



**DECONVOLUÇÃO DE DADOS
SÍSMICOS DE REFLEXÃO
UTILIZANDO MUDANÇA DE
FASE DO FILTRO DE
WIENER-LEVINSON**

DORIAN CARABALLO LEDESMA

SALVADOR – BAHIA
NOVEMBRO – 2011

Deconvolução de dados sísmicos de reflexão utilizando mudança de fase do filtro de Wiener-Levinson

por

DORIAN CARABALLO LEDESMA

Bacharel em Física (Universidad Industrial de Santander – 2004)

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

TESE DE DOUTORADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

DOUTOR EM CIÊNCIAS

EM

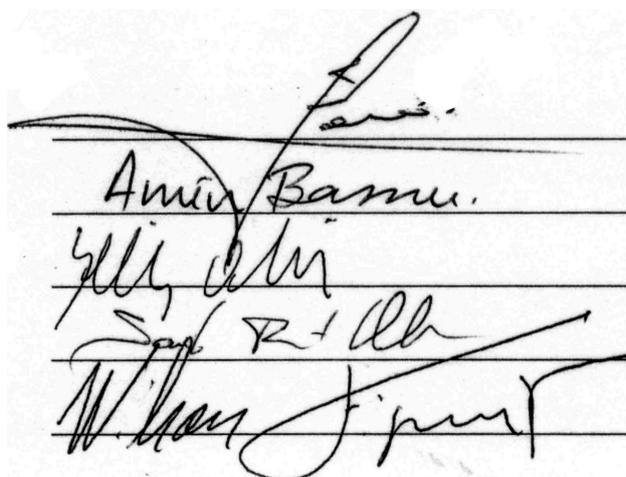
GEOFÍSICA

à

Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa

da

Universidade Federal da Bahia



The image shows a vertical list of five handwritten signatures on a light-colored background. The signatures are written in black ink and are somewhat stylized. From top to bottom, they correspond to the names listed in the adjacent text block.

Comissão Examinadora

Dr. Milton José Porsani - UFBA

Dr. Amin Bassrei - UFBA

Dr. Sergio Adriano Moura Oliveira - UENF

Dr. Saulo Pomponet Oliveira - UFPR

Dr. Wilson Mouzer Figueiró - UFBA

Aprovada em 17 de novembro de 2011

A presente pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Geofísica de Exploração de Petróleo no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA, com recursos próprios e do convenio Rede01 - Rede de Risco Exploratório, CTPETRO/FINEP/Petrobras

L473 Ledesma, Dorian Caraballo,

Deconvolução de dados sísmicos de reflexão utilizando mudança de fase do filtro de Wiener-Levinson / Dorian Caraballo Ledesma. — Salvador, 2011.

78 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2011.

1. Método de reflexão sísmica – Deconvolução. 2. Prospecção – Métodos geofísicos. 3. Petróleo – Prospecção. I. Porsani, Milton José. II. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 550.834.5

*Quando você acredita em algo tem a
força para desafiar o caminho difícil.*

Resumo

Uma tarefa importante do processamento de dados sísmicos é a deconvolução. Ela tem o objetivo de melhorar a resolução temporal e a coerência espacial dos refletores presentes nas seções sísmicas. O método de deconvolução de Wiener-Levinson (WL) é o método clássico. Neste método o filtro é causal, também denominado de filtro de fase mínima, e é obtido com o método dos mínimos quadrados, através da solução de um sistema de equações normais. Tal filtro não é eficaz na deconvolução de pulsos de fase mista uma vez que estes não admitem inversa causal. Consequentemente, se o pulso sísmico não é de fase mínima o filtro de WL não produz um bom resultado. Apesar disso ele é normalmente utilizado porque pode ser obtido de forma simples e rápida.

Na presente tese mostramos que a deconvolução utilizando o filtro inverso de fase mista, obtido através de operadores *all-pass*, preserva a equivalência com o espectro de amplitude da deconvolução de WL, e pode extrair a informação de fase do filtro e também do pulso estimado. O novo procedimento utiliza operadores *all-pass* para mudar a fase do filtro de fase mínima de WL, ou o pulso a ele associado. Testamos duas abordagens para obtenção de filtros inversos ótimos. Na primeira, os operadores *all-pass* são formados a partir de raízes fictícias do pulso sísmico, distribuídas, no plano complexo, na forma de uma coroa exterior ao círculo de raio unitário. Na segunda abordagem são utilizadas diretamente as raízes calculadas a partir do filtro de WL. Mostramos que as duas abordagens permitem a obtenção de filtros inversos para a deconvolução de pulsos de fase mista e podem ser utilizadas com sucesso no processamento de dados sísmicos.

Para solução do problema de otimização, na escolha do filtro inverso ótimo, utilizamos o algoritmo genético, e para quantificar o desempenho dos operadores *all-pass* e selecionar o filtro inverso ótimo utilizamos a norma varimax do traço deconvolvido.

O método de deconvolução de fase mista obtido através de operadores *all-pass*, foi testado sobre dados sísmicos sintéticos e dados sísmicos reais, utilizando seções sísmicas 2D na Bacia do Jequitinhonha. O novo método pode ser implementado computacionalmente de forma relativamente simples e pode ser utilizado para melhorar a identificação dos eventos sísmicos

refletidos e revelar em maior detalhe as feições sismo-estratigráficas e estruturais, de interesse para a exploração e o estudo de reservatórios de hidrocarbonetos.

Abstract

An important task in seismic data processing is the deconvolution, the main objective is to improve the temporal resolution and the spatial coherence of the reflections of the seismic traces. The Wiener-Levinson (WL) deconvolution method is the standard method, in it the filter is causal, also called the minimum phase filter, and obtained with the method of least squares by solving a system normal equations. Such a filter is not effective in deconvolution pulses mixed phase because they do not admit inverse causal. Yet it is commonly used because it can be obtained quickly and easily.

In this thesis we show that the deconvolution using the inverse filter of mixed phase, obtained through operators all-pass, preserve the equivalence with the amplitude spectrum of the WL deconvolution and can extract the phase information of the filter and also estimated pulse. The new procedure uses operators all-pass to change the phase of the WL minimum phase filter, or the pulse associated. We tested two approaches to obtain optimal inverse filters, at first, all-pass operators are formed from roots fictitious seismic pulse, distributed in the complex plane, in the form of a wreath outside the circle of unit radius. In the second approach the roots are used directly calculated from the WL filter. We show that the two approaches allow to obtain inverse filters for deconvolution of mixed-phase pulses and can be successfully used in seismic data processing.

To solve the problem of optimization, the optimal choice of the inverse filter, we use the genetic algorithm, and to quantify the performance of operators all-pass and to select the optimal inverse filter, we use the standard varimax deconvolvido trace.

The deconvolution method of mixed phase, using all-pass operators, has been tested using synthetic and real seismic data. We also illustrate the method using 2D seismic section in the Jequitinhonha Basin.

For better visualization of the results were different selected areas in the basin where the method was implemented, the application is very important to improve the identification of seismic events reflected in more detail and reveal the features of seismic-stratigraphic and

structural interest for exploration and study of hydrocarbon reservoirs.

Índice

Resumo	4
Abstract	6
Índice de Figuras	11
Introdução	15
Capítulo 1 Conceitos básicos	18
1.1 Introdução	18
1.2 O modelo convolucional do traço sísmico	18
1.3 A deconvolução de Wiener-Levinson	19
1.3.1 O filtro de Wiener-Levinson	20
1.3.2 O pulso de fase mínima associado ao filtro de Wiener-Levinson	21
1.4 Operadores <i>all-pass</i>	22
1.4.1 Espectro de potência e operadores <i>all-pass</i>	23
1.5 Norma Varimax	25
Capítulo 2 Operadores <i>all-pass</i> para filtros inversos e pulsos de fase mista	27
2.1 Introdução	27
2.2 Operador <i>all-pass</i> utilizando raízes estimadas do pulso de fase mínima	27

2.2.1	Obtenção do pulso de fase mista	28
2.2.2	Obtenção do filtro de fase mista	29
2.3	Operador <i>all-pass</i> utilizando raízes estimadas do filtro de WL	29
2.3.1	Obtenção do filtro de fase mista	30
2.3.2	Obtenção do pulso de fase mista	30
2.4	Operador <i>all-pass</i> utilizando raízes fictícias	32
Capítulo 3 Obtenção do filtro inverso ótimo com o algoritmo genético		35
3.1	Introdução	35
3.2	O problema de otimização a ser resolvido	35
3.3	O algoritmo genético	36
3.3.1	Geração da população inicial	36
3.3.2	Aplicação dos operadores genéticos	38
Capítulo 4 Resultados utilizando operador <i>all-pass</i> com raízes fictícias		40
4.1	Introdução	40
4.2	Deconvolução e estimativa do pulso	41
4.3	Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico sintético	42
4.4	Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico real	44
4.5	Deconvolução de seções sísmicas 2D	45
Capítulo 5 Resultados utilizando operador <i>all-pass</i> formado com raízes do filtro de Wiener-Levinson		55
5.1	Introdução	55
5.2	Deconvolução e estimativa do pulso	56
5.3	Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico sintético	58

5.4	Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico real	60
5.5	Deconvolução de seções sísmicas 2D	62
Capítulo 6	Conclusões	71
	Agradecimentos	73
	Referências	74
Apêndice A	Obtenção de filtros inversos utilizando as equações estendidas de Yule-Walker	76

Índice de Figuras

1.1	Modelo de sistema linear representando a obtenção do traço sísmico.	19
1.2	Sinal causal $\{a_n\} = \{1, 0.5\}$ à esquerda, e anticausal $\{a_{r,n}\} = \{0.5, 1\}$ à direita.	24
1.3	Autocorrelação e espectro de potência correspondentes aos sinais mostrados na Figura 1.2.	24
1.4	Representação no plano complexo das raízes do operador <i>all-pass</i>	24
1.5	Exemplos de sinais discretos utilizados no cálculo da norma varimax. Um único impulso em A, dois, quatro e oito impulsos em B, C e D, respectivamente.	25
1.6	Valores calculados da norma varimax, relativos aos sinais da Figura 1.5. . .	26
2.1	Representação no plano complexo das raízes de um polinômio de fase mínima.	28
2.2	Representação no plano complexo das raízes de um polinômio de fase mista.	29
2.3	Fluxo utilizando raízes estimadas do filtro de fase mínima (WL).	31
2.4	Representação no plano complexo da configuração de raízes fictícias utilizadas na obtenção do operador <i>all-pass</i>	33
2.5	Fluxo do método de configuração das raízes fictícias.	34
3.1	Fluxograma do AG ilustrando a ação dos operadores genéticos e a geração da nova população.	39
4.1	Deconvolução e estimativa de um pulso. Pulso de fase mista original em (A). Pulsos de fase mínima e mista estimados em (B) e (C), respectivamente. Filtro inverso ótimo em (D).	41
4.2	Desempenho do AG na deconvolução do pulso de fase mista (Fig. 4.1A). Valores da norma varimax (máximos, médios e mínimos) da população ao longo de 30 gerações. As curvas com comportamento ascendente mostram convergência do AG.	42

4.3	Deconvolução de um traço sintético. Pulso de fase mista em (A), função refletividade pseudo-aleatória em (B), e traço sísmico sintético em (C). Deconvolução de fase mínima em (D) e de fase mista com o filtro ótimo em (E).	43
4.4	Estimativa dos pulsos e filtro ótimo. Pulso de fase mínima em (A). Pulso de fase mista em (B), e seu correspondente filtro inverso ótimo em (C).	43
4.5	Desempenho do AG na obtenção do filtro inverso ótimo para deconvolução do traço sintético, mostrado na Figura 4.3	44
4.6	Deconvolução de um traço sísmico real. Traço sísmico real extraído de uma seção empilhada em (A). Resultado da deconvolução de fase mínima em (B) e resultado da deconvolução de fase mista utilizando o filtro inverso ótimo obtido com o AG em (C).	45
4.7	Pulsos e filtro inverso estimados. Pulso de fase mínima em (A), pulso de fase mista em (B) e filtro inverso ótimo em (C).	46
4.8	Desempenho do AG na obtenção do filtro inverso ótimo para deconvolução do traço sísmico real, mostrado na Figura 4.6a.	46
4.9	Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, mostrando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com visualização <i>wiggle trace</i> .	48
4.10	Resultados da deconvolução da área 2 com <i>wiggle trace</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	49
4.11	Resultados da deconvolução da área 1 com <i>wiggle trace</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	50
4.12	Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, indicando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com visualização <i>variable density</i>	51
4.13	Resultados da deconvolução da área 1 com <i>variable density</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	52
4.14	Resultados da deconvolução da área 2 com <i>variable density</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	53
4.15	Espectros de amplitude médio dos dados originais e deconvolvidos da seção sísmicas 2D da Bacia do Jequitinhonha.	54

5.1	Deconvolução e estimativa do pulso. O pulso de fase mista em (A), pulsos de fase mínima e mista estimados em (B) e (C), o filtro de fase mista ótimo estimado (D), e o resultado da deconvolução do pulso original com o filtro inverso estimado em (E).	57
5.2	Desempenho do AG na deconvolução do pulso sintético Figura 5.1a. Valores da norma varimax (máximos, médios e mínimos) da população ao longo de 30 gerações. As curvas com comportamento ascendente ilustram a convergência do AG.	57
5.3	Deconvolução de um traço sintético. Pulso de fase mista em (A), função refletividade pseudo-aleatória em (B), e traço sísmico sintético em (C). Deconvolução de fase mínima em (D) e de fase mista com o filtro ótimo em (E).	59
5.4	Estimativa dos pulsos e filtro ótimo. Pulso de fase mínima em (A). Pulso de fase mista em (B), e seu correspondente filtro inverso ótimo em (C).	59
5.5	Performance do algoritmo genético para estimar o melhor filtro de fase mista que deconvolve o traço sintético representado na Figura 5.3.	60
5.6	Na Figura: (A) mostra o traço real, (B) é a deconvolução com o filtro de Wiener Levinson e (C) é a deconvolução com o filtro ótimo de fase mista calculado.	61
5.7	Na Figura (A) mostra o filtro de fase mínima estimado, (B) o pulso de fase mista estimado, e (C) o filtro de fase mista ótimo estimado.	61
5.8	Performance do algoritmo genético para estimar o melhor filtro de fase mista que deconvolve o traço real da Figura 5.6.	62
5.9	Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, mostrando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com <i>wiggle trace</i>	64
5.10	Resultados da deconvolução da área 1 com <i>wiggle trace</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	65
5.11	Resultados da deconvolução da área 2 com <i>wiggle trace</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	66
5.12	Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, indicando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com <i>variable density</i>	67
5.13	Resultados da deconvolução da área 1 com <i>variable density</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	68

5.14	Resultados da deconvolução da área 2 com <i>variable density</i> . Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).	69
5.15	Espectros de amplitude médio dos dados originais e deconvolvidos da Seção sísmica 2D da Bacia do Jequitinhonha.	70

Introdução

Dentre os métodos geofísicos, o método sísmico de reflexão é o mais utilizado na exploração de hidrocarbonetos. Ele permite, como nenhum outro, a obtenção de uma imagem da sub-superfície que reflete com clareza a geologia das bacias sedimentares. A melhoria da qualidade das imagens sísmicas e o aumento da capacidade de identificar e discriminar os refletores sísmicos é um dos maiores desafios do método sísmico de reflexão. Com o objetivo de melhorar a resolução, a qualidade e fidelidade das imagens sísmicas, novos métodos de processamento e filtragem dos dados sísmicos vem sendo continuamente desenvolvidos.

A deconvolução é um procedimento de filtragem utilizado no tratamento de sinais com importantes aplicações em diferentes campos da ciência a exemplo do processamento de sinais de radar e de imagens astronômicas, para melhorar a nitidez com que se pode observar as imagens celestes. Na sísmica de exploração de petróleo, particularmente no estudo de reservatórios, a deconvolução representa uma etapa importante do processamento sísmico. Ela é aplicada com o objetivo de melhorar a resolução temporal dos traços, permitindo uma melhor identificação do topo e base de camadas mais delgadas e, conseqüentemente uma melhor definição da geologia de sub-superfície. Quando a deconvolução é usada com este objetivo, é denominada deconvolução do pulso ou *spiking deconvolution* (Robinson e Treitel (1982); Robinson (1954)).

A deconvolução também é usada para atenuar as reflexões múltiplas que ocorrem quando a energia sísmica é refletida mais que uma vez em cada interface. Neste caso as reflexões múltiplas são consideradas como ruídos a serem eliminados e a deconvolução é denominada de deconvolução preditiva (Robinson e Treitel (1982)). A deconvolução do pulso tem o objetivo de comprimir a forma do pulso para recuperar a função refletividade ou resposta impulsiva do meio. Na grande maioria dos casos o pulso sísmico não é conhecido estando disponível apenas uma estimativa de sua função de autocorrelação, a qual é obtida diretamente a partir dos traços sísmicos. Quando o pulso não é de fase mínima, o método clássico conhecido como deconvolução de Wiener-Levinson (WL) não fornece os melhores resultados. As limitações do método de WL são bem conhecidas e vários autores têm trabalhado investigando métodos

e estratégias que forneçam bons resultados para situações realistas da exploração de petróleo, quando o pulso sísmico não é necessariamente de fase mínima ou quando a refletividade não é necessariamente aleatória.

Nas últimas duas décadas, vários trabalhos sobre deconvolução e estimativa do pulso sísmico têm aparecido na literatura geofísica. Na maioria das vezes os autores focalizam e tentam resolver os problemas relacionados com o caráter de fase do pulso sísmico (Eisner e Hampson (1990); Lazear (1993); Leinbach (1993); Porsani e Ursin (1998); Porsani e Ursin (2000); Ursin e Porsani (2000); Sacchi e Ulrych (2000); Misra e Sacchi, 2006; Misra e Chopra (2010); Lu e Wang (2007); Velis e Ulrych (1996); Levi e Oldenburg (1982); Van der Baan (2008); Van der Baan e Pham (2008)).

Porsani e Ursin (2000), utilizaram a solução das equações estendidas de Yule-Walker e demonstraram ser possível obter filtros de fase mista associados a pulsos de fase mínima. Esses autores estimam raízes do polinômio associado ao pulso de fase mínima e os filtros de fase mista são obtidos utilizando-se operadores *all-pass*. Desta forma um número grande de filtros de fase mista pode ser obtido e utilizado na deconvolução do pulso sísmico. A obtenção do melhor filtro é conduzida resolvendo-se o problema de otimização através do algoritmo genético (AG) (Goldberg (1989); Holland (1975)).

Na presente tese apresentamos dois novos procedimentos para a deconvolução que simplificam o método originalmente proposto por Porsani e Ursin (1998). Estas novas abordagens são testadas e validadas sobre dados sintéticos e reais.

O texto está organizado da seguinte maneira:

O capítulo 1 apresenta os conceitos básicos utilizados na deconvolução, ou seja, o modelo sísmico convolucional, a deconvolução de Wiener-Levinson (DWL), a teoria de operadores *all-pass* e a Norma Varimax (Wiggins, 1978) que é utilizada para quantificar a eficácia da deconvolução.

O capítulo 2 apresenta os métodos propostos, sendo o primeiro uma alternativa ao método de deconvolução de Porsani e Ursin (1998), onde se tem agora o conjunto artificial de raízes fora do círculo unitário para obtenção dos operadores *all-pass*, mostrando que não é necessário resolver as equações de Yule-Walker, como propõe o método de Porsani e Ursin (1998). Também se apresenta um segundo método com uma nova abordagem para a obtenção dos operadores *all-pass*, agora utilizando diretamente os filtros de WL. As raízes do polinômio correspondente ao filtro de WL são utilizadas na construção de filtros *all-pass* que, por sua vez, são utilizados na mudança da fase do filtro de WL.

O capítulo 3 mostra como é implementado o processo de otimização, o qual é conduzido através do algoritmo genético (AG) para obtenção do filtro ótimo de fase mista com os operadores *all-pass*, esta otimização foi aplicada em ambos os métodos.

O capítulo 4 ilustra como é implementado o método com raízes fictícias na deconvolução de dados sísmicos sintéticos e reais, e no capítulo 5, da mesma forma que no capítulo 4 mostra também como é implementado o método com raízes do filtro de WL na deconvolução de dados sísmicos sintéticos e reais.

Finalmente, nas conclusões, resumizamos os principais resultados mostrando que o novo método de deconvolução é eficiente e proporciona maior resolução temporal dos traços sísmicos, permitindo uma melhor identificação dos eventos refletidos, revelando em maior detalhe, as feições sismo-estratigráficas e estruturais (Taner e Sheriff (1977); Gan e Wang (2009); Taner e Sheriff (1979)) de interesse para a exploração e o estudo de reservatórios de hidrocarbonetos.

Capítulo 1

Conceitos básicos

1.1 Introdução

No presente capítulo apresentamos os conceitos básicos que serão utilizados neste trabalho. As seções descrevem: (i) o modelo convolucional do traço sísmico e o significado da palavra deconvolução; (ii) o método de Wiener-Levinson (WL) para obtenção dos filtros inversos utilizados na deconvolução de WL (também conhecida como deconvolução de fase mínima) e o significado do conceito fase mínima (iii) os operadores *all-pass* (utilizados na mudança de fase dos filtros) e finalmente, (iv) a norma varimax utilizada na avaliação do desempenho de filtros de fase mista.

