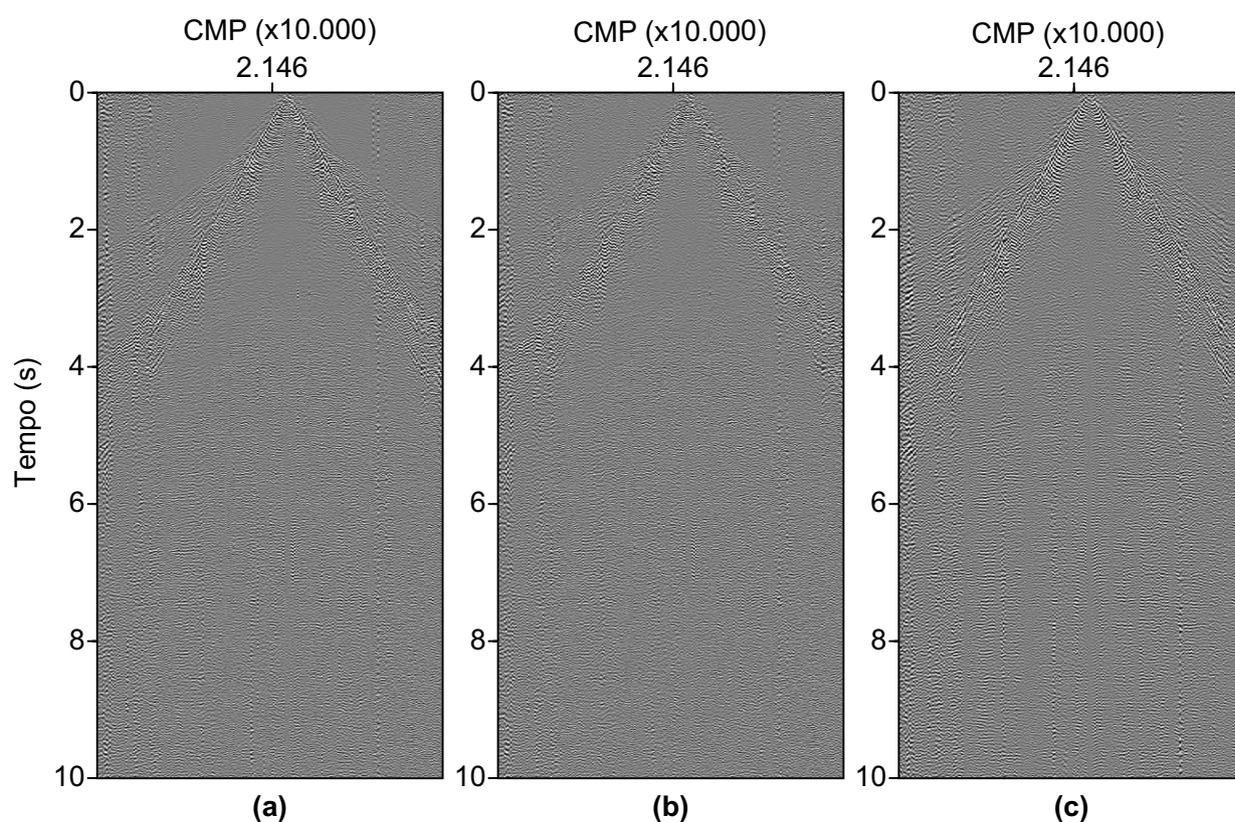


Figura 3.15: Família CMP mostrando a comparação do dado filtrado: (a) família CMP original; (b) resíduo entre (a) e (c); (c) resultado após a filtragem proposta, utilizando RI-ST-SVD no domínio do tempo, seguido pelo RI-SSA no domínio da frequência.

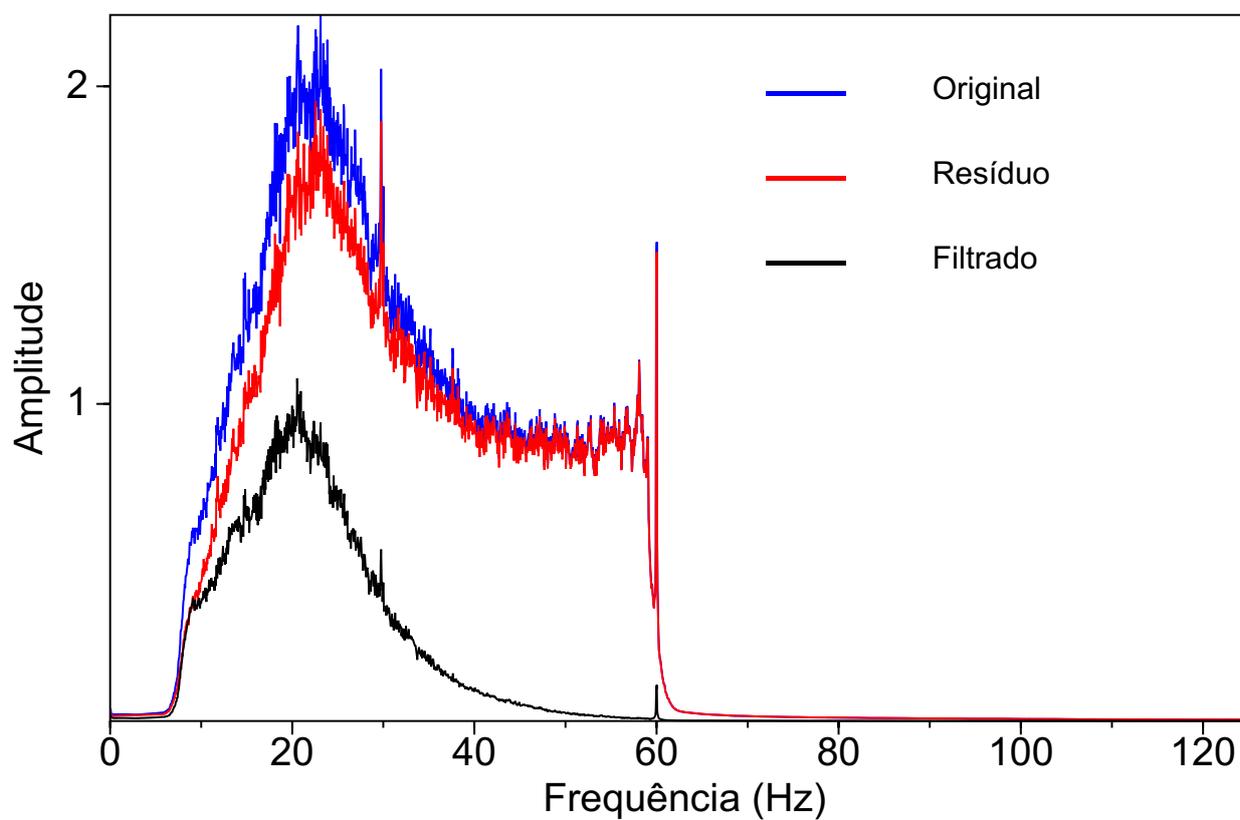


Figura 3.16: Espectro de amplitude médio relacionado aos dados apresentados na Figura 3.15: Original, em azul; resíduo entre dado original e filtrado, em vermelho; resultado do método de filtragem proposto, em preto.

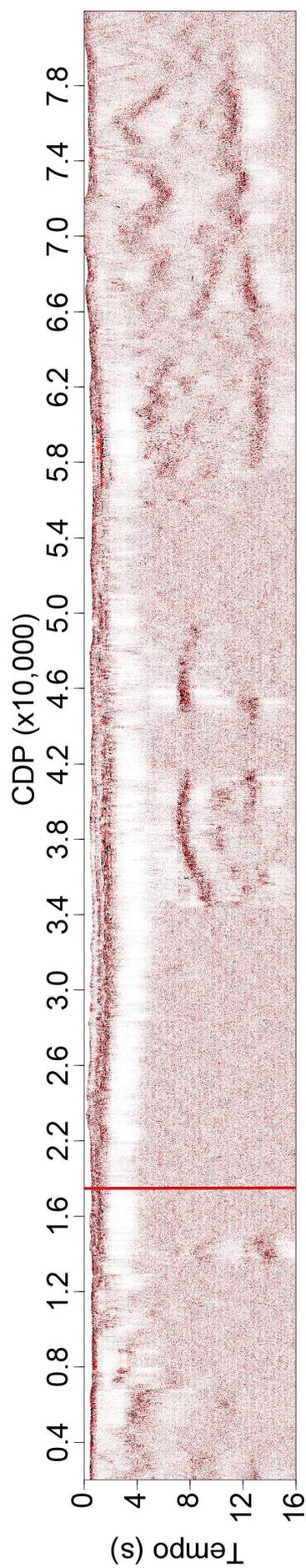


Figura 3.17: Seção empilhada original em amplitude. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado.