1.2 O modelo convolucional do traço sísmico

Na teoria de sistemas lineares o traço sísmico pode ser representado como resultado da convolução do pulso sísmico com a resposta impulsiva do meio, também denominada de função refletividade, (Yilmaz, 1987). Matematicamente pode-se escrever,

$$x_t = p_t * r_t + \eta_t, \quad (1.1)$$

onde:

- x_t - traço sísmico
- p_t - pulso sísmico que acompanha cada evento refletido
- r_t - resposta impulsiva ou função refletividade
- η_t - ruído aditivo

A Figura 1.1 ilustra o modelo convolucional do traço sísmico.

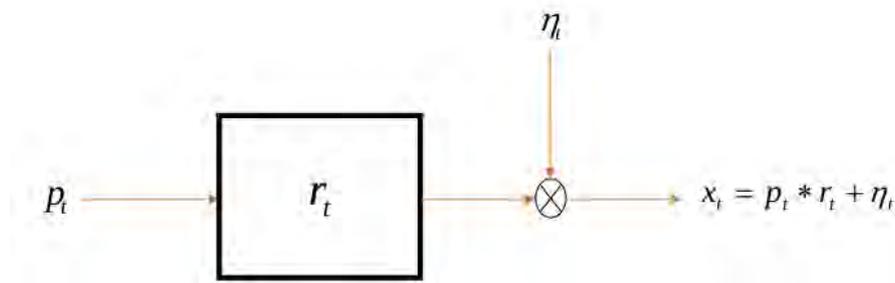


Figura 1.1: Modelo de sistema linear representando a obtenção do traço sísmico.

Valendo-se do modelo convolucional do traço sísmico e deixando c_t representar o filtro inverso do pulso ($c_t = p_t^{-1}$), podemos verificar que a função refletividade pode ser recuperada, conforme indicado a seguir.

$$c_t * p_t = \delta_t, \tag{1.2}$$

onde δ_t representa a delta de Kronecker. Convolvendo c_t com a equação (1.1) obtém-se,

$$\begin{aligned} \tilde{r}_t = c_t * x_t &= c_t * p_t * r_t + c_t * \eta_t \\ &= \delta_t * r_t + c_t * \eta_t \\ &= r_t + c_t * \eta_t \end{aligned}$$

Considerando o ruído η_t desprezível podemos verificar que a convolução do traço com o filtro inverso restitui a função refletividade. Neste caso dizemos que o traço sísmico foi deconvolvido.

Deconvolução do pulso sísmico é portanto a convolução do pulso com o seu inverso. O filtro inverso quando convolvido com um sismograma extrai a resposta impulsiva do meio, ou seja, recupera a função refletividade.

1.3 A deconvolução de Wiener-Levinson

O método clássico utilizado na deconvolução do pulso sísmico é conhecido como deconvolução de Wiener-Levinson, também conhecido como deconvolução de fase mínima. A denominação de fase mínima é dada a polinômios $P(Z)$ cujas raízes, no plano complexo Z , estão situadas fora do círculo de raio unitário. Quando a forma da ondaleta, que denominamos de pulso sísmico, não é conhecida (caso mais comum) a obtenção do filtro inverso é calculada de forma estatística através do método dos mínimos quadrados (Yilmaz, 1987). Este método possui

3 etapas básicas:

- (i) estimativa dos coeficientes da função de autocorrelação (FAC),
- (ii) obtenção do filtro inverso de Wiener-Levinson (WL), e
- (iii) aplicação do filtro no(s) traço(s) sísmico(s), mediante convolução ($c_t * x_t$) (deconvolução).

No método de WL o filtro inverso é obtido a partir da solução das equações normais. Tais filtros c_t são causais, com $t = 0, \dots, N$, fazendo com que possam ser o inverso apenas de pulsos de fase mínima uma vez que apenas pulsos de fase mínima possuem inversa causal (Robinson, 1954). Como consequência, o método de WL é utilizado sob a hipótese que o pulso, presente no traço sísmico, é de fase mínima.

Outra limitação do método de WL está relacionada com a FAC utilizada na obtenção do filtro inverso. Considerando-se que o pulso sísmico não está disponível, sua autocorrelação é estimada diretamente a partir do(s) traço(s) sísmico(s) que se deseja deconvolver. Neste caso os coeficientes da FAC do traço, $Rxx(t)$, representam uma boa estimativa da FAC do pulso, $Rpp(t)$, somente quando a função refletividade, $r(t)$, for representada por uma série aleatória. Somente assim, ao menos teoricamente, a FAC estimada diretamente a partir dos traços sísmicos representa uma boa estimativa da FAC do pulso (Yilmaz (1987); Robinson e Treitel (1982); Leinbach (1993); Porsani e Ursin (1998)).

1.3.1 O filtro de Wiener-Levinson

O filtro de WL é normalmente obtido através do método dos mínimos quadrados. Utilizando-se o modelo linear preditivo para representar o traço sísmico x_t podemos escrever:

$$\tilde{x}_t = \tilde{a}_1 x_{t-1} + \dots + \tilde{a}_N x_{t-N} \quad (1.3)$$

onde o erro de predição (ou resíduo) é $e_t = x_t - \tilde{x}_t$ e obtém-se também:

$$e_t = x_t - \tilde{a}_1 x_{t-1} + \dots + \tilde{a}_N x_{t-N} \quad (1.4)$$

pode-se também representar a equação na forma matricial:

$$e_t = [x_t \quad x_{t-1} \quad \dots \quad x_{t-N}] \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{c}_1 \\ \vdots \\ \tilde{c}_N \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

com $\tilde{c}_j = -\tilde{a}_j$, como exemplo podemos representar na forma matricial para o filtro com $N = 3$ coeficientes

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ e_{M+2} \\ e_{M+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & 0 \\ x_3 & x_2 & x_1 & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & x_{M-1} & x_{M-2} & x_{M-3} \\ 0 & x_M & x_{M-1} & x_{M-2} \\ 0 & 0 & x_M & x_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \\ \tilde{c}_3 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

A forma quadrática obtida com a soma dos resíduos quadrados $\sum_i e_i^2 = Q(\tilde{c})$ pode ser minimizada com respeito aos parâmetros $\tilde{c}_j, j = 1, \dots, N$, resultando no sistema de equações normais (ENs), representado a seguir em sua forma matricial ampliada,

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_{-1} & \dots & r_{-N} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{-1} \\ r_N & \dots & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{c}_1 \\ \vdots \\ \tilde{c}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\tilde{c},N} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

onde $E_{\tilde{c},n}$ representa a soma total dos resíduos quadrados minimizados e r_k representa o coeficiente k da função de autocorrelação, FAC, do traço sísmico, isto é:

$$r_k = \sum x_t x_{t+k} . \quad (1.8)$$

Sob as hipóteses seguintes: (i) que o pulso que se deseja deconvolver é de fase mínima, (ii) que a razão Sinal/Ruído é alta, e (iii) que a função refletividade é aleatória, o método de WL fornece bons resultados.

1.3.2 O pulso de fase mínima associado ao filtro de Wiener-Levinson

O filtro de WL é obtido como solução do sistema de equações (1.7). O filtro é causal e o polinômio inverso correspondente $\tilde{P}(Z) = 1/\tilde{C}(Z)$ também é causal e de fase mínima uma vez que somente pulsos de fase mínima possuem inversa causal (Robinson, 1954). Portanto, um método simples e numericamente estável, que pode ser utilizado para obtenção do pulso de fase mínima é o método da divisão polinomial exata, onde os coeficientes do pulso são obtidos resolvendo-se o sistema triangular de equações, apresentado a seguir:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \tilde{c}_1 & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ \tilde{c}_2 & \tilde{c}_1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{p}_1 \\ \tilde{p}_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Os coeficientes do pulso de fase mínima $\{\tilde{p}_j\}$ são calculados com retrosubstituição dos índices menores para os maiores, uma vez que o sistema é triangular inferior.

1.4 Operadores *all-pass*

A resposta em frequência de um filtro *all-pass* tem a magnitude igual a unidade em todas as frequências (Regalia e Vaidyanathan (1988), Claerbout (1985)), ou seja,

$$|A(e^{i\omega})|^2 = 1, \quad (1.10)$$

A equação (1.10) é válida para todo ω , a função de transferência do filtro contém todos os polos e zeros em pares conjugados recíprocos (Regalia e Vaidyanathan (1988), Claerbout (1985)).

Considerando o vetor $\{d_M\} = \{a_1, a_1 \dots a_M\}$ com transformada Z da forma:

$$D(Z) = 1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_M Z^{-M} \quad (1.11)$$

então $A(Z)$ é um filtro *all-pass* de coeficientes reais,

$$A(Z) = \frac{Z^{-M} D(Z^{-1})}{D(Z)} \quad (1.12)$$

O numerador polinomial é obtido do denominador fazendo o reverso da ordem dos coeficientes, como exemplo:

$$A(Z) = \frac{Z^{-2}(1 + a_1 Z + a_2 Z^2)}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}} \quad (1.13)$$

$$A(Z) = \frac{a_2 + a_1 Z^{-1} + Z^{-2}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}} \quad (1.14)$$

$A(Z)$ pode ser expresso também da forma mais geral complexa:

$$A(Z) = \frac{Z^{-M} D^*(1/Z^*)}{D(Z)} \quad (1.15)$$

onde

$$A(Z) = \frac{\gamma_2^* + \gamma_1^* Z^{-1} + \gamma_0^* Z^{-2}}{\gamma_0 + \gamma_1 Z^{-1} + \gamma_2 Z^{-2}} \quad (1.16)$$

1.4.1 Espectro de potência e operadores *all-pass*

Seja o vetor $\{B_t\} = \{b_0, b_1, b_2\}$, onde o espectro de potência, $R(\omega)$, pode ser representado em termos do espectro de Fourier $B(\omega)$ (Papoulis, 1977), como segue,

$$R(\omega) = \|B(\omega)\|^2 = \overline{B(\omega)}B(\omega) \quad (1.17)$$

agora, deixando $Z = e^{i\omega}$ obtemos,

$$R(\omega) = (\tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 e^{-i\omega} + \tilde{b}_2 e^{-i2\omega}) (b_0 + b_1 e^{i\omega} + b_2 e^{i2\omega}) \quad (1.18)$$

$$R(\omega) = \left(\tilde{b}_0 + \frac{\tilde{b}_1}{Z} + \frac{\tilde{b}_2}{Z^2}\right) (b_0 + b_1 Z + b_2 Z^2) \quad (1.19)$$

onde temos agora o relacionamento entre o espectro e a transformada Z :

$$R(\omega) = \overline{B\left(\frac{1}{Z}\right)}B(Z) \quad (1.20)$$

Para um exemplo simples temos os pulsos $\{a_n\} = \{1, 0.5\}$ e $\{a_{r,n}\} = \{0.5, 1\}$ o pulso reverso, Figura 1.2 . Em termos de transformada Z obtém-se $A(Z) = 1 + 0.5Z$ e para o pulso reverso $A(Z^{-1}) = 1 + 0.5Z^{-1}$. Considerando que $ZA(Z^{-1}) = Z + 0.5ZZ^{-1} = Z + 0.5$ podemos representar o o filtro *all-pass* como,

$$D(Z) = \frac{ZA(Z^{-1})}{A(Z)} = \frac{Z + 0.5}{1 + 0.5Z} \quad (1.21)$$

cujo espectro de potência possui valores constantes iguais a 1, conforme demonstra a equação abaixo.

$$R(\omega) = D\left(\frac{1}{Z}\right)D(Z) = \frac{Z^{-1} + 0.5}{1 + 0.5Z^{-1}} \frac{Z + 0.5}{1 + 0.5Z} = 1 \quad (1.22)$$

A Figura 1.3 mostra a autocorrelação (esquerda) e o espectro de potência correspondente (direita). A Figura 1.4 mostra o polo e o zero do filtro *all-pass*.

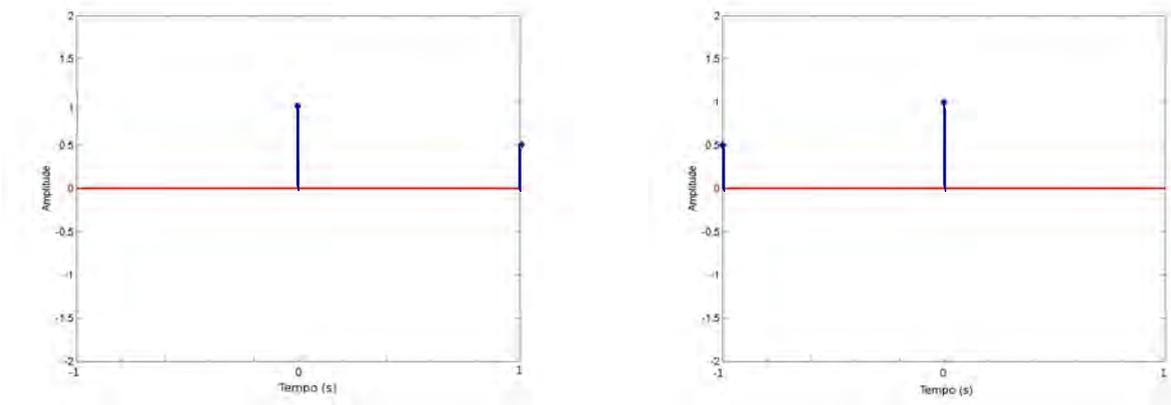


Figura 1.2: Sinal causal $\{a_n\} = \{1, 0.5\}$ à esquerda, e anticausal $\{a_{r,n}\} = \{0.5, 1\}$ à direita.

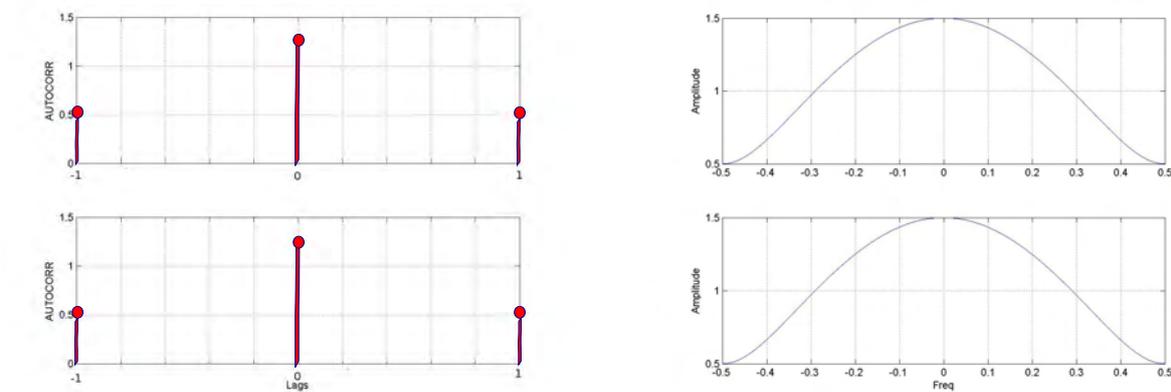


Figura 1.3: Autocorrelação e espectro de potência correspondentes aos sinais mostrados na Figura 1.2.

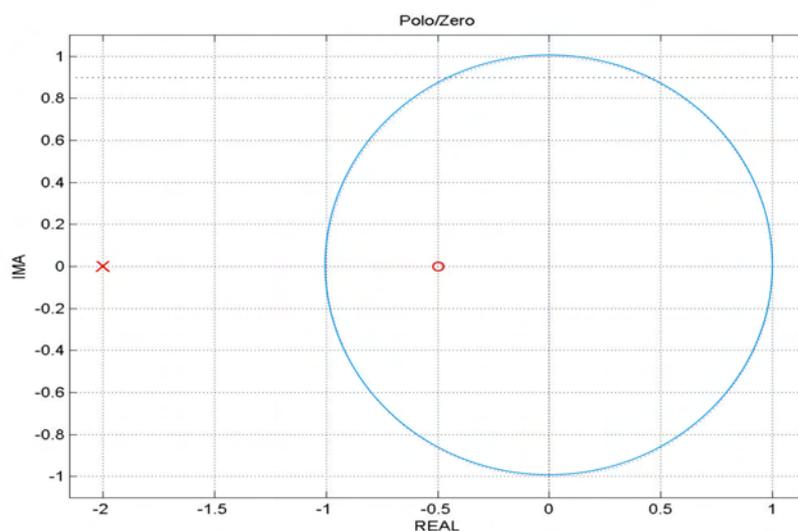


Figura 1.4: Representação no plano complexo das raízes do operador *all-pass*.

1.5 Norma Varimax

A norma varimax foi introduzida por (Wiggins, 1978). Ele utilizou a norma varimax juntamente ao método de deconvolução de entropia mínima, com o propósito de separar as componentes de um sinal formado pela convolução do pulso sísmico com a função refletividade. A norma varimax tem sido utilizada na literatura por outros pesquisadores para avaliar a qualidade da deconvolução (Ooe e Ulrych (1979), Levi e Oldenburg (1982) e Ulrych e Walker (1982)). Ela fornece uma medida da simplicidade de um sinal, no sentido que, quanto menor o número de impulsos distribuídos ao longo do traço sísmico, maior o valor da norma varimax. A equação matemática utilizada no cálculo da norma varimax é dada a seguir.

$$V(e) = \frac{\sum_{i=1} e_i^4}{(\sum_{i=1} e_i^2)^2} \quad (1.23)$$

quando se tem somente um único impulso o valor da varimax é igual a 1. Se o resultado da deconvolução é esparso e representado por muitos zeros, o traço é mais simples e a varimax é maior. A Figura 1.5A a 1.5D apresentam sinais esparsos com um, dois, quatro e oito impulsos, respectivamente. A Figura 1.6 apresenta os valores da norma varimax para os quatro sinais apresentados na Figura 1.5.

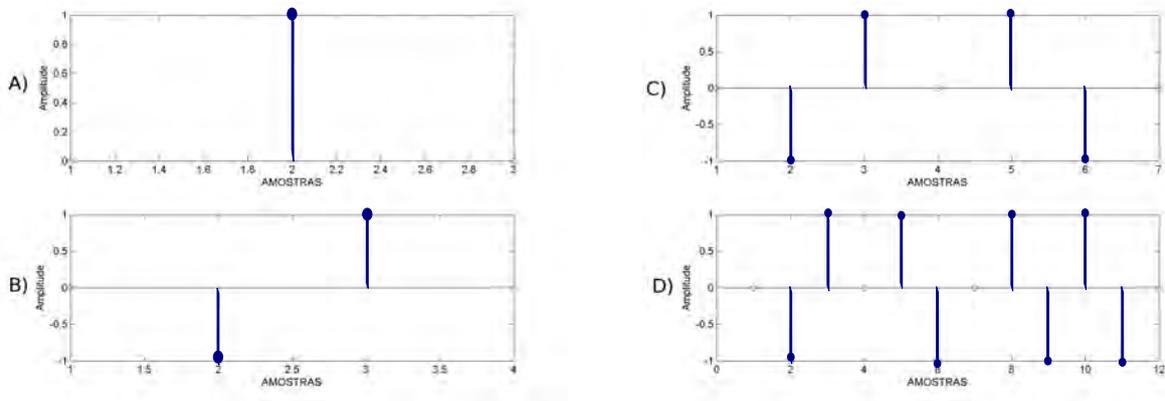


Figura 1.5: Exemplos de sinais discretos utilizados no cálculo da norma varimax. Um único impulso em A, dois, quatro e oito impulsos em B, C e D, respectivamente.

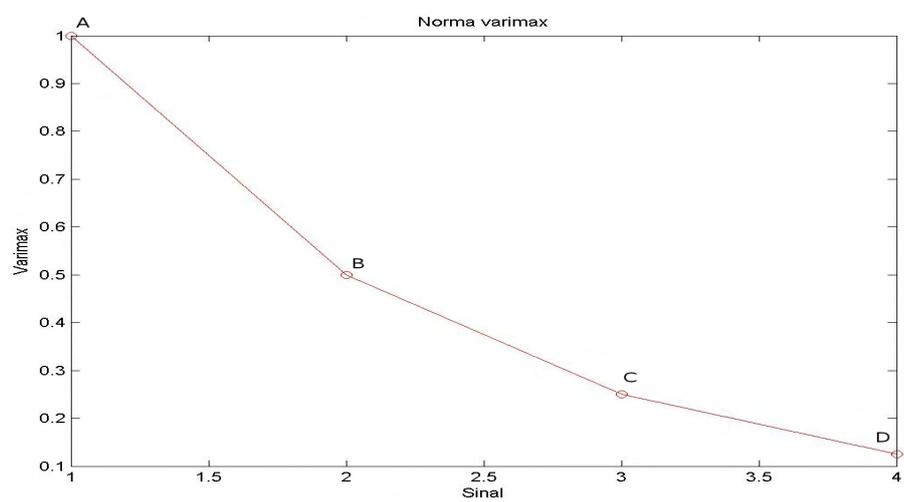


Figura 1.6: Valores calculados da norma varimax, relativos aos sinais da Figura 1.5.

Capítulo 2

Operadores *all-pass* para filtros inversos e pulsos de fase mista

2.1 Introdução

Porsani e Ursin (1998) apresentaram um método para obtenção de filtros inversos de fase mista que utiliza a solução das equações estendidas de Yule-Walker. No Apêndice A apresentamos como este método funciona. No presente capítulo mostramos como podemos obter filtros inversos e pulsos de fase mista partindo-se diretamente do pulso de fase mínima ou do filtro inverso de WL apresentados na seção 1.3 do capítulo 1.

2.2 Operador *all-pass* utilizando raízes estimadas do pulso de fase mínima

Consideremos $\tilde{C}(Z)$ a transformada Z (Oppenheim e Nawab, 1998) do filtro de Wiener-Levinson e $\tilde{P}(Z) = 1/\tilde{C}(Z)$ o polinômio correspondente ao pulso de fase mínima. O polinômio $\tilde{P}(Z)$ possui todas as raízes com amplitude maior que a unidade, ou seja, no plano complexo todas as raízes estão localizadas fora do círculo de raio unitário (Fig. 2.1). Considerando que o polinômio $\tilde{P}(Z)$ é de grau M podemos dividir as M raízes em dois subconjuntos de α e β raízes tal que $\alpha + \beta = M$. Podemos assim fatorar $\tilde{P}(Z)$ representando-o como produto de dois polinômios,

$$\tilde{P}(Z) = {}^{\alpha}A(Z) {}^{\beta}B(Z) \tag{2.1}$$

onde,

$${}^{\alpha}A(Z) = 1 + a_1Z + \dots + a_{M-\beta}Z^{M-\beta} \quad (2.2)$$

$${}^{\beta}B(Z) = 1 + b_1Z + \dots + b_{\beta}Z^{\beta}$$

Uma vez que $\tilde{P}(Z)$ é de fase mínima, também ${}^{\alpha}A(Z)$ e ${}^{\beta}B(Z)$ serão.

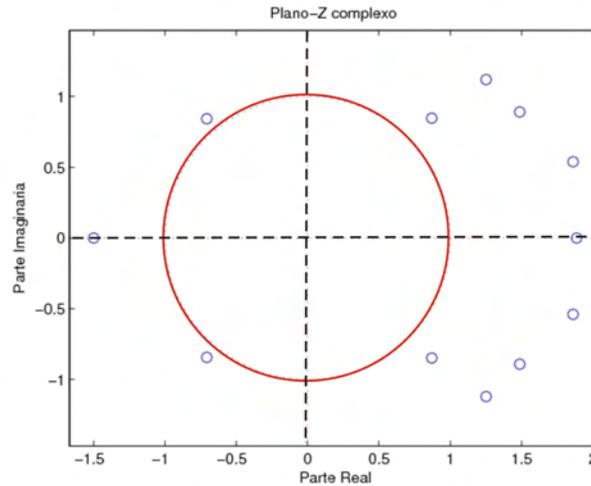


Figura 2.1: Representação no plano complexo das raízes de um polinômio de fase mínima.

2.2.1 Obtenção do pulso de fase mista

Utilizando as equações (2.2) podemos escrever o polinômio de fase mista como segue.

$$P(Z) = {}^{\alpha}A(Z) {}^{\beta}B(Z^{-1})Z^{\beta}. \quad (2.3)$$

Nota-se que o termo em ${}^{\beta}B(Z^{-1})Z^{\beta}$ representa o polinômio causal de fase máxima

$${}^{\beta}B(Z^{-1})Z^{\beta} = b_{\beta} + \dots + b_1Z^{\beta-1} + 1Z^{\beta}. \quad (2.4)$$

Temos assim β raízes no interior do círculo de raio unitário, conforme ilustra a Figura 2.2. Utilizando as equações (2.1) e (2.3) podemos escrever a equação que relaciona os polinômios associados aos pulsos de fase mínima e mista,

$$P(Z) = \tilde{P}(Z) \frac{{}^{\beta}B(Z^{-1})Z^{\beta}}{{}^{\beta}B(Z)}. \quad (2.5)$$

Notamos na equação acima que a fração relacionada ao polinômio ${}^{\beta}B(Z)$ representa o operador *all-pass*. Este é responsável pela reversão das raízes do polinômio ${}^{\beta}B(Z)$ para o interior do círculo unitário, gerando o polinômio de fase mista. Notamos ainda que os espectros de amplitude de ambos pulsos serão iguais uma vez que o operador *all-pass* modifica apenas a fase do pulso.

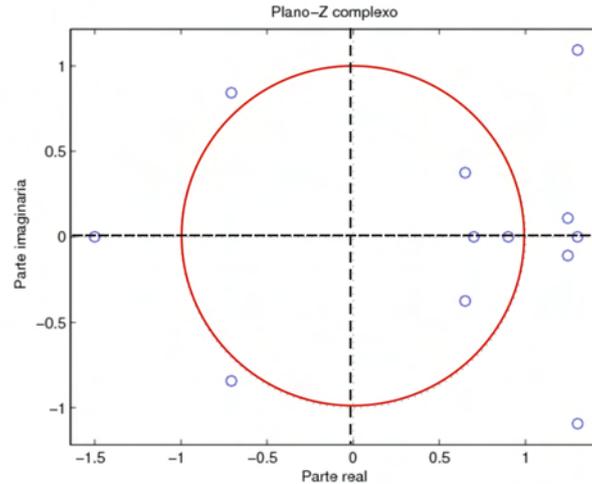


Figura 2.2: Representação no plano complexo das raízes de um polinômio de fase mista.

2.2.2 Obtenção do filtro de fase mista

Tomando o inverso da equação (2.5) obtemos a expressão para se obter o filtro de fase mista a partir do filtro de WL e um subconjunto de raízes do pulso de fase mínima

$$C(Z) = \tilde{C}(Z) \frac{\beta B(Z)}{\beta B(Z^{-1}) Z^\beta}. \quad (2.6)$$

A equação (2.6) mostra que o filtro de fase mista pode ser obtido com uma mudança de fase do filtro de WL através de um filtro *all-pass*. Dispondo-se portanto do pulso de fase mínima $\tilde{P}(Z)$ e de um subconjunto β de suas raízes podemos utilizar as equações (2.5) e (2.6) para obter tanto o pulso de fase mista quanto o filtro inverso a ele relacionado (Porsani e Ursin, 1998).

2.3 Operador *all-pass* utilizando raízes estimadas do filtro de WL

De maneira análoga à seção anterior podemos obter o operador *all-pass* em termos de um subconjunto de raízes do filtro de WL. Esta abordagem é bastante útil uma vez que o filtro de WL pode ser obtido prontamente resolvendo-se as ENs (eq. 1.7). Considerando que o polinômio $\tilde{C}(Z)$, correspondente ao filtro de WL, é de ordem M podemos dividir as M raízes em dois subconjuntos de α e β raízes tal que $\alpha + \beta = M$. Podemos assim fatorar $\tilde{C}(Z)$ representando-o como produto de dois polinômios,

$$\tilde{C}(Z) = {}^\alpha F(Z) {}^\beta G(Z), \quad (2.7)$$

onde

$${}^{\alpha}F(Z) = 1 + f_1Z + \dots + f_{M-\beta}Z^{M-\beta} \quad (2.8)$$

$${}^{\beta}G(Z) = 1 + g_1Z + \dots + g_{\beta}Z^{\beta}.$$

Uma vez que $\tilde{C}(Z)$ é de fase mínima, também ${}^{\alpha}F(Z)$ e ${}^{\beta}G(Z)$ serão de fase mínima.

2.3.1 Obtenção do filtro de fase mista

Utilizando as equações (2.8) podemos escrever o polinômio para o filtro de fase mista como segue.

$$C(Z) = {}^{\alpha}F(Z) {}^{\beta}G(Z^{-1})Z^{\beta}. \quad (2.9)$$

Nota-se que o termo em β representa o polinômio causal de fase máxima.

$${}^{\beta}G(Z^{-1})Z^{\beta} = g_{\beta} + \dots + g_1Z^{\beta-1} + 1Z^{\beta}. \quad (2.10)$$

Utilizando as equações (2.7) e (2.9) podemos escrever a equação que relaciona os polinômios associados aos filtros de fase mínima e mista,

$$C(Z) = \tilde{C}(Z) \frac{{}^{\beta}G(Z^{-1})Z^{\beta}}{{}^{\beta}G(Z)}. \quad (2.11)$$

Notamos que a equação acima permite obter o filtro de fase mista a partir do filtro de WL e um subconjunto de raízes estimadas do filtro de WL.

2.3.2 Obtenção do pulso de fase mista

Tomando o inverso da equação (2.5) obtemos a expressão para cálculo de pulso de fase mista a partir do filtro de WL e de algumas de suas raízes.

$$P(Z) = \tilde{P}(Z) \frac{{}^{\beta}B(Z)}{{}^{\beta}B(Z^{-1})Z^{\beta}}. \quad (2.12)$$

Dispondo-se portanto do filtro de WL, $\tilde{C}(Z)$, e de um subconjunto β de suas raízes, podemos utilizar as equações (2.5) e (2.12) para obter o filtro inverso e o pulso de fase mista a ele relacionado. As equações (2.5) e (2.12) são particularmente importantes porque o operador *all-pass* pode ser gerado com raízes calculadas do filtro de WL, o qual pode ser obtido de forma bastante simples e para um número finito de coeficientes (vide eq. 1.7).

Para fins práticos de implementação do algoritmo podemos:

- (i) calcular o filtro de WL, $\tilde{c}(t)$, resolvendo equação (1.7),
- (ii) calcular as raízes do polinômio correspondente $\tilde{C}(Z)$ e
- (iii) modificar sua fase através do operador *all-pass* conforme mostrado na equação (2.11).

A figura 2.3 mostra o fluxo do método com as raízes estimadas do filtro de fase mínima (WL).

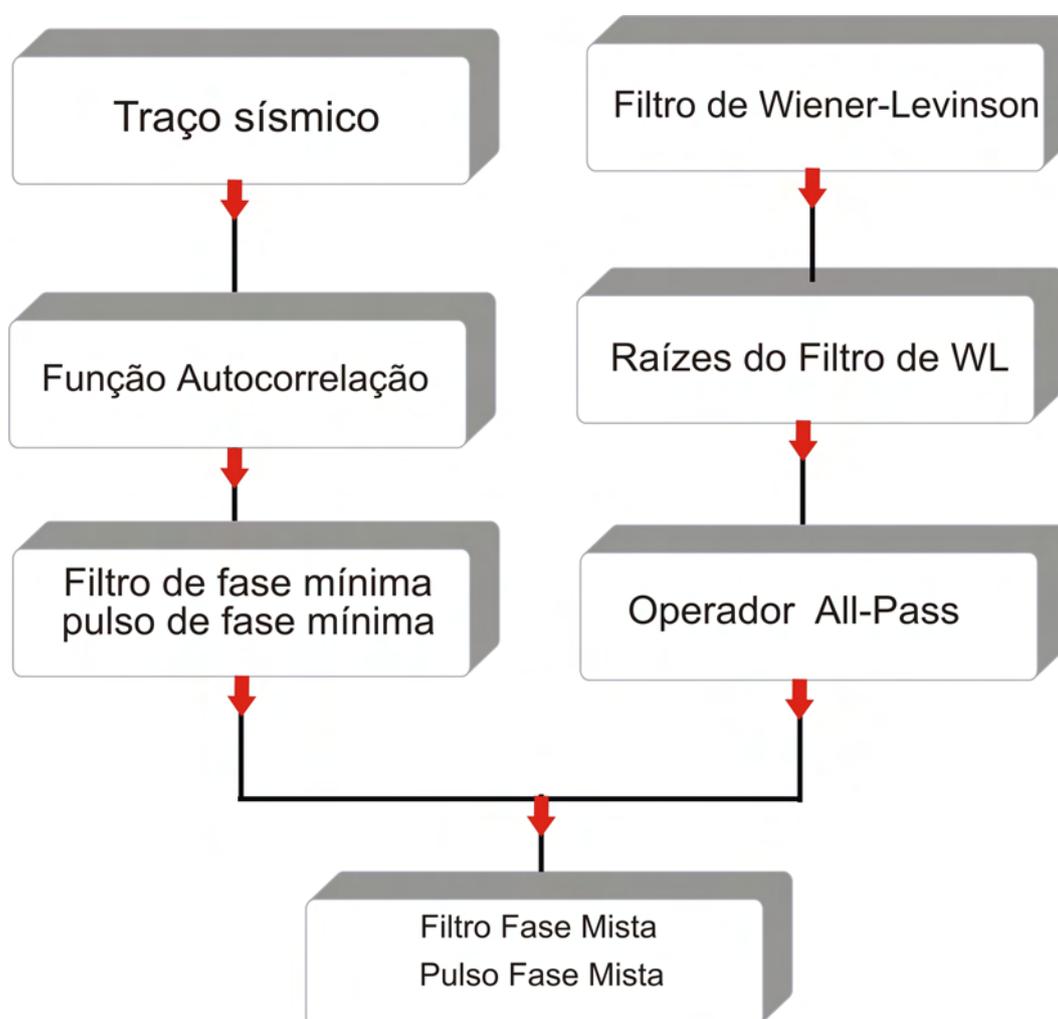


Figura 2.3: Fluxo utilizando raízes estimadas do filtro de fase mínima (WL).

2.4 Operador *all-pass* utilizando raízes fictícias

Nesta seção apresentamos uma abordagem simples para obtenção do operador *all-pass* que não utiliza raízes estimadas do pulso de fase mínima ou do filtro de WL a ele associado. Neste caso arbitramos um conjunto de raízes localizadas externamente ao círculo de raio unitário, com disposição aproximadamente simétrica, conforme ilustra a figura 2.4. A vantagem desta abordagem é que ela dispensa a necessidade de se calcular as raízes do polinômio ${}^{\beta}B(Z)$. A obtenção do operador *all-pass* pode ser feita coletando-se um subconjunto arbitrário de raízes de modo que polinômio ${}^{\beta}B(Z)$, possua coeficientes reais, ou seja, as raízes complexas são coletadas aos pares conjugados:

$$\begin{aligned} {}^{\beta}B(Z) &= \prod_{j=1}^{\omega} \left[1 - \frac{Z}{z_{rj}} \right] \prod_{j=1}^{\gamma/2} \left[1 - \frac{Z}{z_{cj}} \right] \prod_{j=1}^{\gamma/2} \left[1 - \frac{Z}{z_{cj}^*} \right] \\ &= 1 + b_1 Z + \dots + b_{\beta} Z^{\beta} \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde ω representa o número de raízes reais z_r , enquanto γ representa o número de pares de raízes complexas conjugadas $\{z_c, z_c^*\}$. O polinômio ${}^{\beta}B(Z)$ pode ser utilizado nas equações (2.5) e (2.6) cujas raízes estariam se equivalendo as raízes do pulso de fase mínima, como também pode ser utilizado nas equações (2.11) e (2.12) representando, neste caso, as raízes equivalentes do filtro inverso de WL. A tabela 2.1 mostra os valores das raízes fora do círculo unitário, que estão representadas na figura 2.4. Esta configuração de raízes foi utilizada nos exemplos mostrados no capítulo 4.

A Figura 2.5 mostra o fluxo do método com a configuração das raízes. fora do círculo unitário.

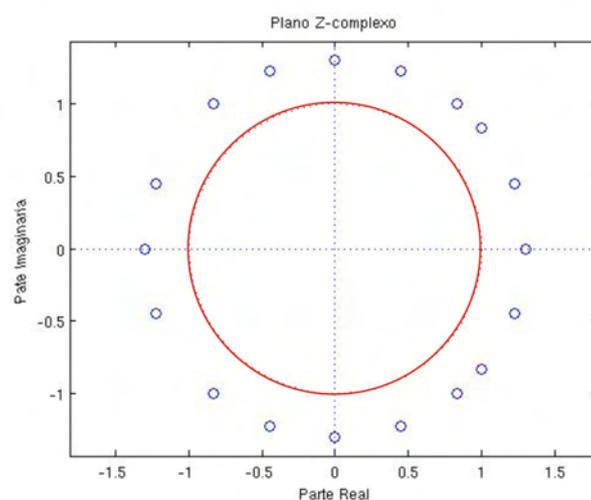


Figura 2.4: Representação no plano complexo da configuração de raízes fictícias utilizadas na obtenção do operador *all-pass*.

Amplitude	Fase (graus)
1.3	180
1.3	160
1.3	-160
1.3	130
1.3	-130
1.3	110
1.3	-110
1.3	90
1.3	-90
1.3	70
1.3	-70
1.3	0
1.3	20
1.3	-20
1.3	50
1.3	-50
1.3	40
1.3	-40

Tabela 2.1: Amplitude e fase arbitradas das raízes fictícias distribuídas ao redor do círculo unitário.

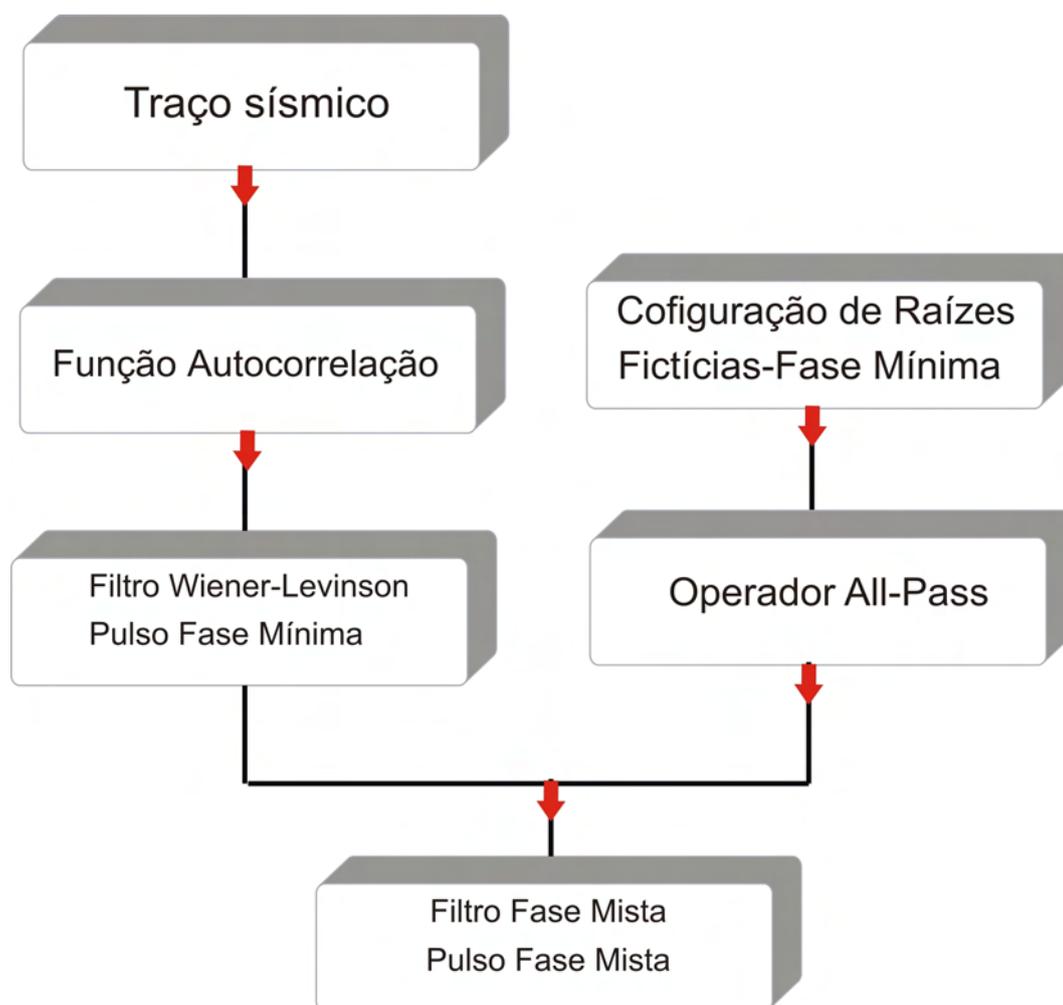


Figura 2.5: Fluxo do método de configuração das raízes fictícias.

Capítulo 3

Obtenção do filtro inverso ótimo com o algoritmo genético

3.1 Introdução

No presente capítulo formulamos o problema de otimização a ser resolvido e descrevemos os passos do algoritmo genético (AG) utilizado na obtenção do filtro inverso ótimo.

No problema de otimização proposto, os filtros inversos $C(Z)$ são construídos a partir dos operadores *all-pass*. Os operadores *all-pass* são responsáveis pela reversão para dentro do círculo de raio unitário de um subconjunto de raízes disponíveis. A condição binária de uma determinada raiz estar fora ou dentro do círculo de raio unitário, torna o problema de otimização naturalmente próprio para ser resolvido através do AG.

3.2 O problema de otimização a ser resolvido

Considerando, por exemplo, que dispomos de um total de 25 raízes ($M = 25$) disponíveis para a geração de filtros de fase mista, das quais temos 10 pares de raízes complexas conjugadas e 5 raízes reais, o total de filtros de fase mista que podem ser gerados é igual a $2^{15} = 32.768$. A determinação portanto, do filtro ótimo, a partir de um universo de algumas dezenas de milhares de possibilidades, implica em um custo computacional consideravelmente alto, uma vez que, para avaliação do desempenho dos filtros, é necessário convolvê-lo com o painel de traços sísmicos sob estudo. É desejável portanto que tenhamos um método de otimização

eficiente para selecionar o filtro inverso ótimo.