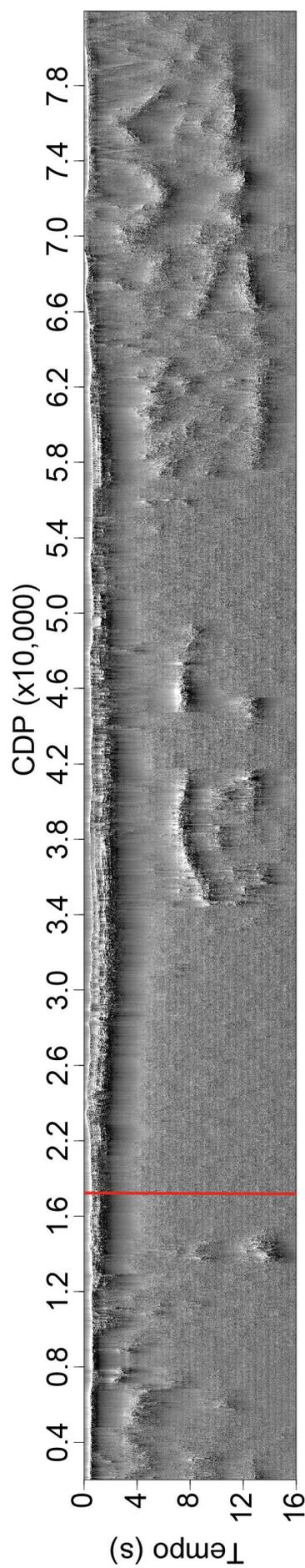


Figura 3.18: Seção empilhada original em amplitude em relevo. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado.

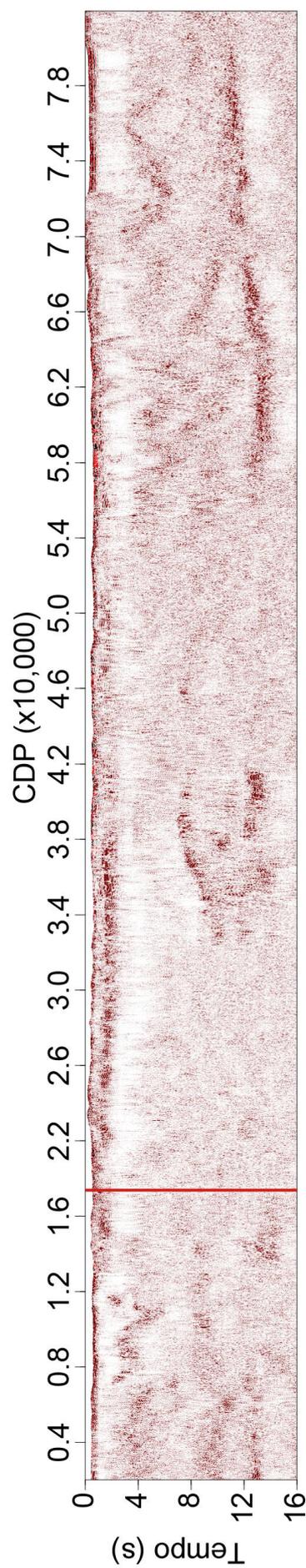


Figura 3.19: Linha regional empilhada após a aplicação da filtragem proposta, em amplitude. É possível notar uma maior continuidade lateral, especialmente em eventos mais profundos, foco da filtragem. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado.

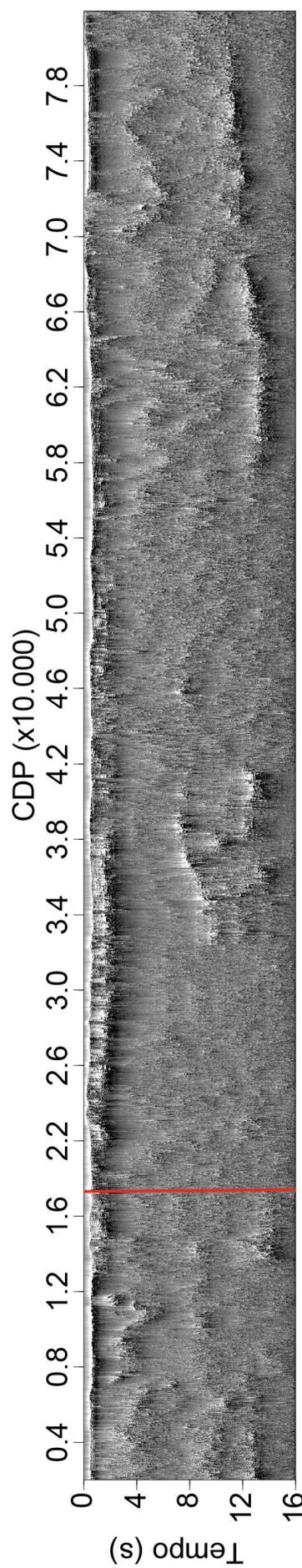


Figura 3.20: Linha regional filtrada após aplicação da filtragem proposta, em amplitude em relevo. Uma maior continuidade lateral é vista, especialmente na região mais profunda do dado. A linha vermelha marca onde o trecho Norte-Sul do dado foi localmente removido, mantendo a tendência Oeste-Leste do dado.

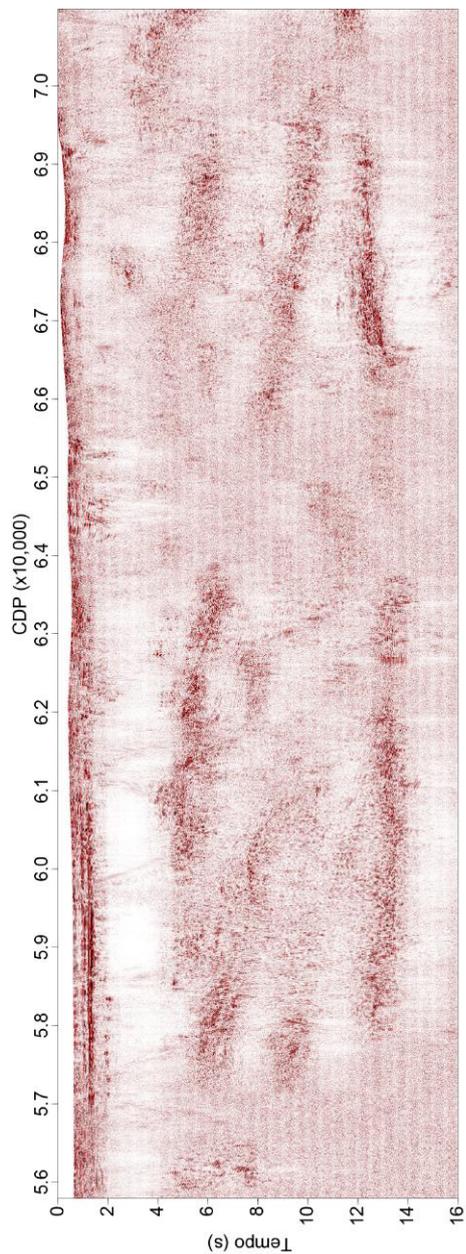


Figura 3.21: Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada bruta, em amplitude.

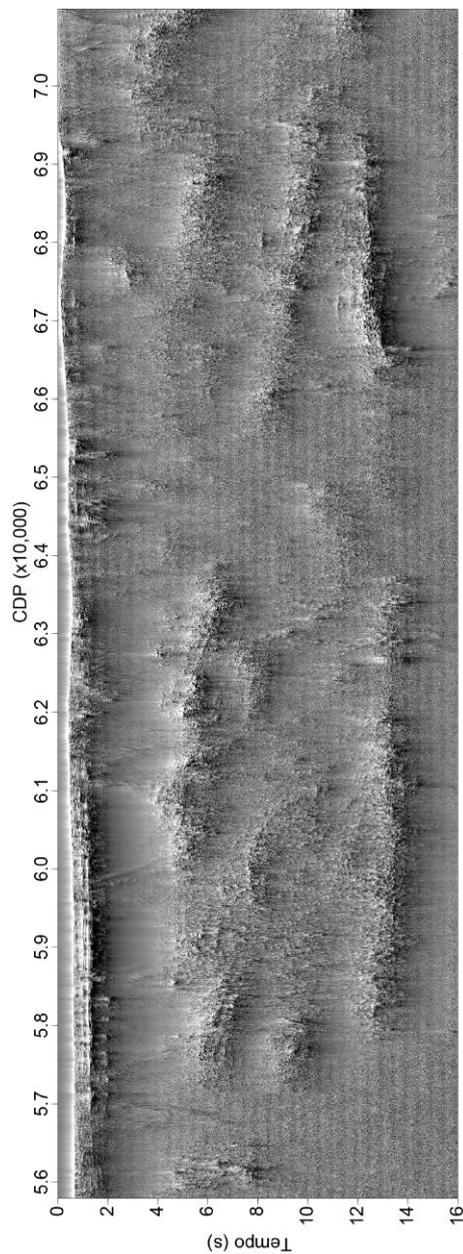


Figura 3.22: Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada bruta, em amplitude em relevo.