Através das equações (2.6) ou (2.11) podemos obter filtros de fase mista a partir de raízes estimadas ou arbitradas do pulso de fase mínima ou do filtro inverso de WL, conforme apresentado no capítulo 2. O problema de otimização pode ser formulado como segue.

- Inicialmente consideramos disponíveis um total de α raízes (reais ou pares conjugados de raízes complexas) com magnitudes maiores que a unidade, ou seja, raízes posicionadas no plano complexo, fora do círculo de raio unitário.
- Subconjuntos de β raízes são extraídos e utilizados na equação (2.6) (ou equação (2.11)) para construir o operador *all-pass* que é utilizado na mudança de fase do filtro de WL.
- Os filtros de fase mista são gerados e aplicados nos dados sísmicos mediante convolução.
- A avaliação do desempenho do filtro é quantificada através da norma varimax, descrita no capítulo 1.
- Para otimização do processo de escolha do melhor filtro emprega-se o AG, descrito na próxima seção.
- Caso desejado, ao final do processo, uma vez conhecido o filtro inverso ótimo podemos tomar seu inverso e estimar o pulso sísmico, através da equação (2.5) (ou equação (2.12)).

3.3 O algoritmo genético

Os AGs foram desenvolvidos por John Holland em 1975, publicado em seu livro *adaptation in natural and artificial systems* como um método para otimização de sistemas não lineares (Holland, 1975). Os AGs são inspirados na teoria da evolução das espécies de Charles Darwin e combinam os mecanismos e conceitos da genética que governam a reprodução dos seres vivos de uma determinada população.

3.3.1 Geração da população inicial

Os AGs trabalham com uma população de indivíduos (modelos) e têm como princípio a geração de novos indivíduos com características cada vez melhores ao longo das gerações. No problema de otimização proposto os indivíduos são os filtros candidatos a representarem o inverso do pulso que se deseja colapsar, ou inverter.

O número de indivíduos na população é escolhido em função da dificuldade do problema a ser resolvido. Com um número pequeno de indivíduos, o universo de busca pode ser insuficiente e pouco representativa. Já com um número muito grande de indivíduos, o tempo computacional pode se tornar inviável. Existem três tipos de codificação utilizados com mais frequência: a codificação binária, a codificação Gray e a codificação real.

Os parâmetros são codificados normalmente em cadeias binárias, em que apenas os números 0 e 1 representam as variáveis (Goldberg, 1989). Também existe a codificação *gray* que trabalha com codificação binária, mas ela mantém uma pequena taxa de perturbação nos parâmetros. Por último está a codificação real que trabalha diretamente com números reais, entretanto, tal codificação torna os métodos de troca de informações genéticas mais complexos.

Os operadores *all-pass* são responsáveis pela reversão para dentro do círculo de raio unitário de um subconjunto de raízes arbitradas ou estimadas do filtro de WL. A condição binária de uma determinada raiz estar fora ou dentro do círculo unitário pode ser convenientemente representada por uma cadeia binária. Desta forma cada operador *all-pass*, e conseqüentemente cada filtro inverso, estará associado a uma cadeia binária.

Com as raízes reais, $\{z_{r,j}\}$, $j = 1, \dots, \omega$ e os pares de raízes complexas conjugadas, $\{z_{c,j}\}$, $j = 1, \dots, \gamma$ pode-se obter os polinômios de primeiro e segundo graus de coeficientes reais,

$$\begin{aligned} \omega B_j(Z) &= 1 - \frac{1}{z_{r,j}} Z \quad , \quad j = 1, \dots, \omega, \\ \gamma B_j(Z) &= (1 - \frac{1}{z_{c,j}} Z)(1 - \frac{1}{z_{c,j}^*} Z) \quad , \quad j = 1, \dots, \gamma. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Cada polinômio, $\omega B_j(Z)$ ou $\gamma B_j(Z)$, pode ser associado a um *bit* de uma cadeia binária, J_i , de bits aleatórios, conforme mostrado na Tabela 3.1. Efetuando-se o produtório dos

	$\omega B_1(Z)$...	$\omega B_\omega(Z)$	$\gamma B_1(Z)$...	$\gamma B_\gamma(Z)$
J_1	0	...	1	1	...	0
J_2	1	...	0	1	...	0
\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	...	\vdots
J_{Npop}	1	...	1	0	...	1

Tabela 3.1: Tabela binária representando a população de indivíduos utilizados na construção dos operadores *all-pass*.

polinômios associados aos *bits* não nulos, ao longo de cada linha da Tabela 3.1, obtém-se os polinômios de fase mínima ${}^\beta B_i(Z)$ a ser utilizado na obtenção do filtro inverso.

$${}^\beta B_i(Z) = \prod_{j=1}^{\omega} \omega B_j(Z) \prod_{j=1}^{\gamma} \gamma B_j(Z) \quad (3.2)$$

3.3.2 Aplicação dos operadores genéticos

Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Na maior parte dos casos, os AGs utilizam três operadores: seleção, cruzamento e mutação.

Seleção

Este operador genético, também chamado reprodução, seleciona os indivíduos que sofrerão cruzamento e mutação. Da mesma forma que ocorre no processo de seleção natural, os indivíduos mais qualificados, de acordo com a avaliação de mérito (norma varimax), têm mais chances de serem escolhidos.

Cruzamento

O objetivo do cruzamento é a permutação de material genético entre os pares de indivíduos previamente selecionados. Após a formação dos pares, os indivíduos são submetidos ao processo de cruzamento, sendo que este processo pode ou não ocorrer, de acordo com uma dada probabilidade de cruzamento. Este operador genético é o responsável maior pela criação de novos indivíduos, isto é similar ao que ocorre na natureza. Os AGs são caracterizados

<i>pais</i>	11001	<i>crossover</i>	110⟨01⟩	<i>filhos</i>	11011
<i>pais</i>	01111	<i>crossover</i>	011⟨11⟩	<i>filhos</i>	01101

Tabela 3.2: Tabela ilustrando o processo de cruzamento com a permutação do conteúdo genético.

pela alta flexibilidade de implementação, e isto vale também para o cruzamento, que pode ser realizado de diferentes maneiras. A Tabela 3.2 ilustra a operação cruzamento, com a permutação dos cromossomas.

Mutação

A mutação tem a função de evitar a convergência prematura. Entende-se por mutação a inserção de material genético novo na população. Este processo pode ou não ocorrer, da mesma forma que o cruzamento, de acordo com uma dada probabilidade de mutação (pmut).

Esta probabilidade deve ser bem baixa, algo em torno de 0 a 5 %, para que a busca pelo indivíduo ótimo não seja puramente aleatória. Isto é análogo ao comportamento da natureza, onde raramente se vêem mutações ou anormalidades nos indivíduos. Como no cruzamento, a mutação pode ser feita de muitas maneiras, uma das quais é apresentada na Tabela 3.3. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma do AG com a atuação dos operadores genéticos.

mutação	1⟨1⟩001	filho	10001
---------	---------	-------	-------

Tabela 3.3: Tabela ilustrando a operação de mutação com a troca aleatória de um *bit* da cadeia binária associada a um parâmetro do modelo.

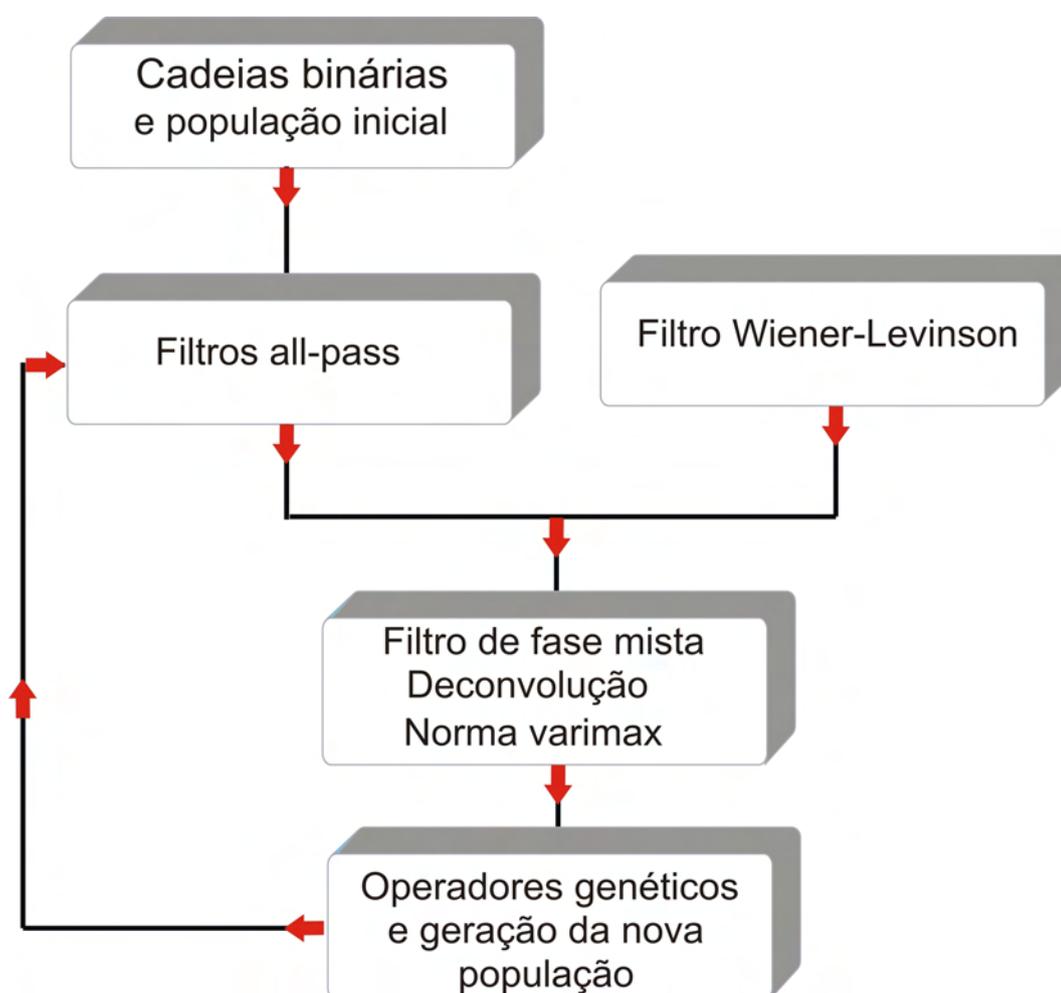


Figura 3.1: Fluxograma do AG ilustrando a ação dos operadores genéticos e a geração da nova população.

Capítulo 4

Resultados utilizando operador *all-pass* com raízes fictícias

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentamos resultados da deconvolução de fase mista onde utilizamos o operador *all-pass* construído a partir de um conjunto de raízes fictícias dispostas fora do círculo unitário (Caraballo e Porsani (2011)), conforme descrito no capítulo 2. Notamos que nesta abordagem não é necessário resolver as equações de Yule-Walker para se estimar as raízes do pulso de fase mínima conforme proposto por Porsani e Ursin (1998), e Ursin e Porsani (2000).

Calculamos o filtro inverso de WL (fase mínima) de 25 coeficientes e o pulso de fase mínima a ele relacionado e utilizamos a equação (2.6) para obtenção dos operadores *all-pass*. Adotamos uma configuração de raízes simétricas dispostas na forma de uma coroa exterior ao círculo unitário, com amplitudes e fase apresentadas na tabela 2.1. O processo de otimização do operador *all-pass* e obtenção do filtro inverso ótimo foi realizado com o AG apresentado no capítulo 3. Os resultados foram comparados frente àqueles obtidos com o método de deconvolução convencional de WL.

Para testar a metodologia desenvolvida aplicamos o algoritmo inicialmente sobre dados sintéticos, para deconvolver um pulso de fase mista, depois em um traço sísmico sintético, gerado com o modelo convolucional com pulso de fase mista e refletividade pseudo-aleatória e finalmente sobre um traço sísmico real e seções sísmicas reais de dados empilhados.

4.2 Deconvolução e estimativa do pulso

Neste experimento utilizamos o AG com uma população de 2000 indivíduos (*strings*) e 30 gerações. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o desempenho do filtro de fase mista na deconvolução do pulso sintético de fase mista.

A Figura 4.1A mostra o pulso sintético de fase mista utilizado. As Figuras 4.1B e 4.1C mostram os pulsos de fase mínima e mista estimados. Observa-se uma maior similaridade entre o pulso de fase mista estimado e o pulso original de fase mista da Figura 4.1A. A Figura 4.1D apresenta o filtro de fase mista ótimo.

Na Figura 4.2 estão representados os valores da norma varimax, calculados ao longo de 30 gerações do AG. As três curvas representam os valores máximos, médios e mínimos da população de 2000 modelos.

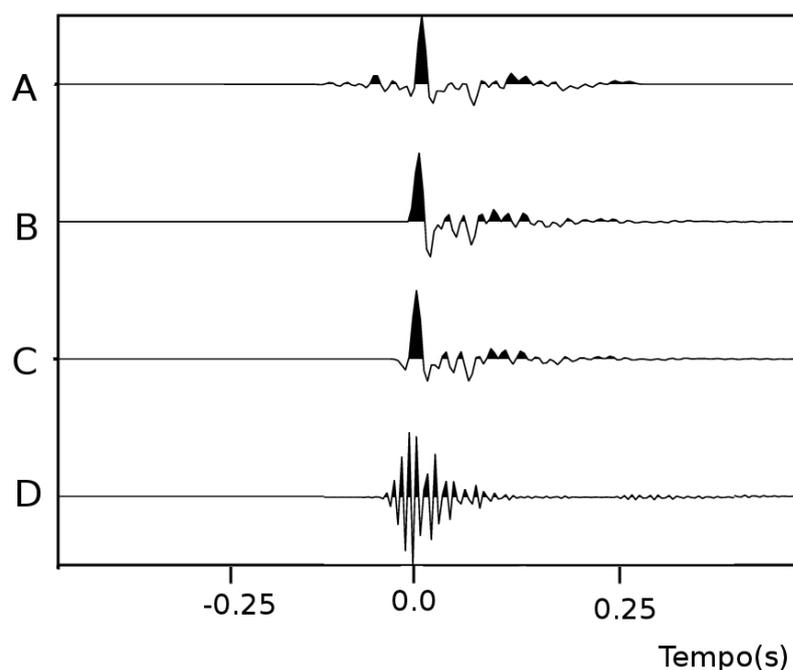


Figura 4.1: Deconvolução e estimativa de um pulso. Pulso de fase mista original em (A). Pulsos de fase mínima e mista estimados em (B) e (C), respectivamente. Filtro inverso ótimo em (D).

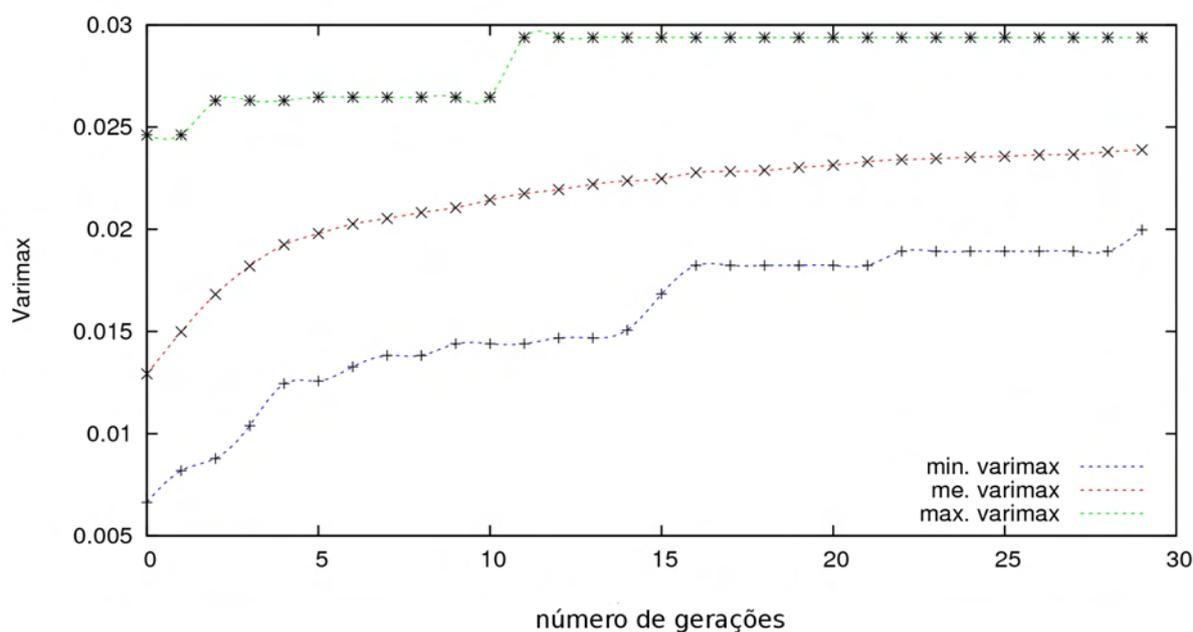


Figura 4.2: Desempenho do AG na deconvolução do pulso de fase mista (Fig. 4.1A). Valores da norma varimax (máximos, médios e mínimos) da população ao longo de 30 gerações. As curvas com comportamento ascendente mostram convergência do AG.

4.3 Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico sintético

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 ilustram o experimento de deconvolução de um traço sísmico sintético construído com um pulso de fase mista e uma função refletividade pseudo-aleatória. Também utilizamos uma população de 2000 indivíduos e 30 gerações na busca do filtro inverso ótimo.

A Figura 4.3A mostra o pulso sintético de fase mista utilizado. A função refletividade e o traço sintético estão representados nas Figuras 4.3B e 4.3C, respectivamente. Os resultados obtidos com o filtro de WL (fase mínima) e o filtro de fase mista ótimo estão representados nas Figuras 4.3B e 4.3C, respectivamente. Observa-se um bom desempenho do filtro ótimo na restituição da função refletividade.

As Figuras 4.4A e 4.4B mostram, respectivamente, os pulso de fase mínima e mista estimados. Observa-se boa similaridade entre o pulso de fase mista estimado com o pulso original (na

Fig. 4.3A) utilizado na geração do traço sintético. A Figura 4.4C mostra o filtro inverso ótimo obtido com o AG. A Figura 4.5 ilustra a evolução dos valores máximos, médios e mínimos da norma varimax, ao final de cada geração, ao longo das 30 gerações do AG. O mesmo comportamento de tendência convergente é revelado pelas três curvas.

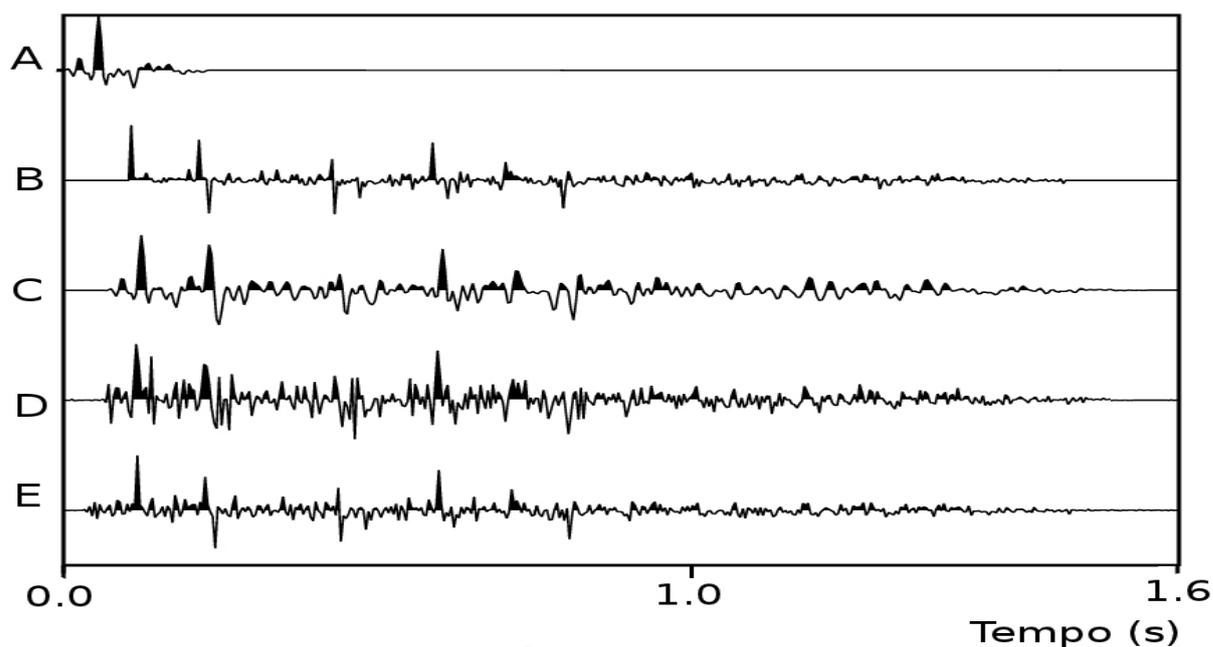


Figura 4.3: Deconvolução de um traço sintético. Pulso de fase mista em (A), função refletividade pseudo-aleatória em (B), e traço sísmico sintético em (C). Deconvolução de fase mínima em (D) e de fase mista com o filtro ótimo em (E).

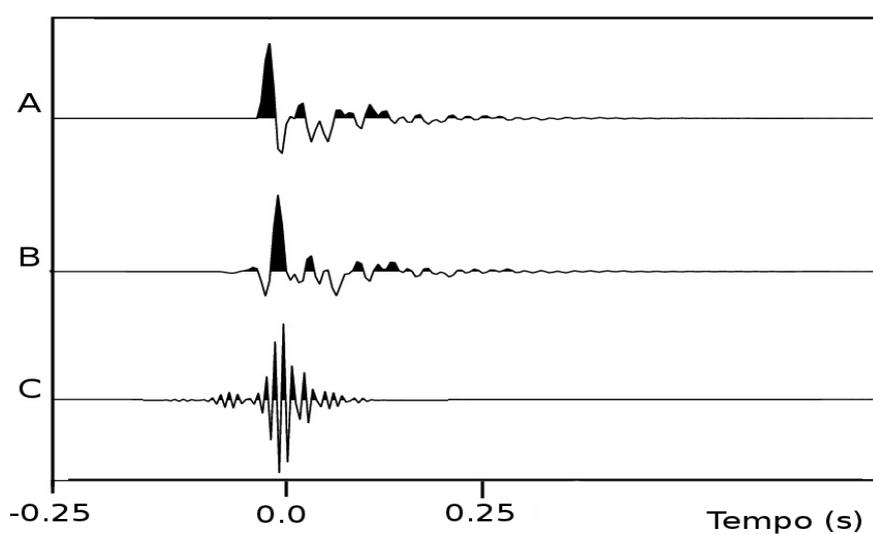


Figura 4.4: Estimativa dos pulsos e filtro ótimo. Pulso de fase mínima em (A). Pulso de fase mista em (B), e seu correspondente filtro inverso ótimo em (C).

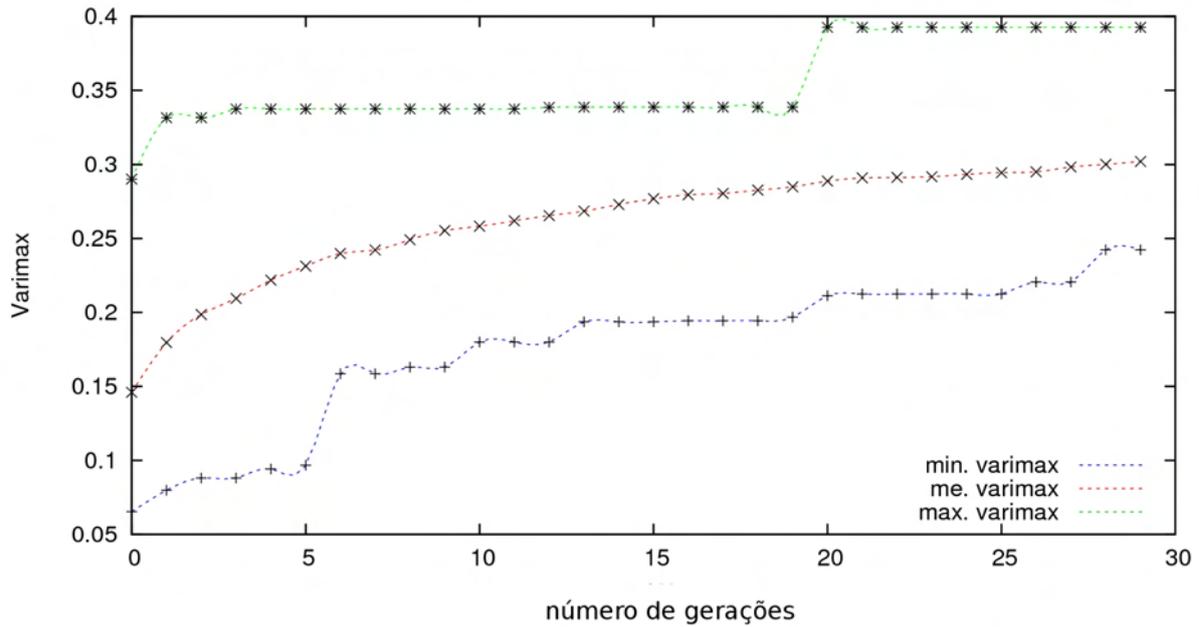


Figura 4.5: Desempenho do AG na obtenção do filtro inverso ótimo para deconvolução do traço sintético, mostrado na Figura 4.3

4.4 Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico real

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 ilustram o experimento de deconvolução de um traço sísmico real extraído de uma seção sísmica empilhada. Os mesmos parâmetros (população com 2000 indivíduos e número de gerações igual a 30) dos experimentos anteriores foram utilizados.

A Figura 4.6A mostra o traço sísmico real. Os resultados da deconvolução de fase mínima e mista com o filtro inverso ótimo, estão apresentados na Figura 4.6B e 4.6C, respectivamente. Notamos que embora os espectros de amplitudes dos traços deconvolvidos sejam iguais, já que os operadores *all-pass* apenas provocam uma mudança de fase no filtro, os impulsos que identificam as reflexões, estão ligeiramente melhor individualizados, particularmente nas posições de tempo mais avançadas.

A Figura 4.7 os pulsos e filtros estimados na deconvolução do traço real da Figura 4.6A. Figuras 4.7A, 4.7B e 4.7C mostram, respectivamente, os pulsos de fase mínima, de fase

mista e o filtro inverso ótimo estimados.

A Figura 4.8 ilustra a evolução dos valores máximos, médios e mínimos da norma varimax, ao final de cada uma das 30 gerações do AG. O mesmo comportamento de tendência convergente é revelado pelas três curvas.

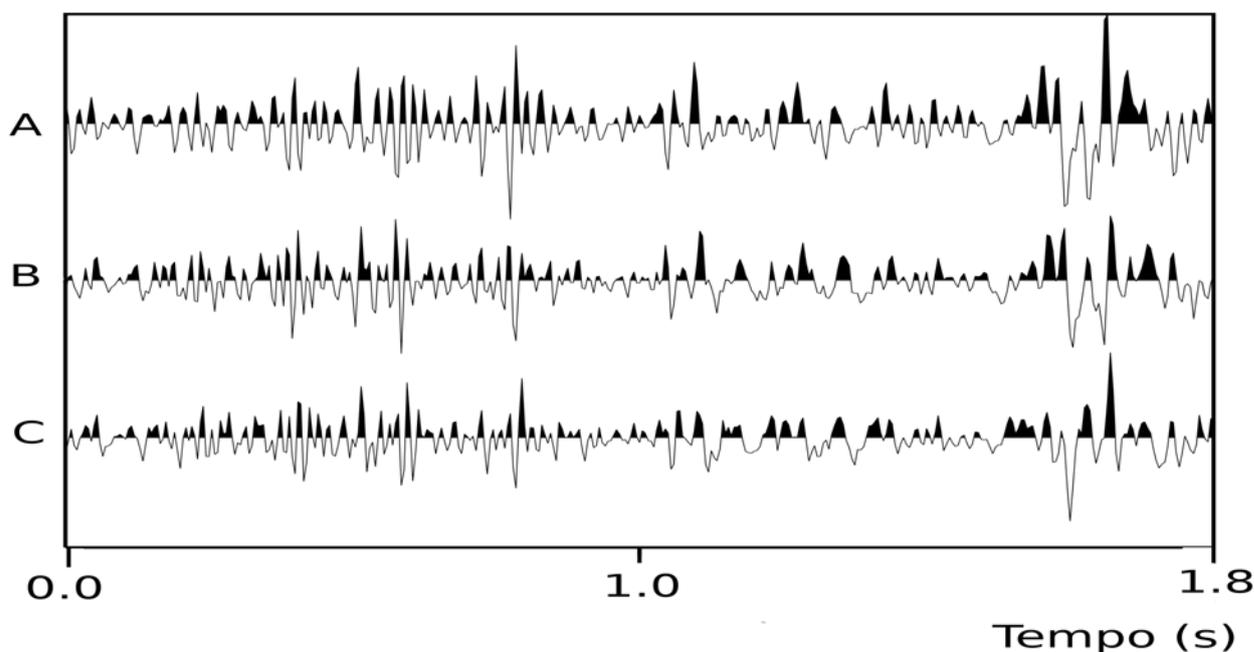


Figura 4.6: Deconvolução de um traço sísmico real. Traço sísmico real extraído de uma seção empilhada em (A). Resultado da deconvolução de fase mínima em (B) e resultado da deconvolução de fase mista utilizando o filtro inverso ótimo obtido com o AG em (C).

4.5 Deconvolução de seções sísmicas 2D

A Figura 4.9 mostra uma seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha. Na deconvolução da seção sísmica um único filtro é calculado e aplicado em toda a seção. Para tanto adotamos o seguinte procedimento:

- Definimos a janela de interesse onde será avaliada a norma varimax.
- Calculamos uma autocorrelação média para os traços no interior da janela.
- Calculamos o filtro de WL de N coeficientes (por exemplo $N = 25$) e o pulso de fase mínima correspondente (por exemplo 100 coeficientes).
- Calculamos o filtro inverso ótimo utilizando o AG e deconvolvemos a seção.

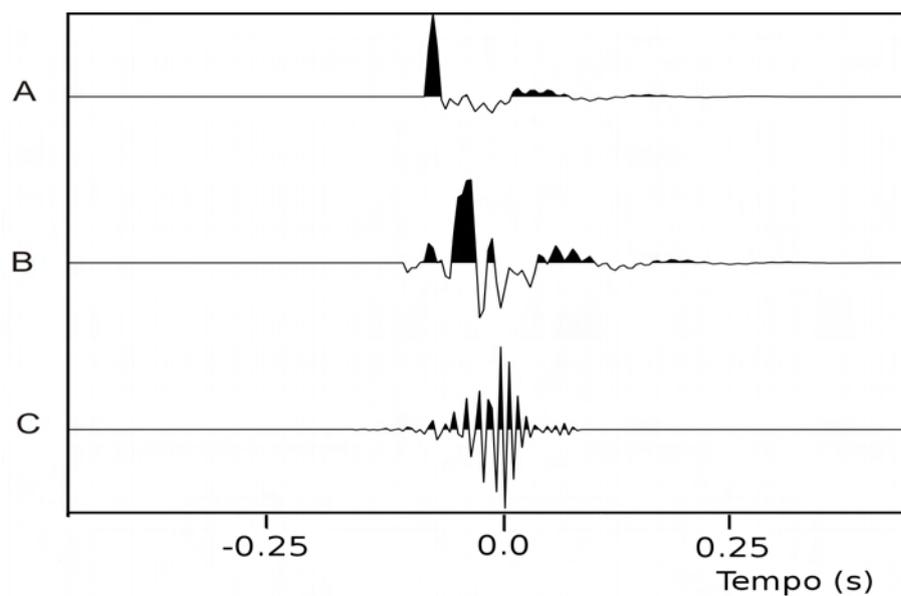


Figura 4.7: Pulsos e filtro inverso estimados. Pulso de fase mínima em (A), pulso de fase mista em (B) e filtro inverso ótimo em (C).

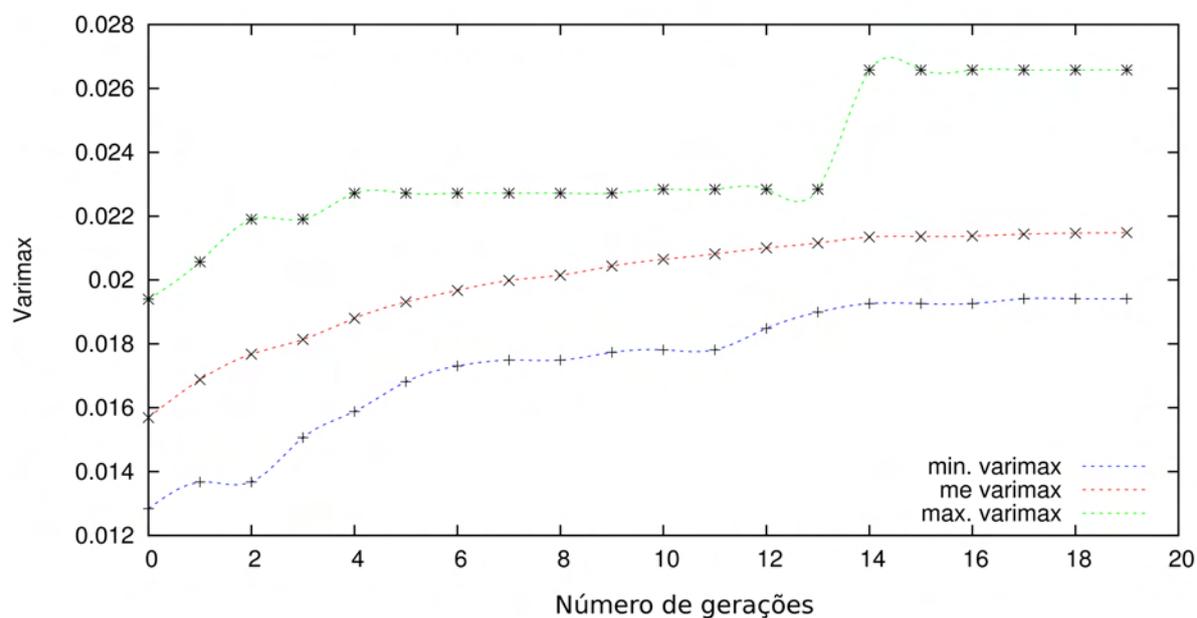


Figura 4.8: Desempenho do AG na obtenção do filtro inverso ótimo para deconvolução do traço sísmico real, mostrado na Figura 4.6a.

- Estimamos o pulso sísmico tomando o inverso do filtro ótimo.

Os dois quadros desenhados sobre a Figura 4.9 indicam as janelas de interesse selecionadas.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram com maior detalhe os dados originais e os resultados da deconvolução de fase mínima e de fase mista correspondentes. Os dados originais estão apresentados nas Figuras 4.10A e 4.11A. Os resultados da deconvolução com o filtro de fase mínima, de WL, estão apresentados nas Figuras 4.10B e 4.11B. As Figuras 4.10C e 4.11C mostram os resultados da deconvolução de fase mista utilizando o filtro ótimo obtido com o AG.

As Figuras 4.12 , 4.13 e 4.14 repetem o experimento anterior sobre outras duas áreas demarcadas na seção sísmica original, apenas com o objetivo de melhor ilustrar os resultados do método de deconvolução proposto.

Observa-se nos resultados da deconvolução de fase mista um ganho na resolução temporal como também na continuidade lateral das reflexões, comparada aos resultados obtidos com o método clássico de deconvolução de fase mínima, ou de WL.

A Figura 4.15 mostra o espectro de amplitude médio das seções original e deconvolvidas. Observa-se a semelhança entre os espectros de amplitude da deconvolução de WL e de fase mista.

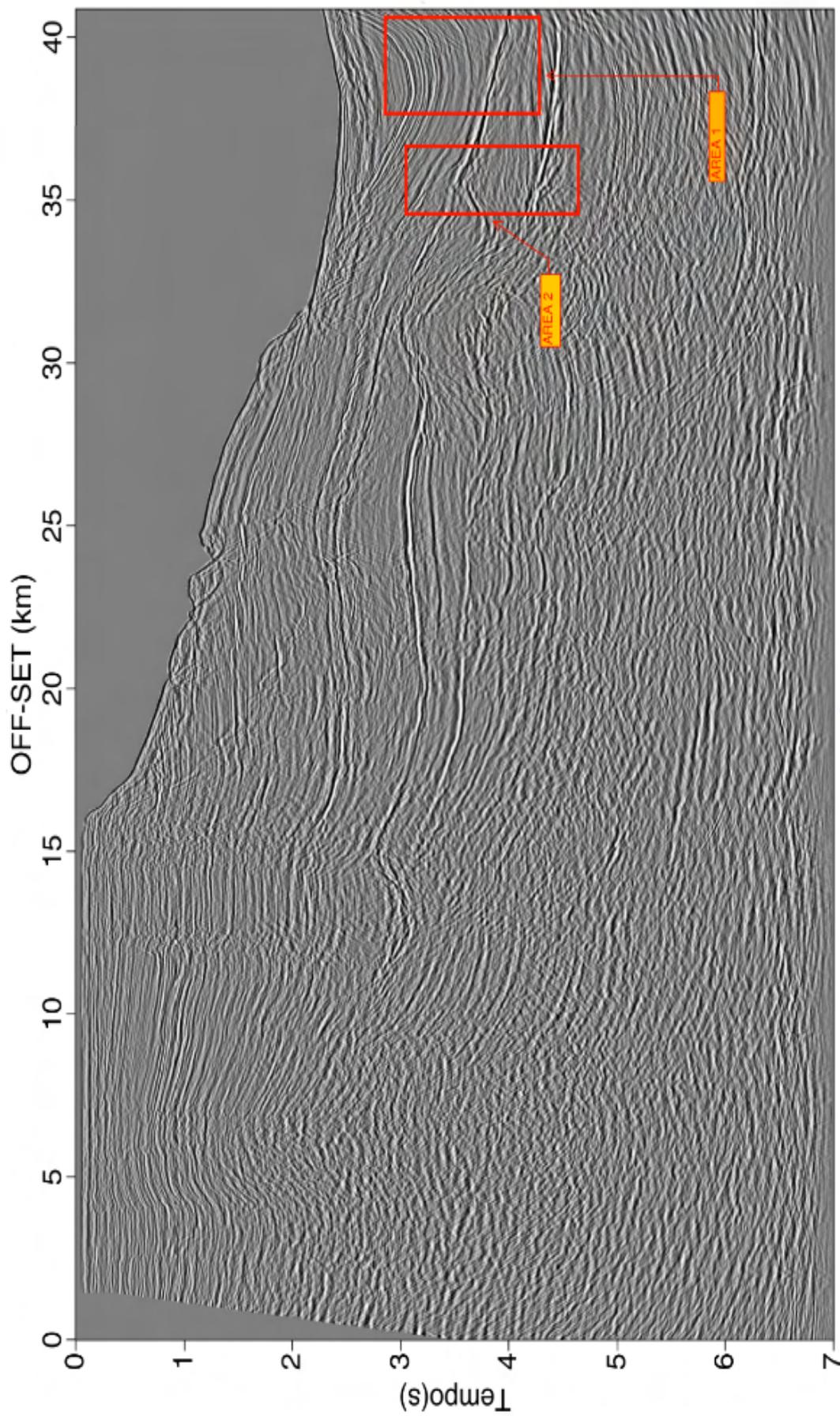


Figura 4.9: Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, mostrando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com visualização *wiggle trace*.