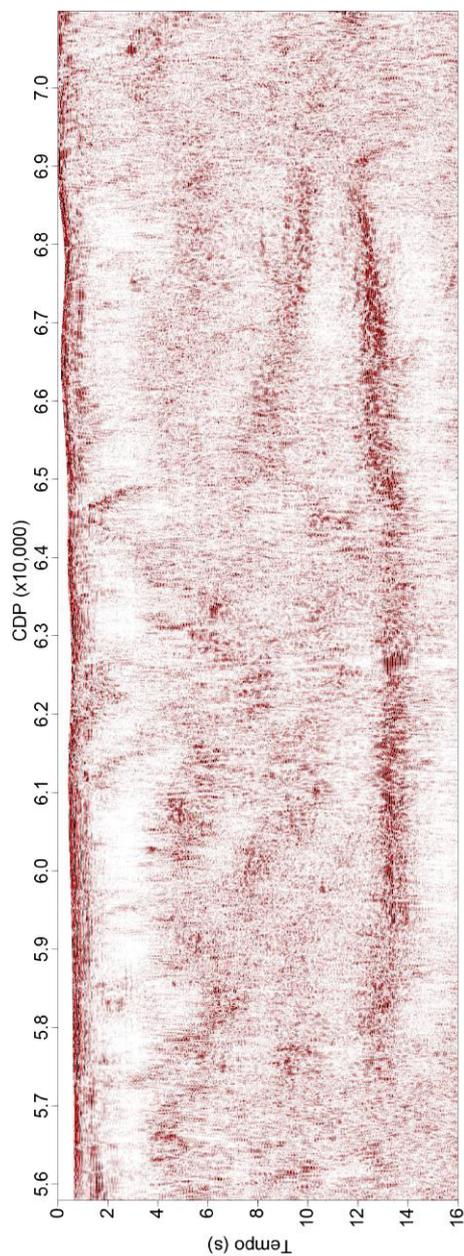


Figura 3.23: Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada filtrada, em amplitude. O grande espaço vazio que havia entre os dois grandes refletores de Moho agora se mostra conectado.

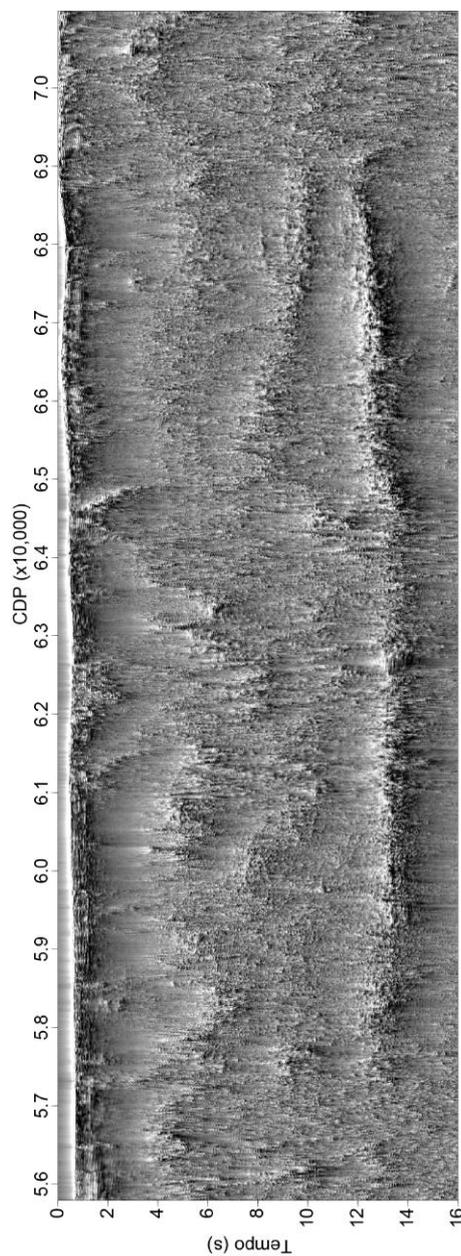


Figura 3.24: Pequeno intervalo, entre CMPs 55.794 e 70.984, mostrando a linha regional empilhada filtrada, em amplitude em relevo. O grande espaço vazio que havia entre os dois grandes refletores de Moho agora se mostra conectado.

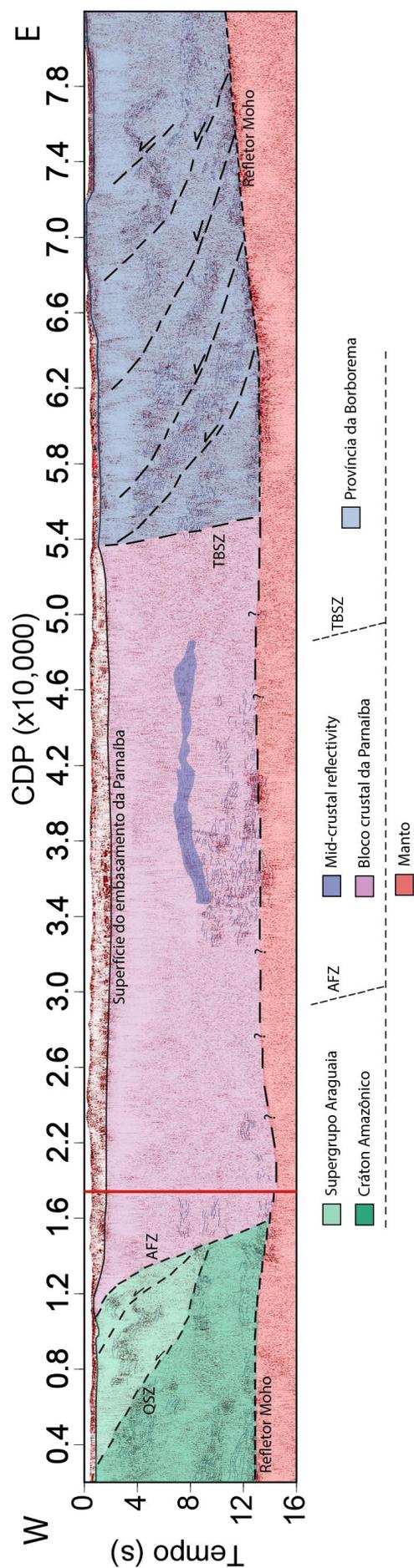


Figura 3.25: Transecta regional após interpretação. No bloco mais a oeste, em verde claro, temos o supergrupo Araguaia. Na borda do supergrupo Araguaia nós temos o AFZ na parte Leste do bloco. Falhas dúcteis também separam o supergrupo Araguaia do Cráton Amazônico (verde escuro). No centro do dado, temos o bloco crustal do Parnaíba, em rosa. Neste bloco temos a presença do MCR. A ideia é que uma zona de falhas entre o MCR e o manto foi o caminho para intrusão magmática, formando a camada marcada em roxo. Na parte mais a Leste da transecta, temos a província da Borborema, em azul claro, com a TBSZ na parte mais a oeste deste bloco. Uma grande zona de transcorrência dúctil foi mapeada neste bloco. Em vermelho, abaixo de todos os blocos, o manto.