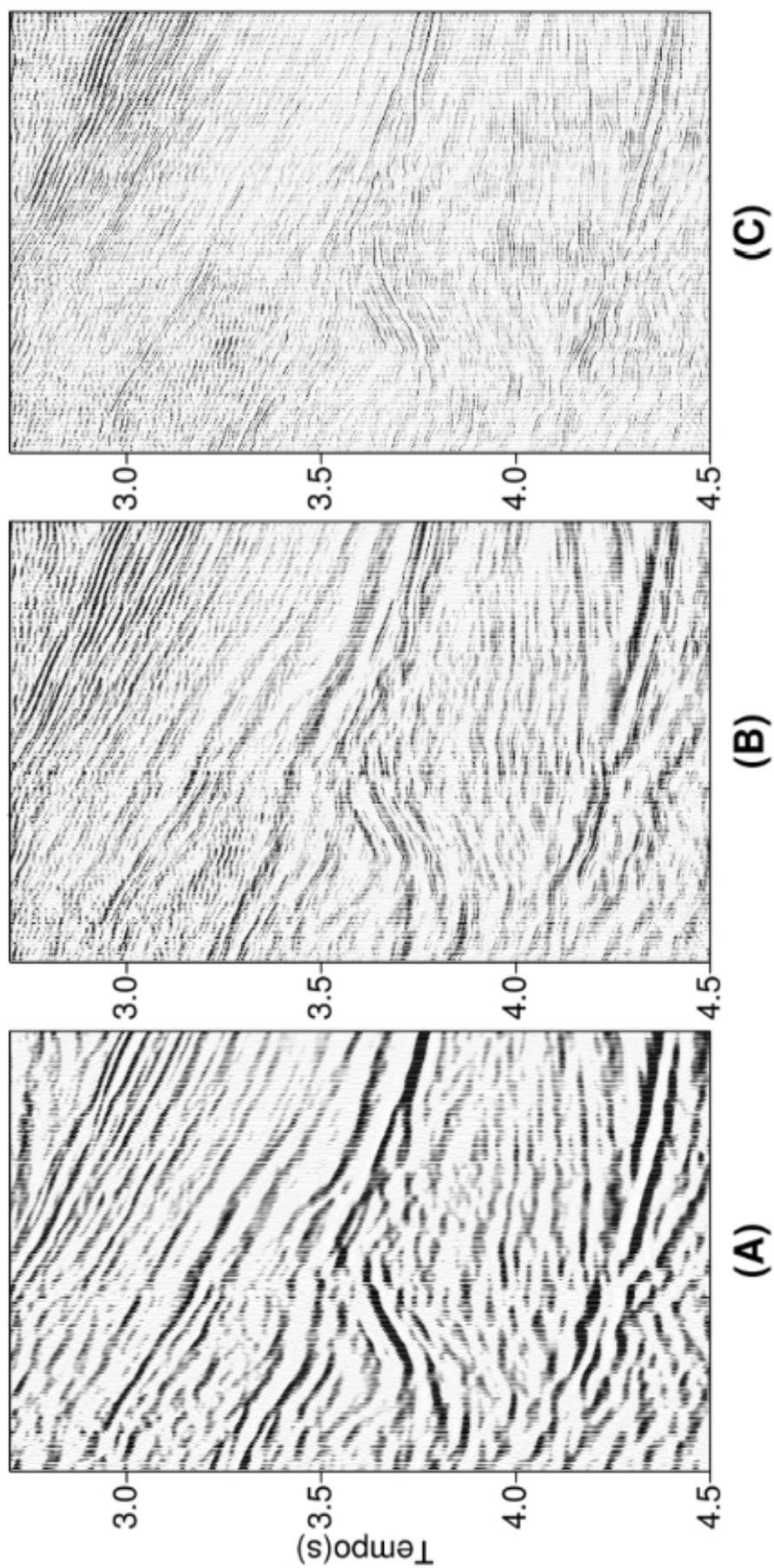


Figura 4.10: Resultados da deconvolução da área 2 com *wiggle trace*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

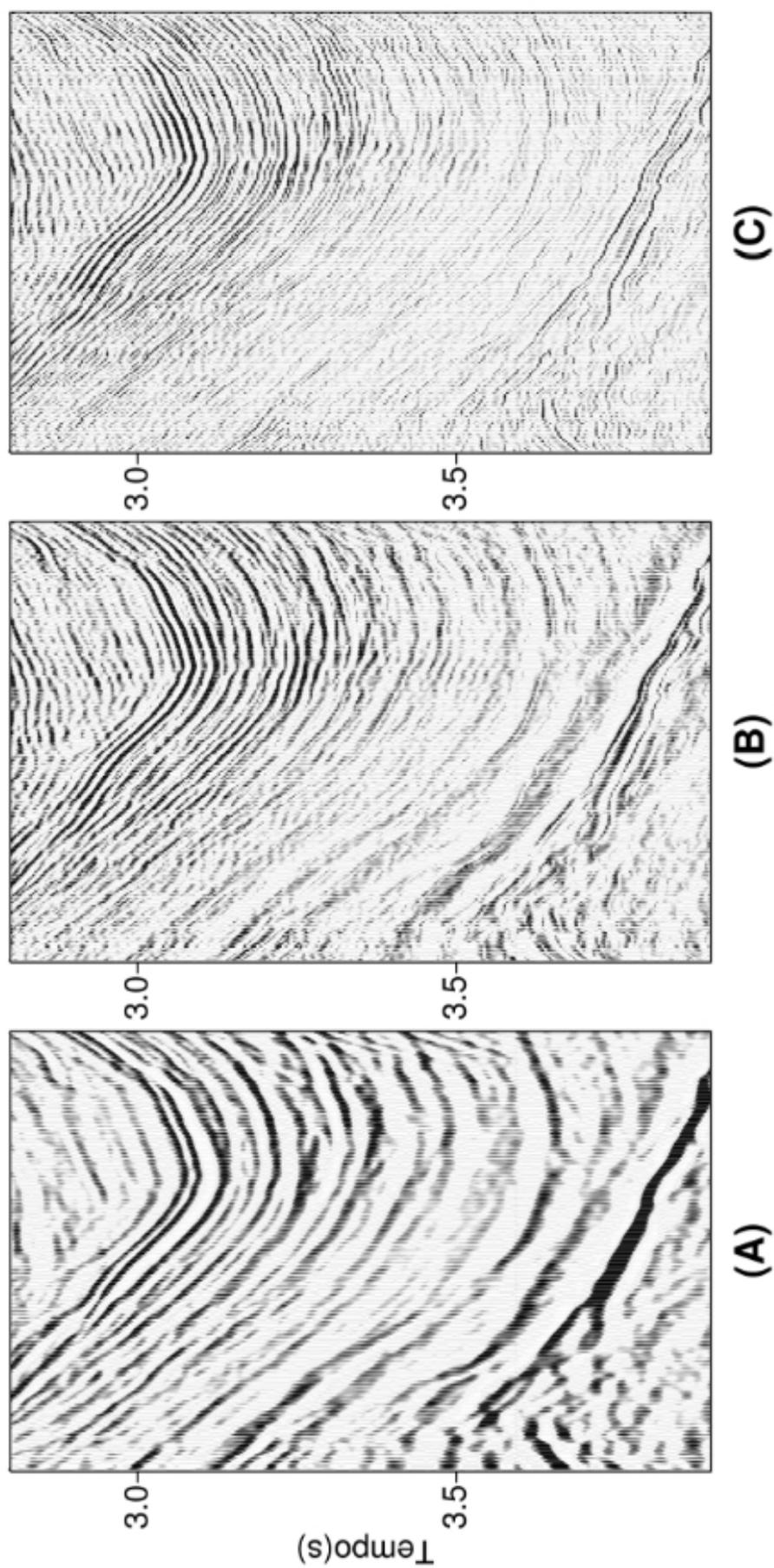


Figura 4.11: Resultados da deconvolução da área 1 com *wobble trace*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

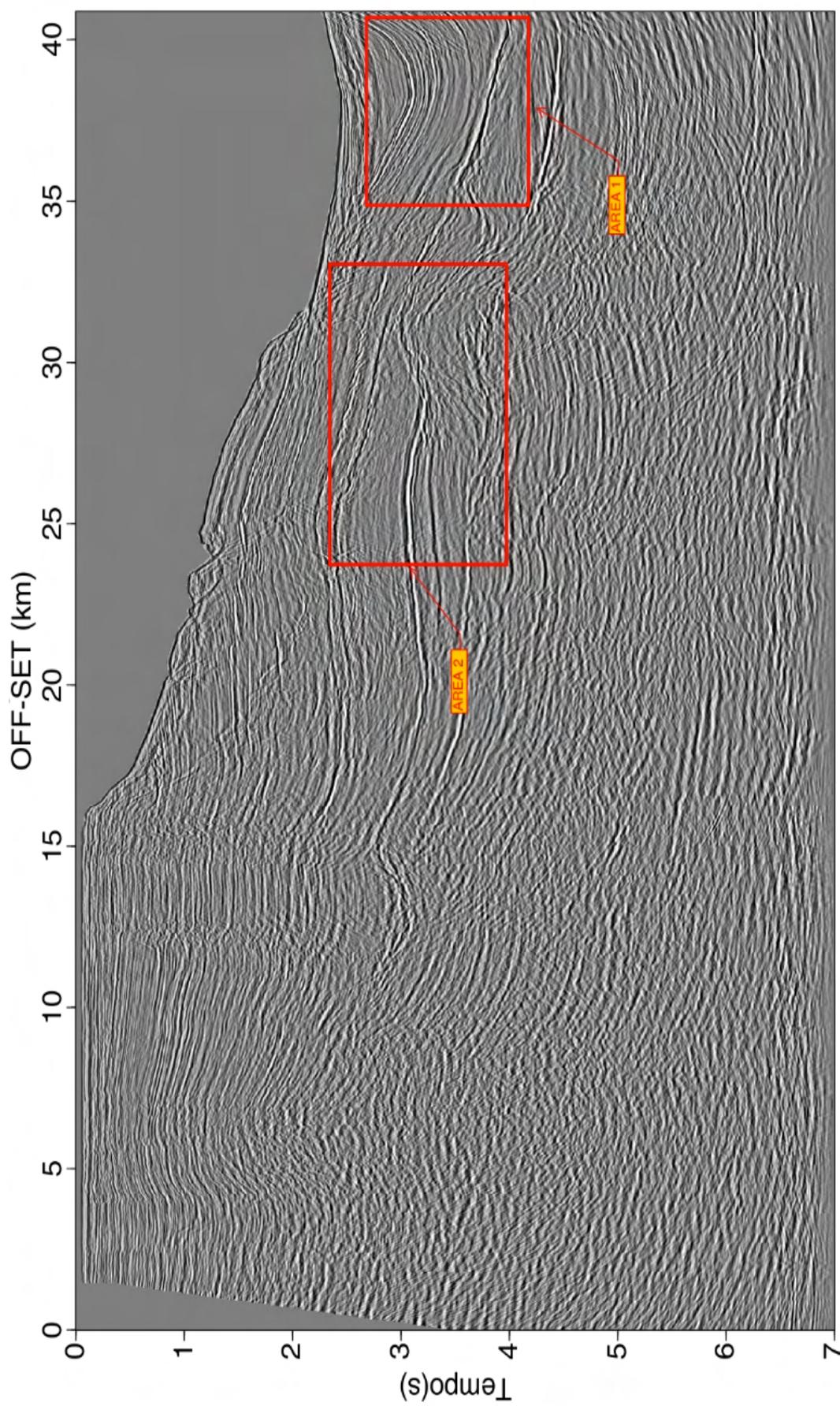


Figura 4.12: Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, indicando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com visualização *variable density*

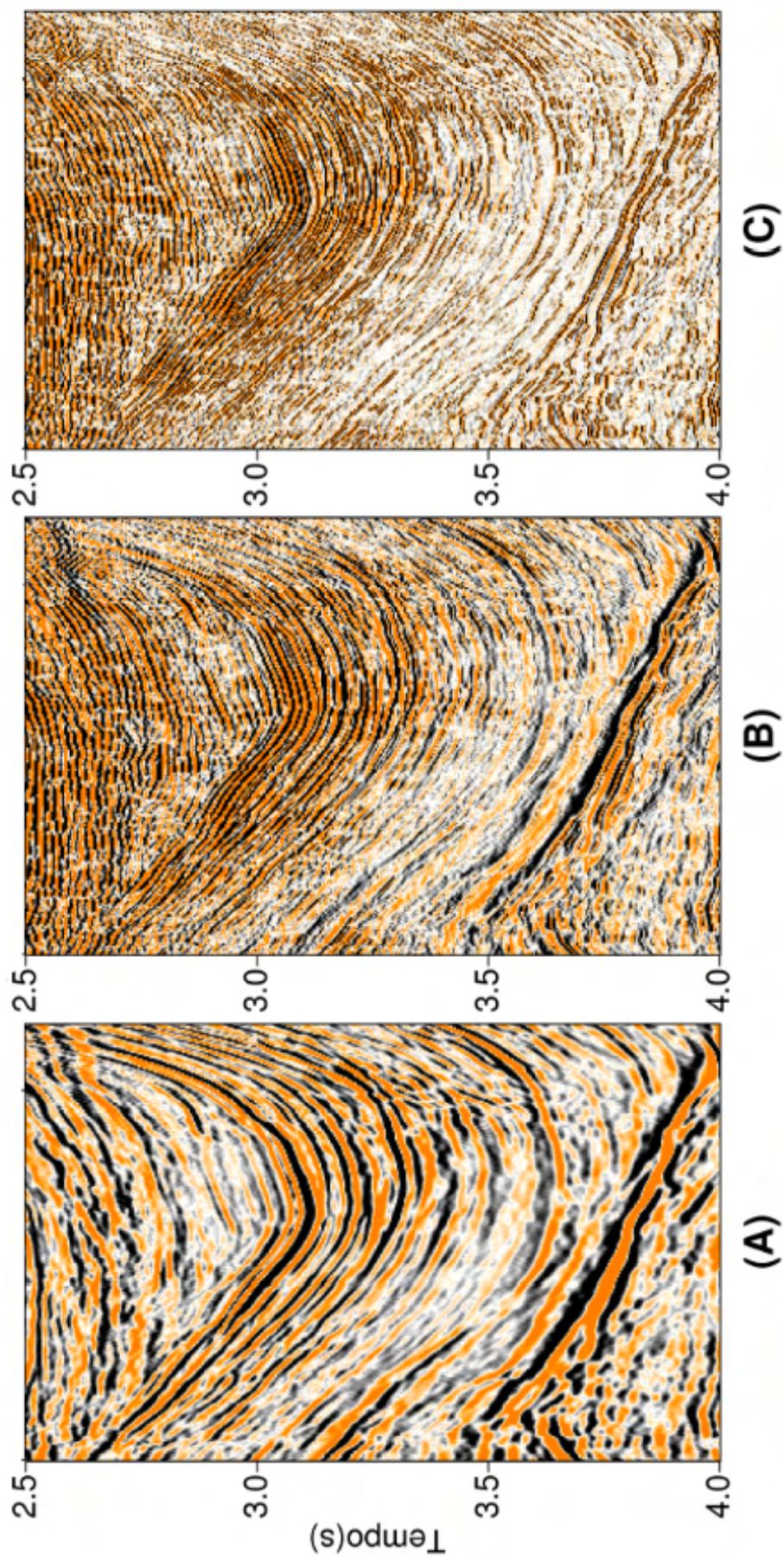


Figura 4.13: Resultados da deconvolução da área 1 com *variable density*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

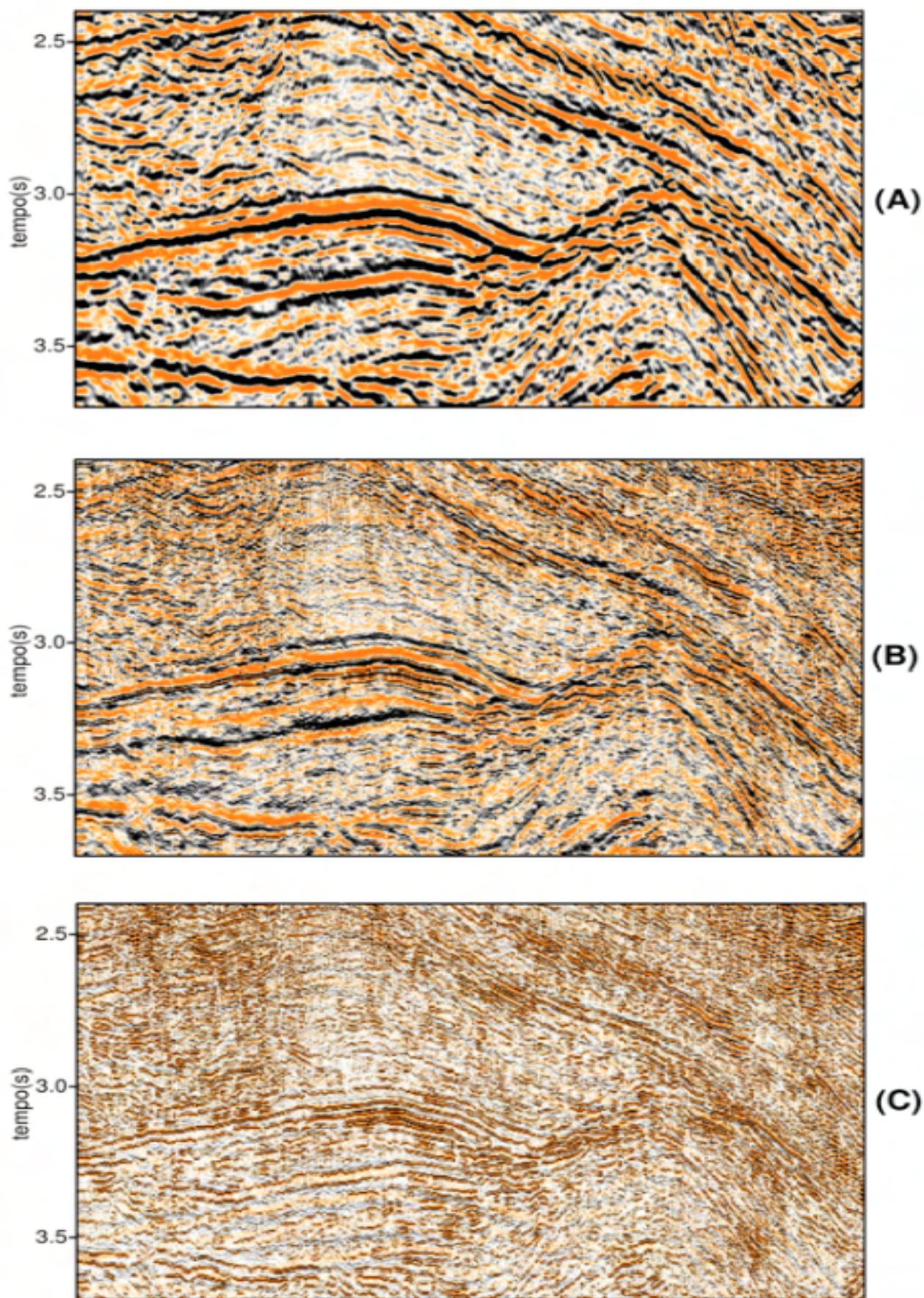


Figura 4.14: Resultados da deconvolução da área 2 com *variable density*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

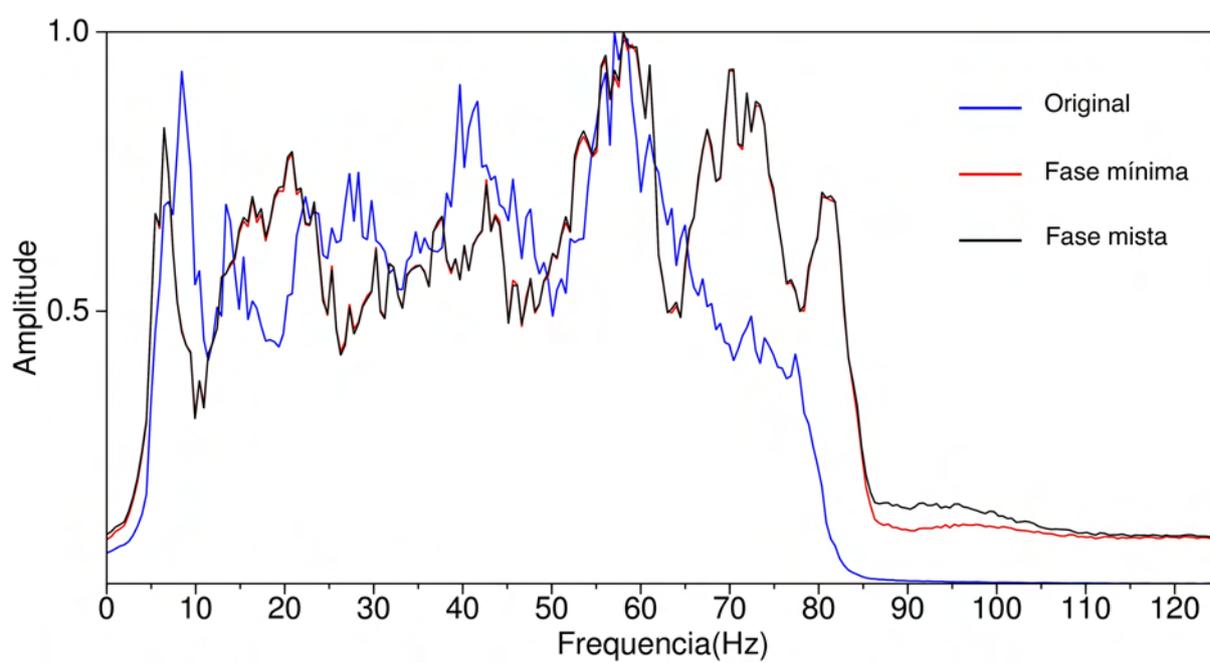


Figura 4.15: Espectros de amplitude médio dos dados originais e deconvolvidos da seção sísmicas 2D da Bacia do Jequitinhonha.

Capítulo 5

Resultados utilizando operador *all-pass* formado com raízes do filtro de Wiener-Levinson

5.1 Introdução

Neste capítulo apresentamos resultados da deconvolução de fase mista utilizando o operador *all-pass* construído a partir das raízes do filtro de fase mínima de WL. O filtro de WL possui todas as raízes que precisamos para deconvolver tanto o pulso de fase mínima como quaisquer outros a ele relacionados, ou seja, que possuam a mesma função de autocorrelação. Esta abordagem é consideravelmente mais simples que aquela apresentada por Porsani e Ursin (1998) e Ursin e Porsani (2000).

O método originalmente proposto por aqueles autores estima um subconjunto de raízes do pulso de fase mínima e as utiliza na equação (2.6). Tal procedimento possui três etapas: primeiro obtém-se a solução das equações estendidas de Yule-Walker e forma-se o polinômio ${}^{\alpha}C(Z)$, em seguida fatora-se o pulso de fase mínima gerando assim um polinômio finito ${}^{\alpha}B(Z)$, e por último, calcula-se as raízes desse polinômio, as quais representam uma estimativa de α raízes do pulso de fase mínima, que possui duração infinita (Porsani e Ursin, 2000).

A abordagem proposta neste trabalho é mais simples porque utiliza diretamente o filtro de WL de N coeficientes. Nos exemplos apresentados neste capítulo utilizamos $N = 25$. A obtenção do filtro de WL é bastante simples e a obtenção de suas raízes também não oferece

qualquer dificuldade.