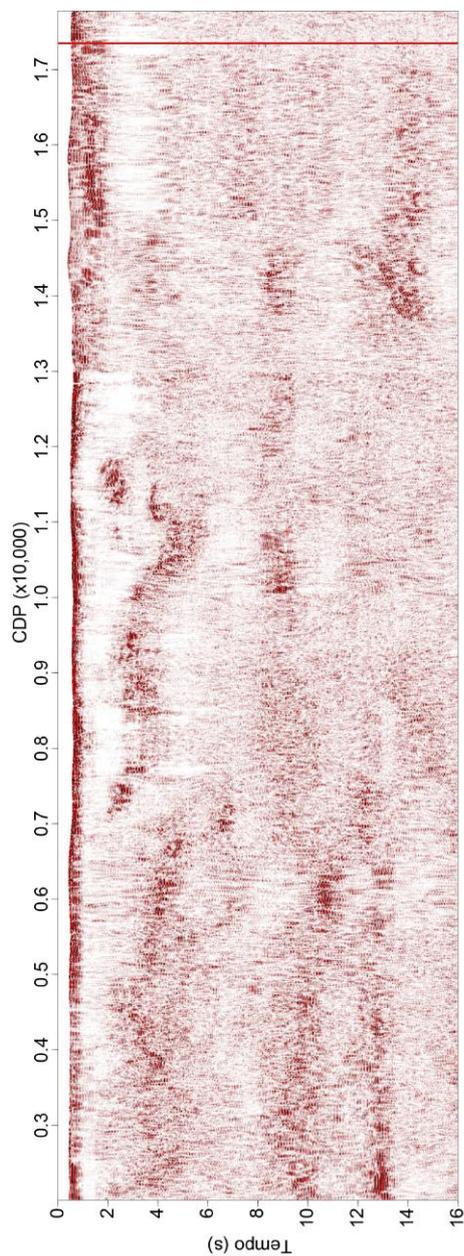


Figura 3.26: Parte 1 da linha regional filtrada, em amplitude, com intervalo CMP de 2007 a 20.000 representando o cráton Amazônico. Nesta figura, vemos mais detalhes sobre a continuidade da Moho, iniciando em 13 segundos.

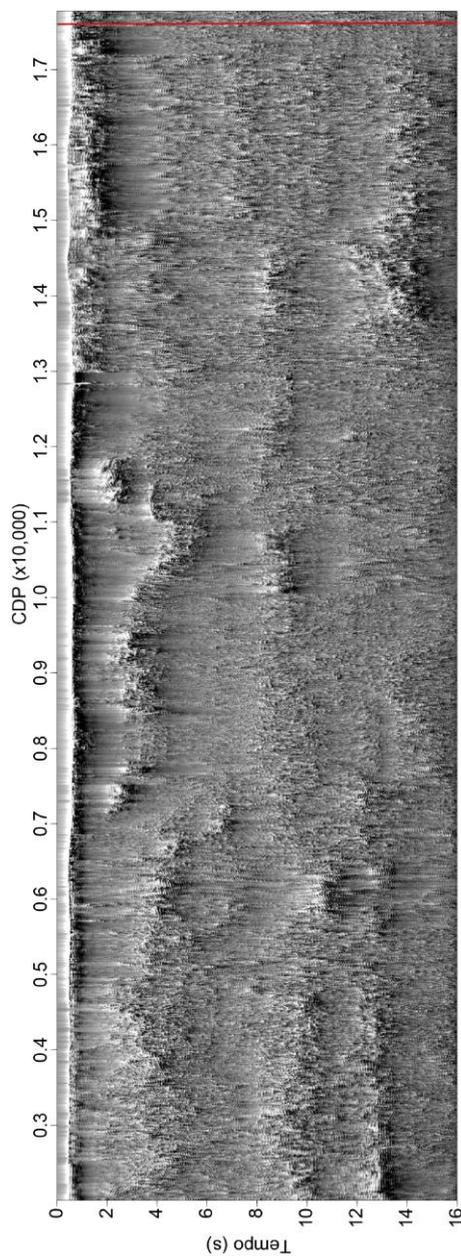


Figura 3.27: Parte 1 da linha regional filtrada, em amplitude em relevo, com intervalo CMP de 2007 a 20.000 representando o cráton Amazônico. Nesta figura, vemos mais detalhes sobre a continuidade da Moho, iniciando em 13 segundos.

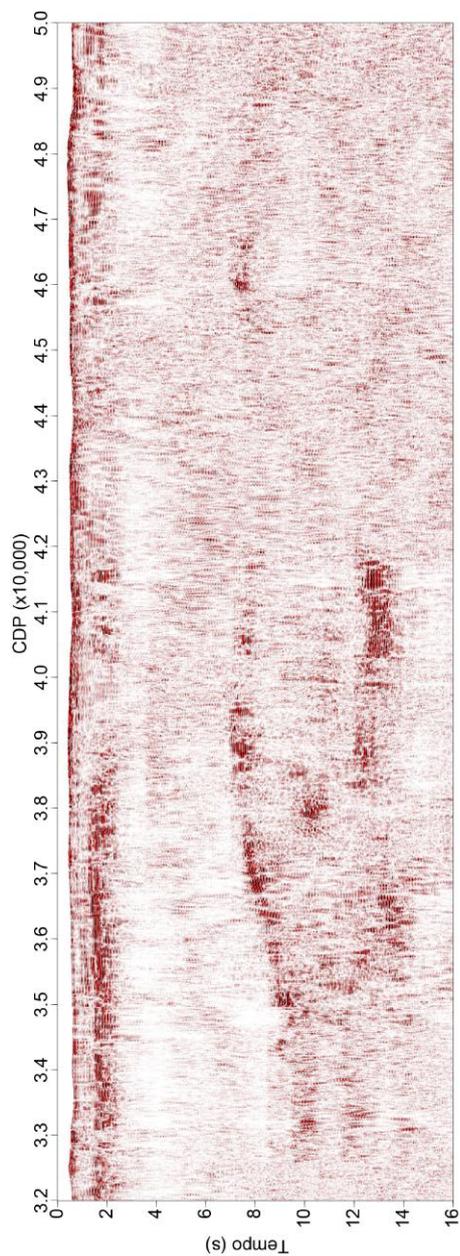


Figura 3.28: Parte 2 da linha regional filtrada, em amplitude, com intervalo CMP de 32.000 a 50.000. Esta zona representa o Refletor Central Crustal, do inglês *Mid-Crustal Reflector* (MCR).

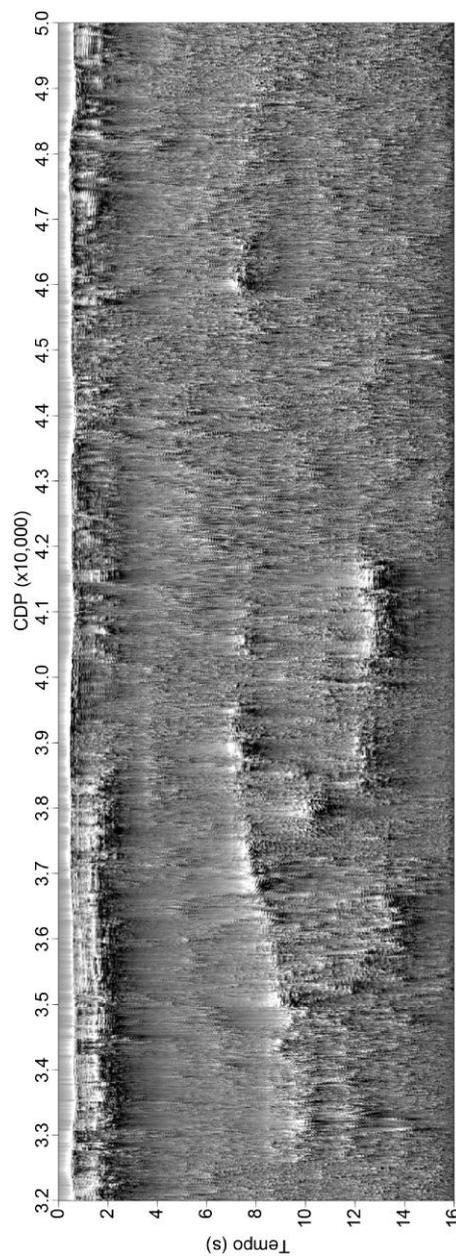


Figura 3.29: Parte 2 da linha regional filtrada, em amplitude em relevo, com intervalo CMP de 32.000 a 50.000. Esta zona representa o Refletor Central Crustal, do inglês *Mid-Crustal Reflector* (MCR).

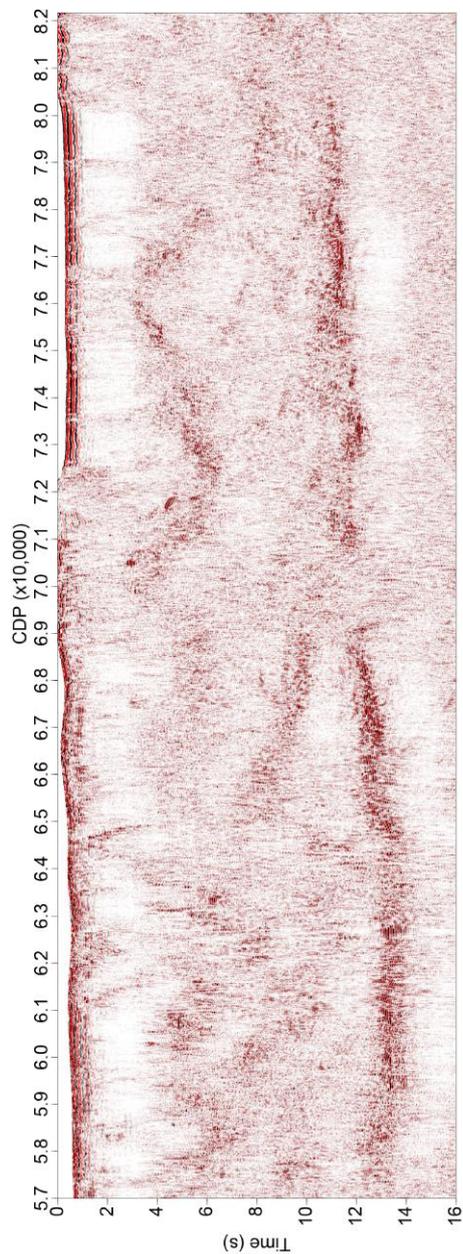


Figura 3.30: Parte 3 da linha regional filtrada, em amplitude, com intervalo de CMP de 57.000 a 82.167. Esta zona representa a Província da Borborema, que se inicia na Zona de Transcorrência Trans-Brasiliana, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ).

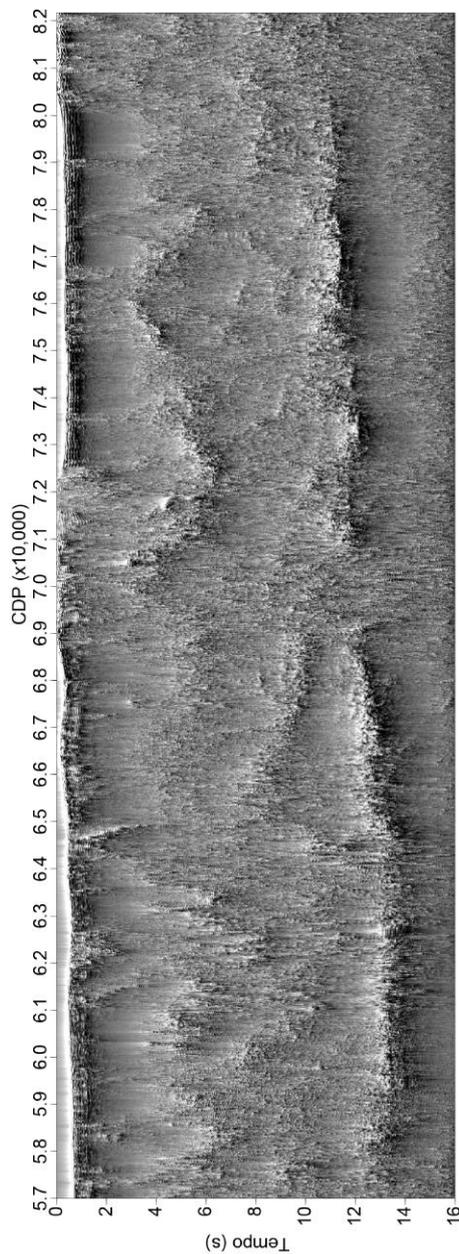


Figura 3.31: Parte 3 da linha regional filtrada, em amplitude em relevo, com intervalo de CMP de 57.000 a 82.167. Esta zona representa a Província da Borborema, que se inicia na Zona de Transcorrência Trans-Brasiliana, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ).

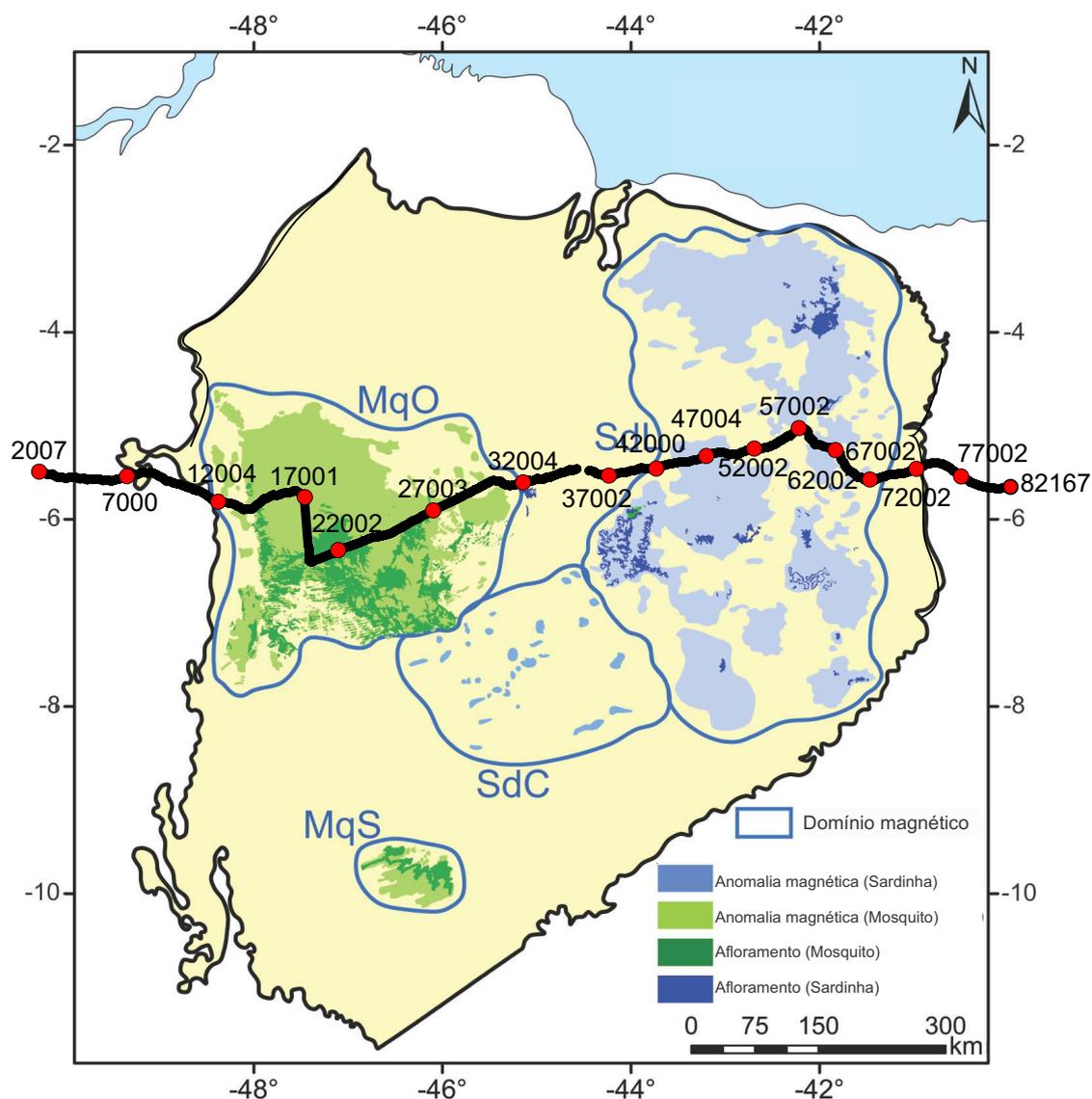


Figura 3.32: Mapa da Bacia do Parnaíba modificado de Mocitaiba et al. (2017) com afloramentos e anomalias magnéticas correspondentes às formações Sardinha e Mosquito. Em preto a posição da linha regional em relação ao mapa, com os números de CMP referenciados no mapa.

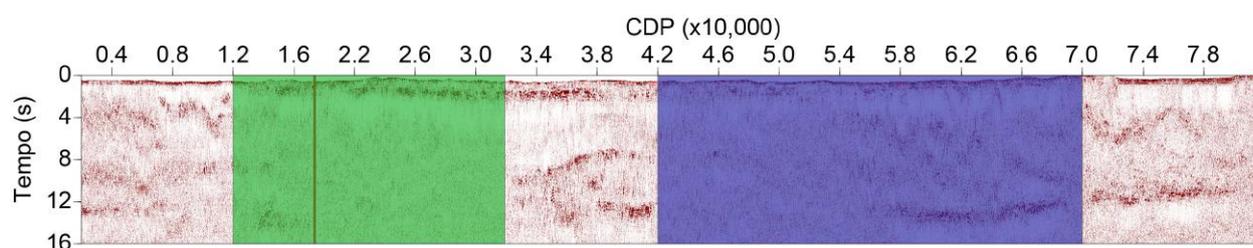


Figura 3.33: Linha regional filtrada inteira em amplitude em relevo, com as zonas das anomalias magnéticas e afloramentos destacadas. Em verde, a Formação Mosquito, e em azul, a Formação Sardinha.