O procedimento utilizado na obtenção dos resultados apresentados consistiu das seguintes etapas:

- Calculamos o filtro inverso de WL de 25 coeficientes e o pulso de fase mínima a ele relacionado.
- Utilizamos a equação (2.11) para obtenção dos operadores *all-pass*.
- Utilizamos o AG para obtenção do filtro inverso ótimo.
- Deconvolvemos o(s) traço(s) da seção sísmica desejada.
- Utilizamos a equação (2.12) para estimar o pulso sísmico.

Para testar a nova abordagem aplicamos o algoritmo inicialmente sobre dados sintéticos, para deconvolver um pulso de fase mista, depois sobre traço sísmico sintético e finalmente sobre dados sísmicos reais, de forma análoga aos exemplos do capítulo 4. Os resultados foram comparados frente aqueles obtidos com o método de deconvolução convencional de WL.

5.2 Deconvolução e estimativa do pulso

Neste experimento utilizamos o AG com uma população de 50 indivíduos (*strings*) e 30 gerações. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram o desempenho do filtro de fase mista na deconvolução do pulso sintético de fase mista.

A Figura 5.1A mostra o pulso sintético de fase mista utilizado. As Figuras 5.1B e 5.1C mostram os pulsos de fase mínima e mista estimados. Observa-se boa similaridade entre o pulso de fase mista estimado e o pulso original da Figura 5.1A. A Figura 5.1D apresenta o filtro de fase mista ótimo e a Figura 5.1E mostra a deconvolução do filtro de fase mista com o pulso de fase mista.

Na Figura 5.2 estão representados os valores da norma varimax, calculados ao longo de 30 gerações do AG. As três curvas representam os valores máximos, médios e mínimos da população de 50 modelos. Notamos a convergência da curva dos valores médios aproximando-se rapidamente da curva dos valores máximo da varimax, indicando que ao longo das gerações a população está ficando mais e mais homogênea em torno do melhor modelo (filtro ótimo).

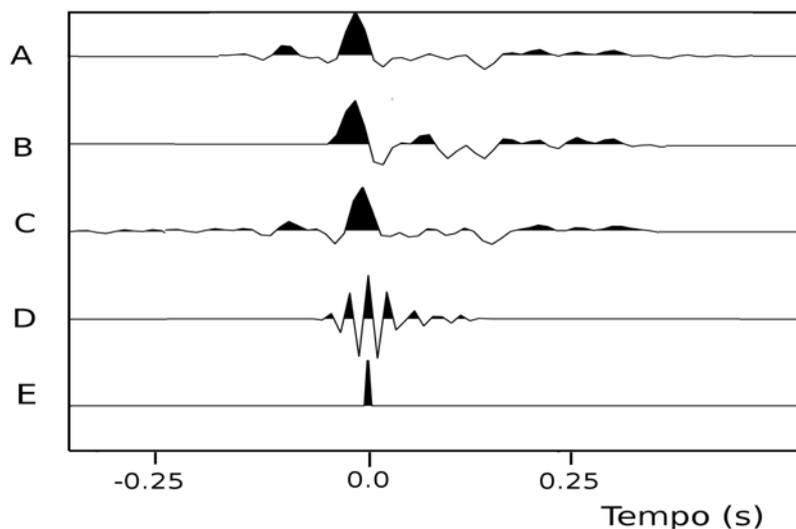


Figura 5.1: Deconvolução e estimativa do pulso. O pulso de fase mista em (A), pulsos de fase mínima e mista estimados em (B) e (C), o filtro de fase mista ótimo estimado (D), e o resultado da deconvolução do pulso original com o filtro inverso estimado em (E).

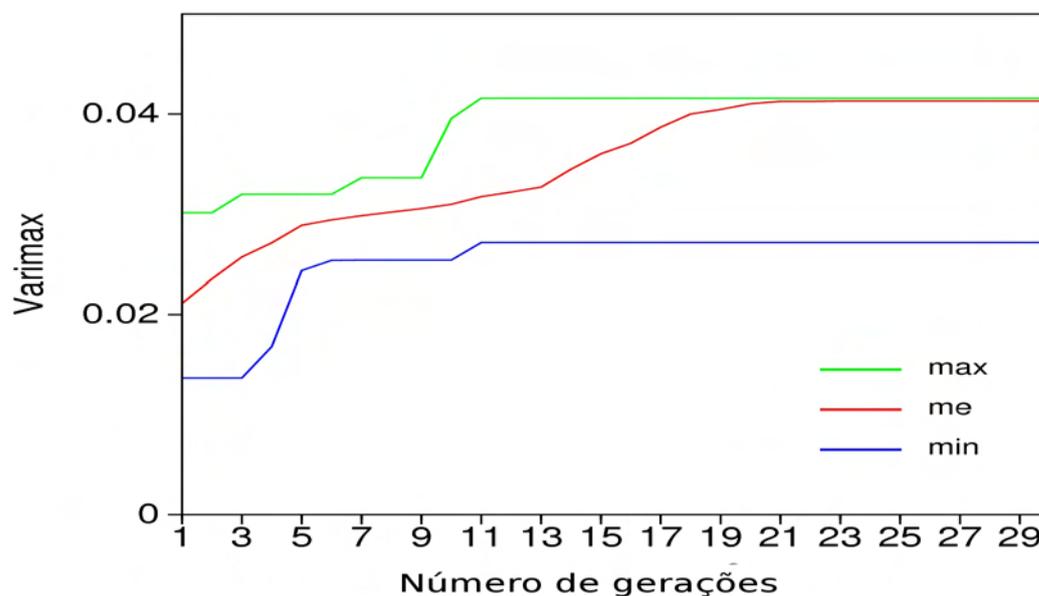


Figura 5.2: Desempenho do AG na deconvolução do pulso sintético Figura 5.1a. Valores da norma varimax (máximos, médios e mínimos) da população ao longo de 30 gerações. As curvas com comportamento ascendente ilustram a convergência do AG.

5.3 Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico sintético

A Figura 5.3 mostra o desempenho do filtro de fase mista na deconvolução do traço sísmico sintético, construído através da convolução de um pulso de fase mista com uma função refletividade pseudo-aleatória. Também utilizamos uma população de 50 indivíduos e 30 gerações na busca do filtro inverso ótimo.

A Figura 5.3A mostra o pulso sintético de fase mista utilizado. A função refletividade e o traço sintético estão representados nas Figuras 5.3B e 5.3C, respectivamente. Os resultados obtidos com o filtro de WL (fase mínima) e o filtro de fase mista ótimo estão representados nas Figuras 5.3D e 5.3E, respectivamente. Observa-se grande similaridade entre o traço deconvolvido e a função refletividade (Fig. 5.3B) indicando o bom desempenho do filtro inverso ótimo.

As Figuras 5.4A e 5.4B mostram, respectivamente, os pulso de fase mínima e mista estimados. Observa-se boa similaridade entre o pulso de fase mista estimado com o pulso original (Fig. 5.3A) utilizado na geração do traço sintético. A Figura 5.3C mostra o filtro inverso ótimo obtido com o AG.

A Figura 5.5 mostra o desempenho do AG na obtenção do filtro ótimo que deconvolve o traço sintético da Figura 5.3. A Figura ilustra a evolução dos valores máximos, médios e mínimos da norma varimax, calculados ao final de cada geração, ao longo das 30 gerações do AG. O mesmo comportamento de tendência convergente é revelado pelas três curvas.

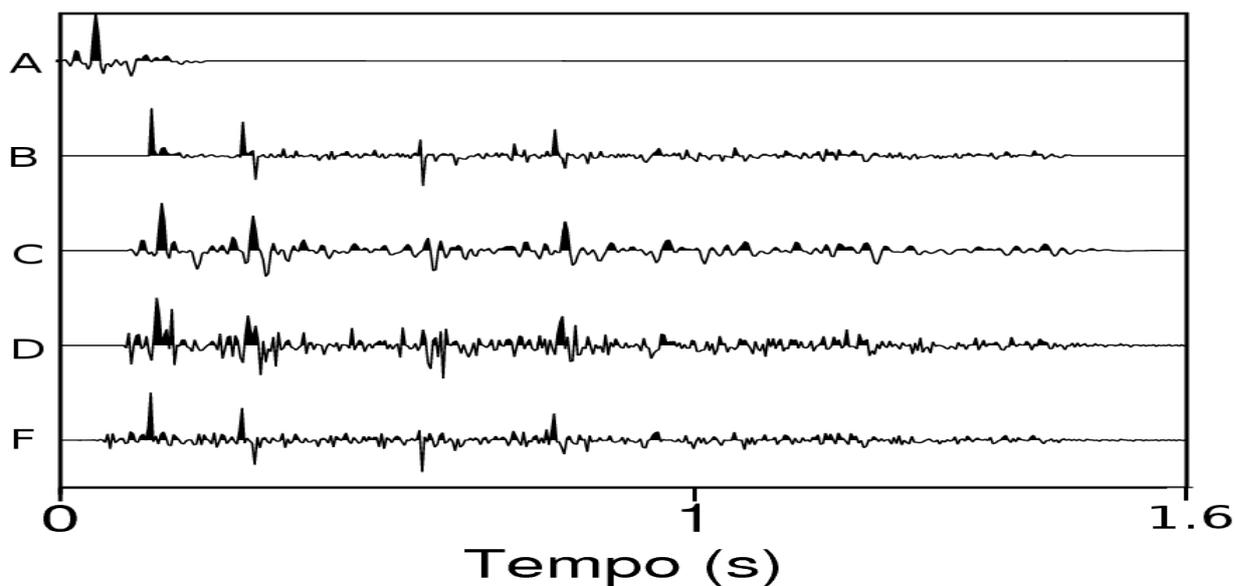


Figura 5.3: Deconvolução de um traço sintético. Pulso de fase mista em (A), função refletividade pseudo-aleatória em (B), e traço sísmico sintético em (C). Deconvolução de fase mínima em (D) e de fase mista com o filtro ótimo em (E).

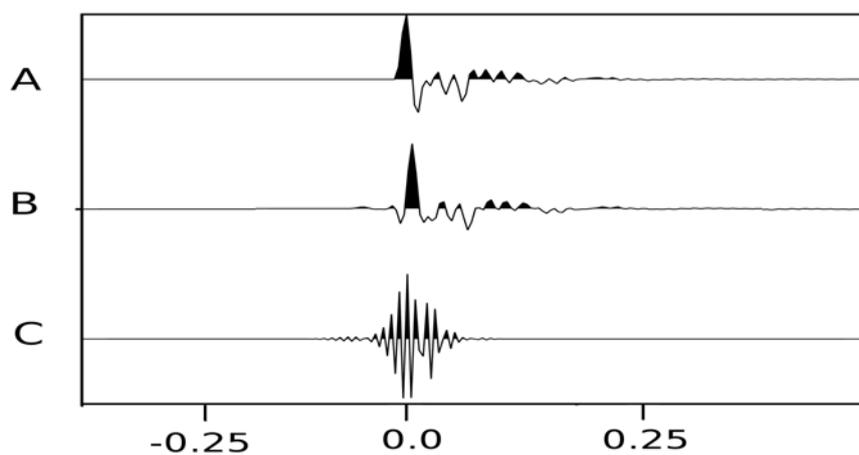


Figura 5.4: Estimativa dos pulsos e filtro ótimo. Pulso de fase mínima em (A). Pulso de fase mista em (B), e seu correspondente filtro inverso ótimo em (C).

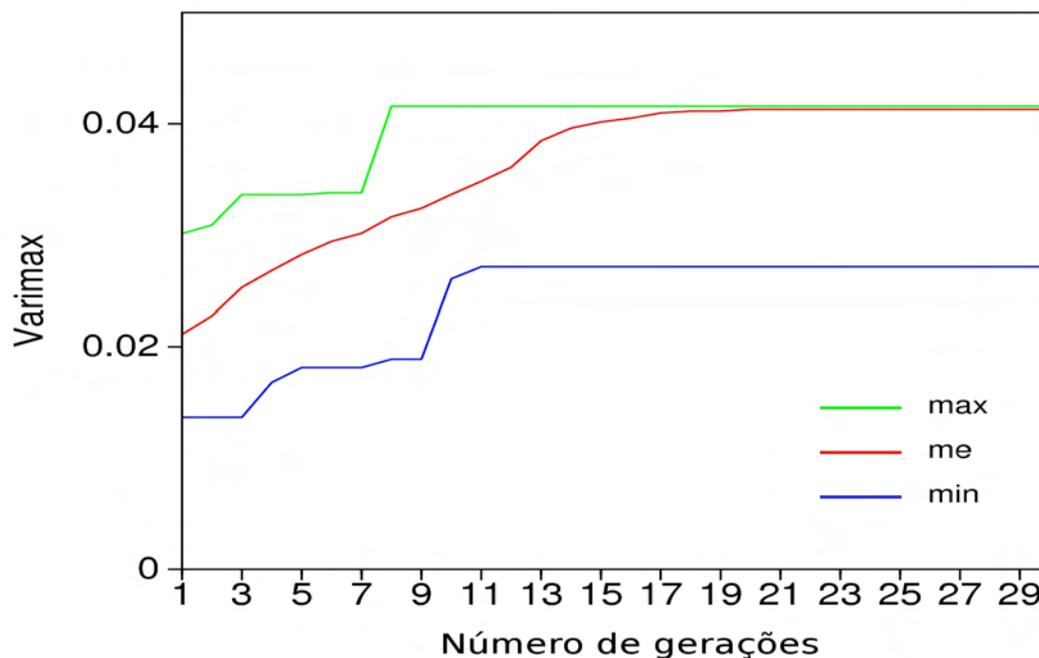


Figura 5.5: Performance do algoritmo genético para estimar o melhor filtro de fase mista que deconvolve o traço sintético representado na Figura 5.3.

5.4 Deconvolução e estimativa do pulso em traço sísmico real

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 ilustram o experimento de deconvolução de um traço sísmico real extraído de uma seção sísmica empilhada. Os mesmos parâmetros (população com 50 indivíduos e número de gerações igual a 30 e filtro de WL com 25 coeficientes) dos experimentos anteriores foram utilizados.

A Figura 5.6A mostra o traço sísmico real. Os resultados da deconvolução de fase mínima e mista com o filtro inverso ótimo, estão apresentados na Figura 5.6B e 5.6C, respectivamente.

A Figura 5.7 mostra os pulsos e filtros estimados na deconvolução do traço real da Figura 5.6A. Figuras 5.7A 5.7B e 5.7C mostram, respectivamente, os pulsos de fase mínima, de fase mista e o filtro inverso ótimo estimados.

A Figura 5.8 ilustra a evolução dos valores máximos, médios e mínimos da norma varimax, ao final de cada geração, ao longo das 30 gerações do AG. O mesmo comportamento de tendência convergente é revelado pelas três curvas.

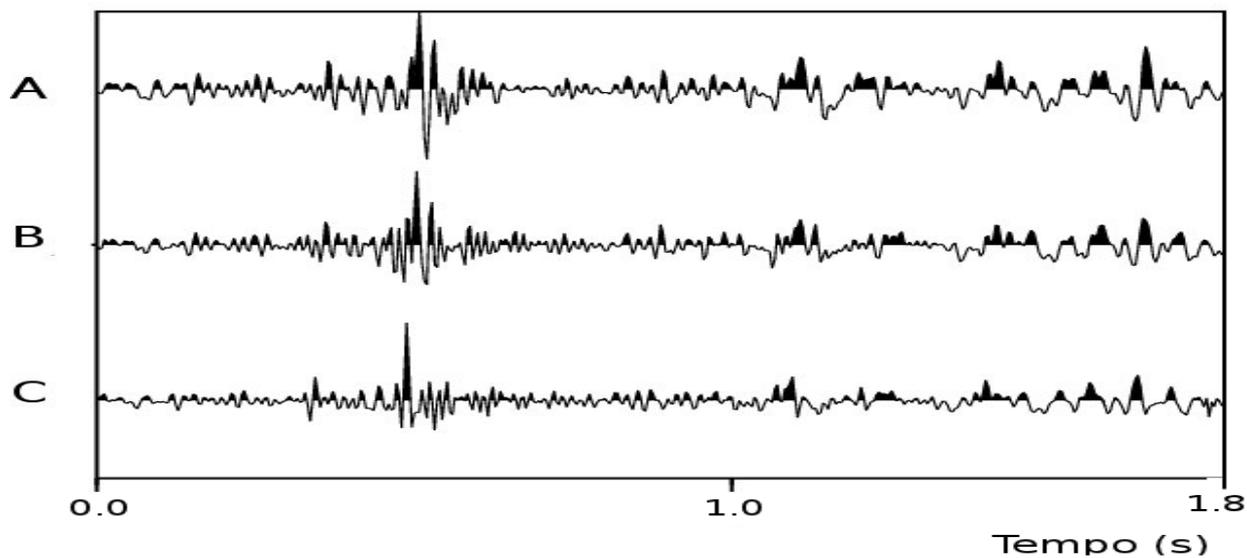


Figura 5.6: Na Figura: (A) mostra o traço real, (B) é a deconvolução com o filtro de Wiener Levinson e (C) é a deconvolução com o filtro ótimo de fase mista calculado.

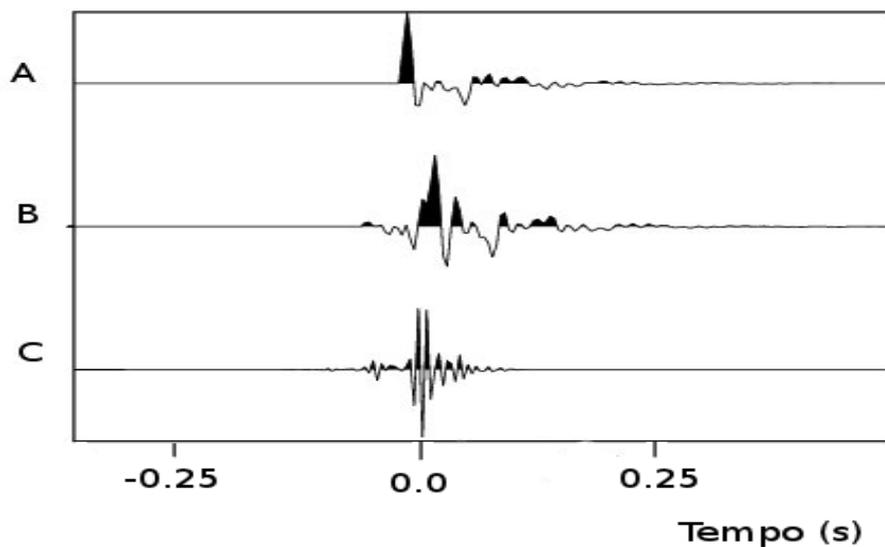


Figura 5.7: Na Figura (A) mostra o filtro de fase mínima estimado, (B) o pulso de fase mista estimado, e (C) o filtro de fase mista ótimo estimado.

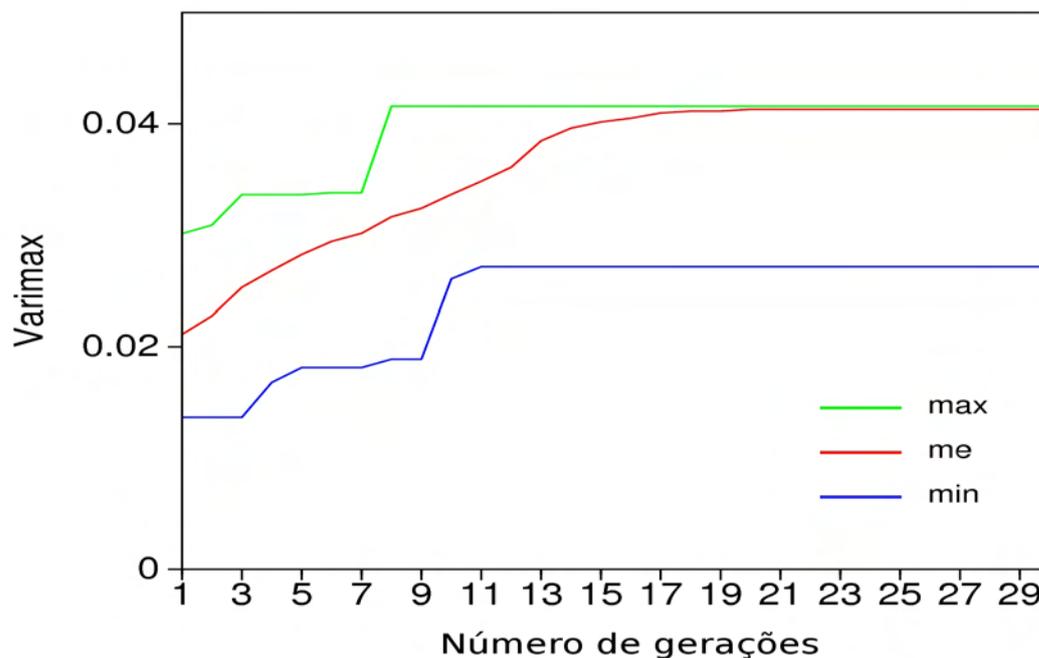


Figura 5.8: Performance do algoritmo genético para estimar o melhor filtro de fase mista que deconvolve o traço real da Figura 5.6.