3.2.4 Descontinuidade de Moho

A linha sísmica mostrada na Figura 3.25 foi processada e filtrada em tempo, ou seja, não foi feita uma migração para converter o dado para profundidade. O dado apresentado neste trabalho é equivalente aos discutidos por Daly et al. (2014) e Tozer et al. (2017). Contudo, apesar de utilizarmos o mesmo dado, neste trabalho, um novo filtro e uma nova metodologia foram aplicados, visando de maneira específica a descontinuidade de Moho, ressaltando os refletores crustais mais profundos. Outra ferramenta utilizada neste trabalho foi a amplitude em relevo, já discutida anteriormente, a qual nos auxiliou na visualização e entendimento dos dados, nos dando desta forma uma melhor imagem para o mapeamento das zonas de falha e de transcorrência. Em nosso dado, é possível vermos três grandes zonas com refletores profundos, e duas grandes zonas de “clareiras”. Estes aspectos podem ser vistos na Figura 3.25, com as imagens dos blocos separadas por cores na linha regional.

A Bacia do Parnaíba foi desenvolvida em uma crosta heterogênea, composta por três blocos distintos separados por zonas de falha dúcteis. Este aspecto de heterogeneidade é visto na Figura 3.25, com diversos refletores aparecendo na região mais central (na escala do tempo) da crosta. A primeira zona, correspondente à margem Oeste do nosso dado, do CMP 2.007 até mais ou menos 20.000, é o cráton Amazônico. Este bloco possui um padrão complexo de refletores na parte superior de sua crosta, com mergulho direcionando a Leste, e um refletor Moho por volta de 13 segundos. Este limite entre o Cráton Amazônico e o Supergrupo Araguaia é bem marcado por um refletor, como podemos ver na interpretação do dado na Figura 3.25.

Este primeiro bloco é caracterizado por uma Moho que começa por volta de 13 segundos e que, a medida em que vamos nos afastando para a parte leste do bloco, ela chega a 15 segundos, como visto nas Figuras 3.26 e 3.27. Este refletor é um refletor espesso e complexo, denotando que na transição entre a crosta inferior e o manto superior existe uma arquitetura complexa a qual delimita a descontinuidade. É possível ver também uma transição da crosta inferior, com padrões de reflexão, para um refletor Moho bem definido, e abaixo da descontinuidade, vemos um manto superior transparente, sismicamente falando. De acordo com Cook (2002), Eaton (2006) e Carbonell et al. (2013), a interpretação deste tipo de assinatura sísmica sugere heterogeneidades nas composições da crosta e manto, e isso é consistente com áreas continentais estáveis, com atividade tectônica reduzida. Então, o sinal sísmica detectaria apenas a mudança na heterogeneidade composicional da crosta e manto.

Na parte superior desta zona, é possível ver um padrão complexo de refletores, com amplitudes fortes e fracas e com mergulho tendendo a Leste. No fim desta zona, que é determinada pela terminação abrupta dos refletores, é marcada a Zona de Falhas do Araguaia

(*Araguaia Fault Zone* - AFZ) (Daly et al., 2014; Fonseca et al., 2004). A AFZ é o limite entre o Supergrupo Araguaia e a porção Oeste do Bloco do Parnaíba (Tozer et al., 2017). Apesar de não ser inteiramente contínuo, é possível observar na Figura 3.26 características que conectam ambos os refletores da Moho. Estes refletores presentes neste primeiro bloco também são mais facilmente apresentados em amplitude em relevo, mostrados na Figura 3.27. Esta quebra no refletor Moho pode ser causado pelos padrões de refletores complexos presentes na porção mais central da crosta, por volta dos 4 segundos, que podem causar um espalhamento nas frentes de onda sísmica, ou até atenuar a frente de onda. Estas propostas podem causar uma atenuação da energia sísmica, causando um sinal bastante fraco e pouco possível de ser registrado em superfície.

A segunda grande zona de refletores, na parte central da nossa linha sísmica (Figura 3.25), entre os CMPs 32.000 e 50.000, mostrada em maior detalhe nas Figuras 3.28 e 3.29, ambas em amplitude e amplitude em relevo, respectivamente. Esta parte transparente de Moho, de acordo com Carbonell et al. (2013), é possivelmente causada por um baixo contraste de impedância entre a crosta inferior e o manto superior. Este baixo contraste pode ser causado por uma mudança suave na velocidade e densidade entre a crosta e o manto, causando desta maneira uma zona de “clareira”. Esta mudança suave em propriedades físicas também sugere uma mudança suave nas características geológicas no limite crosta-manto. Isso não significa necessariamente que crosta inferior e manto superior possuem necessariamente a mesma composição, contudo, isso pode sugerir um gradiente de mudança de composição, não havendo um horizonte exato marcando onde exatamente termina a crosta inferior (típicas propriedades físicas da crosta) e onde o manto superior iniciou (típicas propriedades físicas do manto).

Infelizmente, devido ao fluxo de processamento escolhido, o qual focou em preservar os eventos mais profundos e horizontalizados como a Moho, a parte Leste do refletor central, batizado por Daly et al. (2014) como *mid-crustal reflector* (MCR), foi atenuado. Por outro lado, o refletor de Moho teve suas amplitudes reforçadas, com um aprimoramento de sua continuidade lateral, quando comparado com o dado processado por Daly et al. (2014) e Tozer et al. (2017), o qual podemos observar nas Figuras 3.17 e 3.18. Por possuir um grande contraste de impedância dentro da crosta, existem grandes chances de que este seja um corpo ígneo, provavelmente relacionado à formação Sardinha (Daly et al., 2014; Tozer et al., 2017). Na Figura 3.25, é possível ver diversos refletores se conectando à Moho abaixo do MCR, e conectando a Moho à própria MCR, na região mais Oeste do refletor. Não existe consenso sobre como a MCR foi formada, contudo, devido a presença destes refletores interconectados, é possível interpretar estes refletores como falhas que podem ter transportado material ígneo durante um longo período em diversas localidades, formando a MCR e este material pode

estar relacionado a um possível fluxo termal.

A terceira e grande zona de refletores (Figura 3.25) está compreendida entre os CMPs 57.000 e 82.167, e é mostrada em maior detalhe nas Figuras 3.30 e 3.31, em amplitude e amplitude em relevo, respectivamente. Esta zona começa com o início abrupto de refletores dentro do intervalo entre 5 e 15,5 segundos. Esta mudança abrupta de fácies sísmica é interpretada como a Zona de Transcorrência do Trans-Brasiliano, do inglês *Trans-Brasiliano Shear Zone* (TBSZ), que é o limite entre o Bloco do Parnaíba e a Província da Borborema. Na Província da Borborema (Figuras 3.25 e 3.30) podemos observar diversas estruturas interpretadas como falhas relacionadas ao evento do Trans-Brasiliano (Daly et al., 2014). Essas estruturas complexas apresentam um grande alinhamento dos refletores mergulhando em direção a Leste, por volta de 4 segundos, e se conectando assintoticamente à Descontinuidade de Moho. Esta característica da Província da Borborema vai de encontro com os estudos publicados por Carbonell et al. (2013), onde os refletores conectados à Moho da maneira como vista em nosso dado estão relacionados a zona de cisalhamento na base da crosta, consistente com atividades tectônicas horizontais de grande escala.

Este bloco, similarmente como o bloco do Cráton Amazônico, tem um refletor Moho complexo e espesso. A profundidade de Moho varia entre 11 e 15 segundos em direção a Leste. Assim como o Bloco Oeste, na Figura 3.25, vemos a Moho espessa que é relacionada com um limite crosta-manto com grande e complexa heteroneidade. Além disso, abaixo deste limite, vemos também um manto superior transparente, e acima do limite, podemos observar a presença de diversas estruturas complexas relacionadas ao TBSZ. Esta mudança de grande refletividade na crosta inferior para o limite bem definido, e do limite para um manto superior transparente significa, de acordo com Holliger e Levander (1992), Holliger et al. (1992) e Carbonell et al. (2013) que nós temos uma crosta com quase nenhuma atividade tectônica recente. Esta resposta sísmica irá caracterizar apenas as heteroneidades composicionais da crosta inferior e Moho, devido ao fato de não haver resposta sísmica registrada abaixo de Moho. Esta falta de resposta indica um baixo contraste de propriedades físicas ou heterogeneidades composicionais severas, nos levando a entender que nesta região o manto superior possui uma mudança suave em sua composição.

4

Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas novas metodologias para filtragem de ruídos coerentes, como o SSA-SW, RA-SSA-fx e o SVD adaptativo. Estes métodos produziram resultados bastante expressivos, os quais foram expostos na forma de sismogramas, espectros de amplitude e seções empilhadas. Além disso, para o processamento dos dados da Bacia do Parnaíba, foi necessário um novo estudo sobre o fluxo de processamento mais adequado para a obtenção de melhores resultados para dados com longos tempos de registro. Este trabalho foi dividido em duas partes, focando num trecho da bacia com tempo de registro limitado a 5 segundos. Já na segunda parte temos o processamento de toda a extensão do dado com seus 20 segundos de tempo de registro.

Para a primeira parte, introduzimos uma nova metodologia para obter o já bem estabelecido balanceamento espectral através do SSA, dispensando a utilização da transformada de Fourier. O método proposto se constitui em um processo de fase zero, o qual efetivamente separa os altos e baixos conteúdos de frequência presentes no dado. A propriedade de fase zero preserva a informação sobre o tempo de trânsito do dado. Para uma melhor compreensão do método e seus resultados, em paralelo, foram gerados resultados com o mesmo dado utilizando a metodologia do balanceamento espectral tradicional. Como observado em família de tiro comum, espectro de amplitude médio e seções empilhadas, o método baseado no SVD se mostra como uma boa alternativa para a atenuação do *ground roll* e aumento da resolução temporal. Reflexões que antes mascaradas por eventos lineares, como refrações e ruídos de rolamento, se mostravam mais evidentes em resultados de famílias de tiro comum. Em seções empilhadas, também é possível ver estes resultados, com a adição de feições geológicas mais evidentes quando comparadas com o dado original. Refletores após a filtragem adotaram uma feição mais final e com maior continuidade lateral em ambos os métodos

de filtragem, porém o resultado obtido com o SSA-SW mostrou uma aparência mais fiel à geologia. Com isso, é possível dizer que a metodologia proposta possui resultados positivos para filtragem de ruídos coerentes, com vantagens e desvantagens em relação à metodologia tradicional, dando ao usuário a autonomia de utilizar o método mais conveniente para se trabalhar.

Para a segunda parte, mostramos a filtragem em tempo e frequência, utilizando o SSA (RA-SSA-tx e RA-SSA-fx). A aplicação conjunta destes métodos mostrou bons resultados, destacando melhor as estruturas mais profundas, como a descontinuidade de Moho. Além de tornar os refletores profundos mais evidentes, foi possível também aumentar a coerência lateral do dado, conectando zonas onde os refletores de Moho não se conectavam anteriormente. Vale lembrar que apesar de em algumas porções do dado ser possível perceber uma grande melhora, em outras zonas temos verdadeiras clareiras, onde nenhum sinal útil correspondente a Moho foi processado.

A partir das seções empilhadas obtidas através da segunda parte do processamento, podemos conjecturar sobre a estrutura do refletor de Moho. Pode-se observar que nos blocos do Cráton Amazônico e na Província da Borborema, temos um grande contraste de impedância e um grande contraste composicional entre a crosta inferior e o manto superior, tornando o refletor Moho bastante evidente. Porém, notamos também a ausência de um manto superior com feições sísmicas presentes em seu interior, denotando uma mudança gradativa e suave nesta região, o que dificulta a presença de uma resposta sísmica. Já na região central do dado, no Bloco do Parnaíba, temos em grande parte uma Descontinuidade de Moho transparente, sendo possivelmente relacionada tanto a um baixo contraste de composição entre crosta inferior e manto superior, e a presença de intrusões próximas à superfície, dificultando a propagação do sinal. Além disso, abaixo da MCR podemos observar a presença de estruturas de refletores, podendo estes refletores formarem um conjunto de falhas que se comportou como um duto para o transporte de material ígneo, o qual pode ter formado o MCR. Porém, esta é apenas uma possibilidade, visto que não é possível relacionar esta estrutura com nenhum grande evento de fluxo térmico ocorrido na bacia.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Suyen Manenti e Paulo Manenti, por toda a força e apoio que obtive nestes anos, não só no doutorado como também na vida inteira. Sem eles este trabalho não seria possível, e posso dizer que de certa forma eles são coautores deste trabalho.

Aos meus irmãos, Rodrigo Manenti, Ana Paula Manenti e Gabriela Manenti, também pelo apoio, pelo carinho, pelos segredos compartilhados, pelas brincadeiras, pelas partidas de videogame, de tênis e por muito mais que não dá pra ser descrito e sumariado aqui.

À minha namorada Marcela Aras (paixão/puca), principalmente neste último ano, por ter se demonstrado uma excelente companheira, nos momentos bons e nos momentos ruins e quem eu levarei no coração para sempre.

À minha amiga Ana Carolina Moraes, que infelizmente nos deixou no início de 2016, mas que está viva na minha memória em todos os dias da minha vida. Muito obrigado por tudo o que passamos e por tudo o que compartilhamos. Que seu nome fique marcado neste trabalho assim como está marcado em minha vida.

Aos meus amigos Rodrigo Soares (Routo), Wilker Souza (Duzão) (em especial pelo grande apoio nos trabalhos, debates, conversas, gerenciamento de projetos), Daniel Bono (Cavanha), Paulo Augusto (Curió) e Edric (só Edric mesmo) por tornarem estes quatro anos mais leves e por fazerem parte de várias histórias hilárias que serão lembradas para o resto de nossas vidas.

Às minhas amigas Mariana Castro (por esta tenho um carinho especial a mais, foi mal, meninas), Jéssica Bárbara e Paula Rezende, que apesar de no último ano não termos nos encontrado tanto, sempre conversarmos besteiras e coisas sérias sempre que podemos, também por tornar estes anos um pouco mais leves.

Às minhas primas, Luciana e Carolina Saraiva, que junto comigo realizaram o sonho de vermos diversas bandas a bordo de um cruzeiro, fazendo com que este fosse a semente para uma maior aproximação de nós, e conseqüentemente, de nossas famílias.

Ao meu orientador Milton Porsani, por todas as ideias, discussões e incentivos durante todo este trabalho e durante toda a minha vida acadêmica até então.

Aos colegas, “estagiários”, frequentadores do GETA, alunos, a todos que de alguma forma aliviaram os estresses dessa vida acadêmica.

À FAPEX, pela bolsa.

À BP *Energy* do Brasil, pelo projeto e pelo financiamento.

Ao CPGG e LAGEP pelos recursos e estrutura.

Referências Bibliográficas

- Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B. e Fuck, R. A. (1981) Brazilian structural provinces: An introduction, *Earth Science Reviews*, **17**(1-2):1–29.
- de Almeida, L. J. A.; Manenti, R. R. e Porsani, M. J. (2017) Coherent noise attenuation using the wavelet transform on radial basis, *Revista Brasileira de Geofísica*, **34**(4).
- Armitage, J. J. e Allen, P. A. (2010) Cratonic basins and the long-term subsidence history of continental interiors, *Journal Geological Society London*, **167**:61–70.
- Askari, R. e Siahkoochi, H. R. (2008) Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms, *Geophysical Prospecting*, **56**(1):105–114.
- Brito Neves, B. B. e Fuck, R. A. (2013) Neoproterozoic evolution of the basement of the South American Platform, *Journal of South America Earth Science*, **47**:72–89.
- Bulhões, E. M. e Amorim, W. N. (2005) Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à técnica de volume de amplitudes (TecVA), Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Carbonell, R.; Levander, A. e Kind, R. (2013) The mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of the seismic constraints, *Tectonophysics*, **609**:353–376.
- de Castro, D. L.; Fuck, R. A.; Phillips, J. D.; Vidotti, R. M.; Bezerra, F. H. R. e Dantas, E. L. (2014) Crustal structure beneath the paleozoic parnaíba basin revealed by airborne gravity and magnetic data, *Tectonophysics*, **614**:128–145.
- Cheng, J. e Sacchi, M. (2016) Fast and memory-efficient singular spectrum analysis of seismic data reconstruction and denoising, SEG 86th Annual Meeting, Dallas, Expanded Abstracts, pp. 4064–4068.
- Chiu, S. K. e Howell, J. E. (2008) Attenuation of coherent noise using localized-adaptive eigenimage filter, SEG, 78th Annual Meeting, Expanded Abstracts, Las Vegas, **27**:2541–2545.
- Claerbout, J. F. (1983) Ground-roll and racial traces., Stanford Exploration Project Report., **SEP-35**:43–53.

- Cook, F. A. (2002) Fine structure of the continental reflection Moho, *Geological Society of America Bulletin*, **114**(1):64–79.
- Cordani, U. G.; Pimentel, M. M.; Araujo, C. E. G. e Fuck, R. A. (2013) The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana, *Brazilian Journal of Geology*, **43**:583–597.
- Crosby, A. G.; Fishwick, S. e White, N. (2010) Structure and evolution of the intracratonic Congo Basin, *Geochemistry Geophysics Geosystem*, **11**.
- Daly, M. C.; Andrade, V.; Barousse, C. A.; Costa, R.; McDowell, K.; Piggott, N. e Poole, A. J. (2014) Brasileiro crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile, *Tectonics*, **33**.
- Deighan, A. J. e Watts, D. R. (1997) Ground-roll suppression using the wavelet transform, *Geophysics*, **62**(6):1896–1903.
- Downey, N. K. e Gurnis, M. (2009) Instantaneous dynamics of the Cratonic Congo basin, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **114**(B6).
- Eaton, D. W. (2006) Multi-genetic origin of the continental Moho: Insights from Lithoprobe, *Terra Nova*, **18**(1):34–43.
- Embree, P.; Burg, J. P. e Backus, M. M. (1963) Wide-band velocity filtering at the pie-slice process, *Geophysics*, **28**(6):948–974.
- Fernandes, R. F. (2011) Estudo da evolução termomecânica da Bacia do Parnaíba, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fonseca, M. A.; de Oliveira, C. G. e Evangelista, H. J. (2004) The Araguaia belt, Brazil: part of a neoproterozoic continental-scale strike-dip fault system, *Journal of the Virtual Explorer*, **17**.
- Freire, S. L. e Ulrych, T. J. (1988) Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling, *Geophysics*, **53**(6):778–785.
- Freire, S. L. M. (1986) Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Góes, A. M. O. e Feijó, F. J. (1994) A Bacia do Parnaíba, *Boletim de Geociências da Petrobras*, **8**:57–67.
- Góes, A. M. O.; Souza, J. M. P. e Teixeira, L. B. (1990) Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba, *Boletim de Geociências da Petrobras*, **4**:55–64.
- Golub, B. H. e van Loan, C. F. (1996) *Matrix Computations*, The John Hopkins University Press, Baltimore, 3ª edic..

- Golyandina, N. e Zhigljavsky, A. (2013) Singular spectrum analysis for time series, Springer Science & Business Media.
- Graps, A. (1995) An introduction to wavelets, IEEE computational science and engineering, **2**(2):50–61.
- Hanssen, P. (2003) The influence of basalt layers on seismic wave propagation, Tese de Doutorado, University of Edinburgh; College of Science and Engineering; School of GeoScience, Edinburgh - Germany.
- Hartley, R. W. e Allen, P. A. (1994) Interior cratonic basins of Africa: Relation to continental break-up and role of mantle convection, Basin Research, **6**(2-3):95–113.
- Holliger, K. e Levander, A. R. (1992) A stochastic view of lower crustal fabric based on evidence from the ivrea zone, Geophysical Research Letters, **19**(11):1153–1156.
- Holliger, K.; Carbonell, R. e Levander, A. R. (1992) Sensitivity of the lateral correlation function in deep seismic reflection data, Geophysical Research Letters, **19**(22):2263–2266.
- Mallat, S. G. (1989) A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, **11**(7):674–693.
- Manenti, R.; Souza, W. e Porsani, M. (2017) Deep structures seismic enhancement using singular spectral analysis in time and frequency domain – application in a Parnaíba basin line – Brazil, In: *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*.
- Manenti, R. R. (2013) O uso da transformada radial e filtros SVD e derivada temporal 2D para atenuação do ground-roll, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Manenti, R. R. e Porsani, M. J. (2013) Ground-roll attenuation applying adaptive singular value decomposition method in the radial domain, In: *2013 SEG Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists.
- Manenti, R. R. e Porsani, M. J. (2016) Spectral whitening using single-trace singular value decomposition applied to vibroseis data, SEG, 86th Annual Meeting, Dallas, Expanded Abstract, pp. 4825–4829.
- Manenti, R. R.; Souza, W. E. e Porsani, M. J. (2018) Spectral whitening in the time domain by using a single-trace singular value decomposition method, Journal of Geophysics and Engineering.
- de Matos, M. C.; Osório, P. L. M. et al. (2002) Wavelet transform filtering in the 1d and 2d for ground roll suppression, In: *2002 SEG Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists.

- Melo, P. E. M.; Porsani, M. J. e Silva, M. G. (2009) Ground-roll attenuation using a 2D time-derivative filter, *Geophysical Prospecting*, **57**:343–353.
- Mocitaiba, L. S.; de Castro, D. L. e de Oliveira, D. C. (2017) Cartografia geofísica regional do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba, *Geologia USP. Série Científica*, **17**(2):169–192.
- Mojica, O. F.; Porsani, M. J. e Silva, M. G. (2011) Aplicações da filtragem svd na análise de velocidades e no empilhamento cmp, *Resumo Expandido CisBGf*.
- Neelamani, R.; Baumstein, A. I.; Gillard, D. G.; Hadidi, M. T. e Soroka, W. L. (2008) Coherent and random noise attenuation using the curvelet transform, *The Leading Edge*, **27**(2):240–248.
- Oropeza, V. e Sacchi, M. (2011) Simultaneous seismic data denoising and reconstruction via multichannel singular spectrum analysis, *Geophysics*, **76**(3):V25–V32.
- Porsani, M.; Silva, M. e Ursin, B. (2017) Recursive-iterative zero-phase filtering via singular spectrum analysis, In: *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*.
- Porsani, M. J.; Silva, M. G.; Melo, P. E. M. e Ursin, B. (2009) Ground-roll attenuation based on SVD filtering, *SEG Expanded Abstracts*, **28**:3381–3385.
- Porsani, M. J.; Artola, F. A. V.; Silva, M. G. e Melo, P. E. M. (2010) Filtragem SVD aplicada à melhoria do rastreamento de horizontes sísmicos, *Revista Brasileira de Geofísica*, **28**:473–480.
- Rosa, A. L. R. (2010) Análise do sinal sísmico, *Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro.
- Saatçılar, R. e Canitez, N. (1988) A method of ground-roll elimination, *Geophysics*, **53**(7):894–902.
- Santos, S. (2014) Atenuação do ground-roll utilizando a filtragem direcional radial, *Trabalho de Conclusão de curso*. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Silva, M.; Porsani, M. e Ursin, B. (2016) A single-trace singular-value decomposition method with application to the ground-roll removal, In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*, pp. 4659–4663, Society of Exploration Geophysicists.
- Silva, M. G. (2015) Empilhamento automático ao longo do mergulho local e novos métodos para o processamento sísmico no domínio do tempo, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Sleep, N. H. e Snell, N. S. (1976) Thermal contraction and flexure of mid-continent and Atlantic marginal basins, *Geophysical Journal International*, **24**(1):125–154.

- Sloss, L. L. e Scherer, W. (1975) Geometry of sedimentary basins: Applications to the Devonian of North America and Europe, Geological Society of America Memoirs, **142**:77–81.
- Tozer, B.; Watts, A. e Daly, M. (2017) Crustal structure, gravity anomalies and subsidence history of the Parnaíba cratonic basin, Northeast Brazil, Journal of Geophysical Research: Solid Earth.
- Vaz, P. T.; Rezende, N. G. A. M. e Filho, J. R. W. (2007) A Bacia do Parnaíba, Boletim de Geociências da Petrobras, **15**:253–263.
- Wang, J.; Sun, X.; Sun, S. Z.; Zhang, J. et al. (2013) Seismic denoising in curvelet domain: an adaptive thresholding based on local variance analysis, In: *2013 SEG Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists.
- Welland, G. (2003) Beyond wavelets. Number 10 in Studies in Computational Mathematics, Academic Press, Sep.
- Wiggins, R. A. (1966) ω -k filter design, Geophysical Prospecting, **14**(s2):427–440.
- Yilmaz, O. (2001) Seismic data analysis: processing, inversion and interpretation of seismic data, Society of Exploration Geophysicists - SEG, Tulsa - Oklahoma - USA.