5.5 Deconvolução de seções sísmicas 2D

A Figura 5.9 mostra uma seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha. Na deconvolução da seção sísmica um único filtro é calculado e aplicado em toda a seção. Para tanto adotamos o seguinte procedimento:

- Definimos a janela de interesse onde será avaliada a norma varimax.
- Calculamos uma autocorrelação média para os traços no interior da janela.
- Calculamos o filtro de WL de N coeficientes (por exemplo $N = 25$).
- Calculamos o filtro inverso ótimo utilizando o AG e deconvolvemos a seção.
- Estimamos o pulso sísmico tomando o inverso do filtro ótimo.

Os dois quadros desenhados sobre a Figura 5.12 indicam as janelas selecionadas, de interesse.

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram com maior detalhe os dados originais e os resultados da deconvolução de fase mínima e de fase mista correspondentes. Os dados originais estão

apresentados nas Figuras 5.10A e 5.11A. Os resultados da deconvolução com o filtro de fase mínima, de WL, estão apresentados nas Figuras 5.10B e 5.10B. As Figuras 5.10C e 5.11C mostram os resultados da deconvolução de fase mista utilizando o filtro ótimo obtido com o AG.

As Figuras 5.12 , 5.13 e 5.14 repetem o experimento anterior sobre outras duas áreas demarcadas na seção sísmica original, apenas com o objetivo de melhor ilustrar os resultados do método de deconvolução proposto.

Observa-se nos resultados da deconvolução de fase mista um ganho na resolução temporal como também na continuidade lateral das reflexões, comparada aos resultados obtidos com o método clássico de deconvolução de fase mínima, ou de WL.

A Figura 5.15 mostra com muita clareza o comportamento do espectro das seções sísmicas, onde o operador *all-pass* só troca a fase do filtro de WL, deixando a amplitude espectral similar ao resultado da deconvolução do filtro de fase mista.

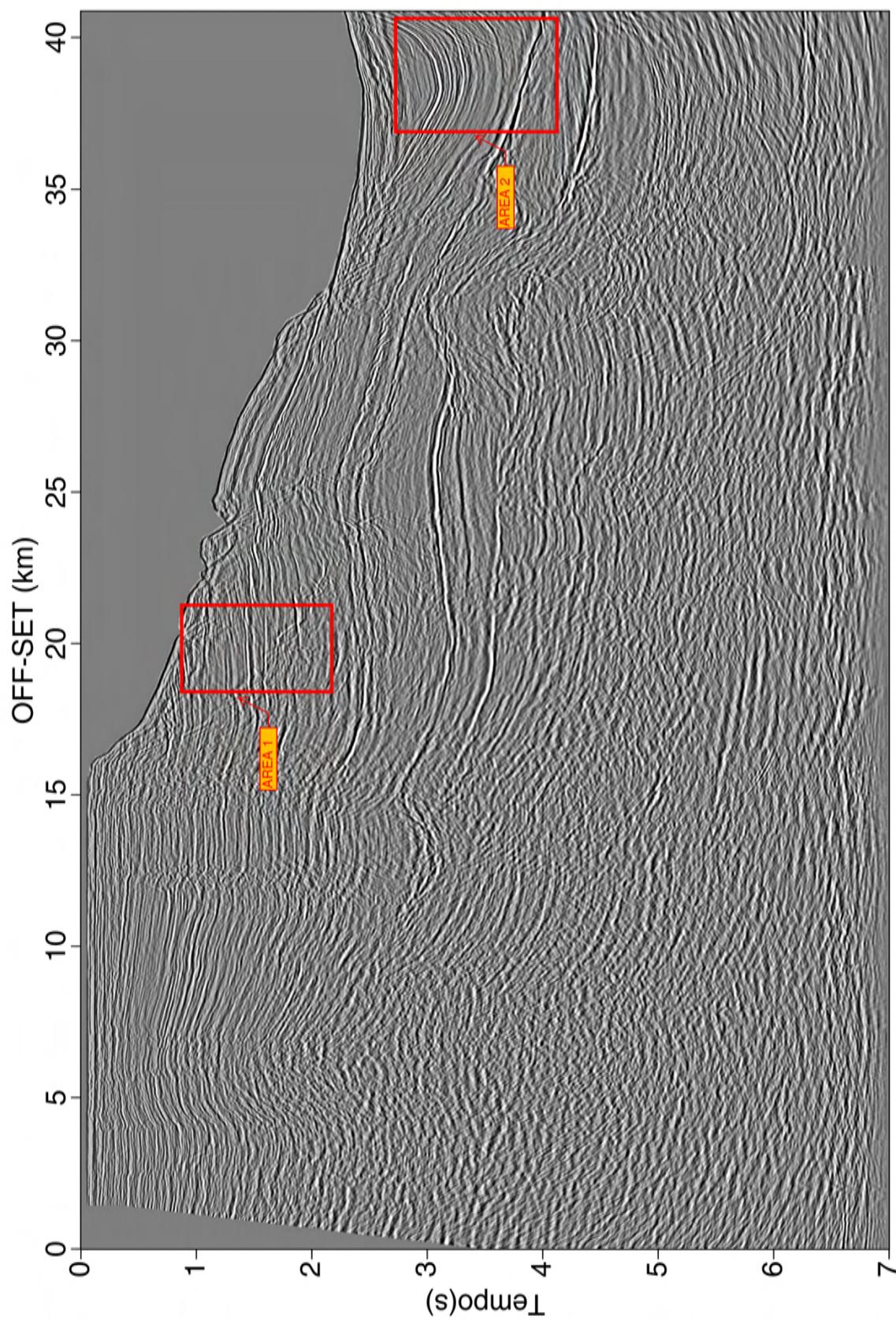


Figura 5.9: Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, mostrando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com *wiggle trace*.

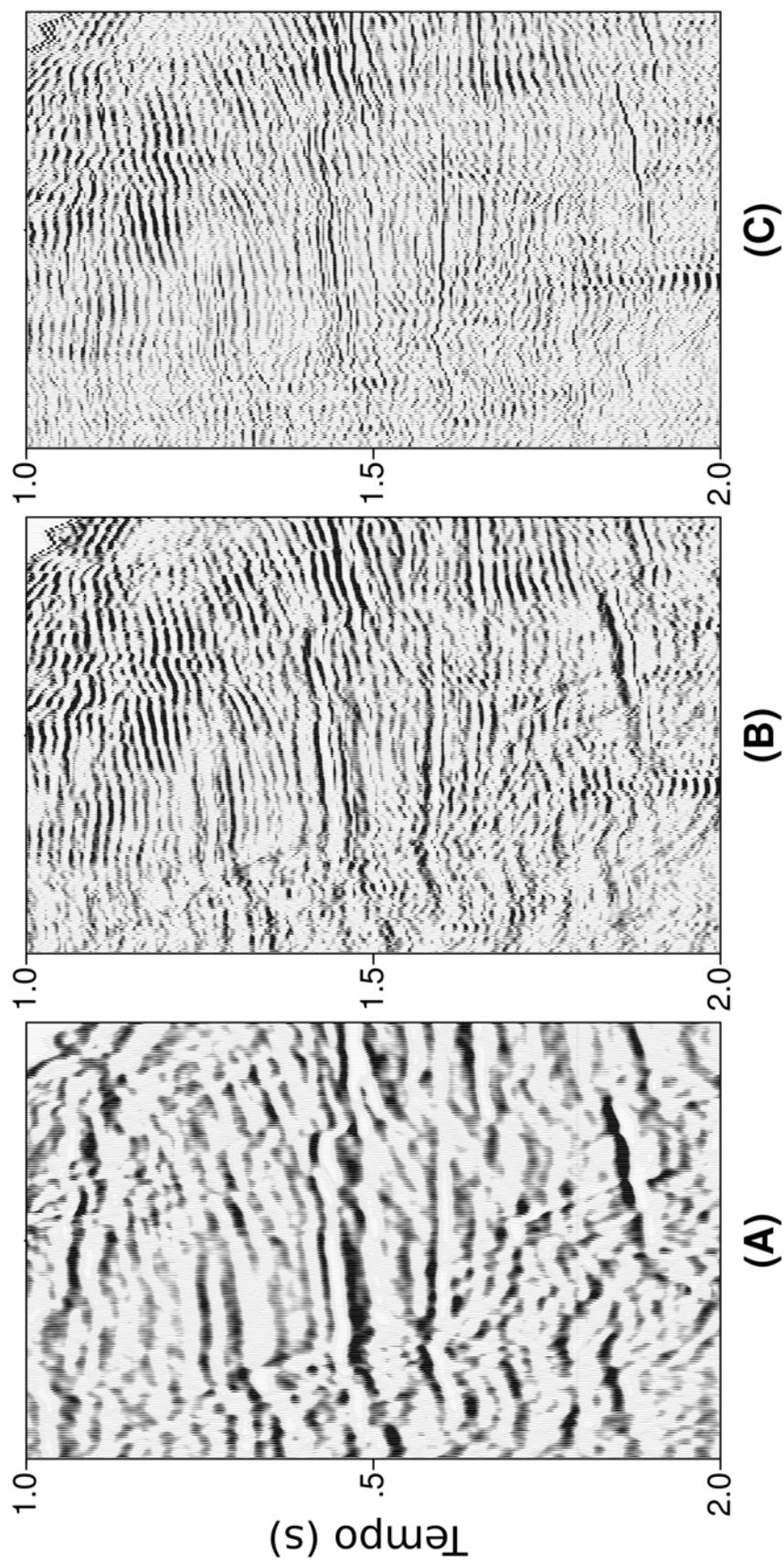


Figura 5.10: Resultados da deconvolução da área 1 com *wiggly trace*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

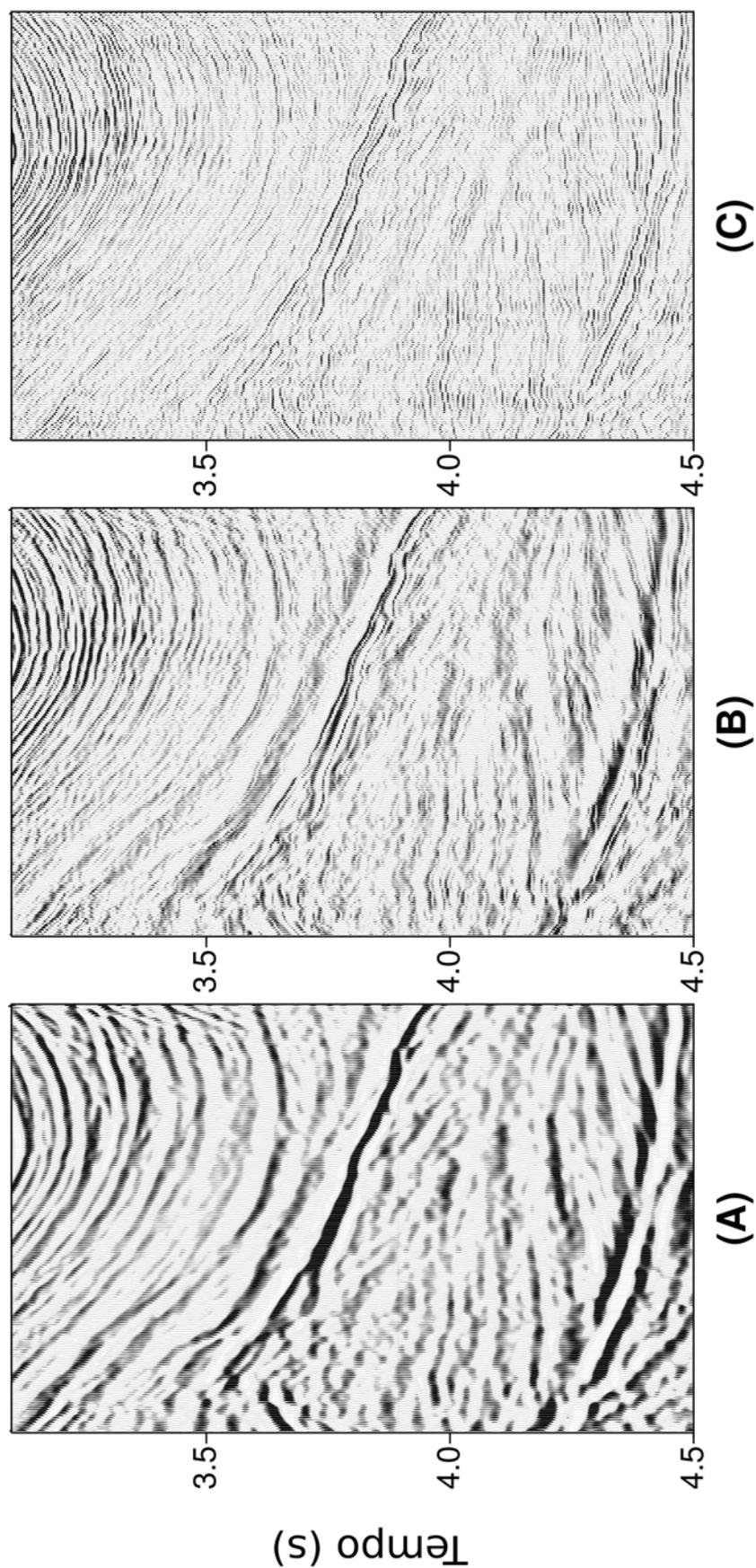


Figura 5.11: Resultados da deconvolução da área 2 com *wiggly trace*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

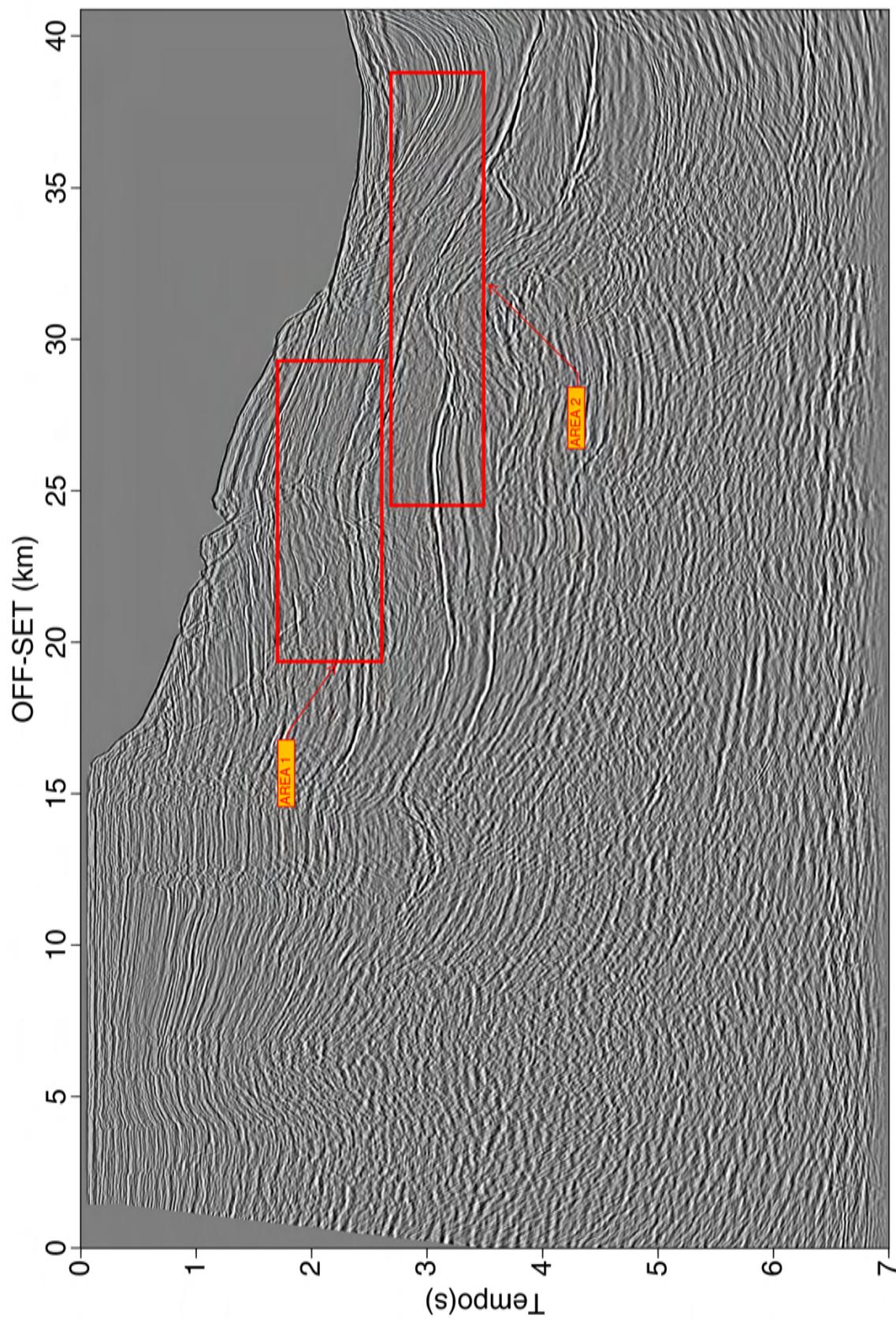


Figura 5.12: Seção sísmica marinha pós-empilhamento da Bacia do Jequitinhonha, indicando as áreas 1 e 2, escolhidas para ilustrar o método com *variable density*.

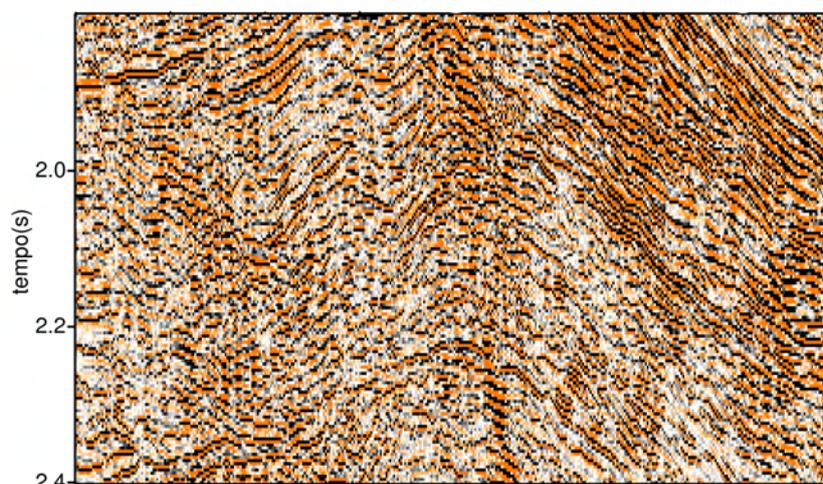
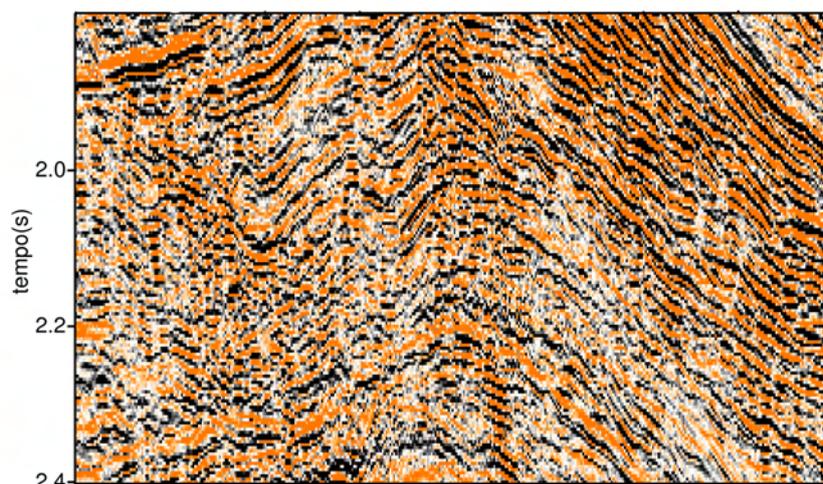
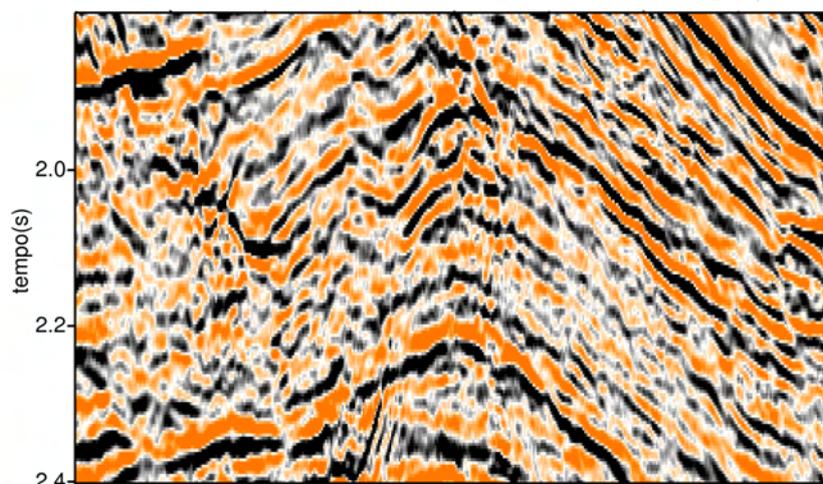
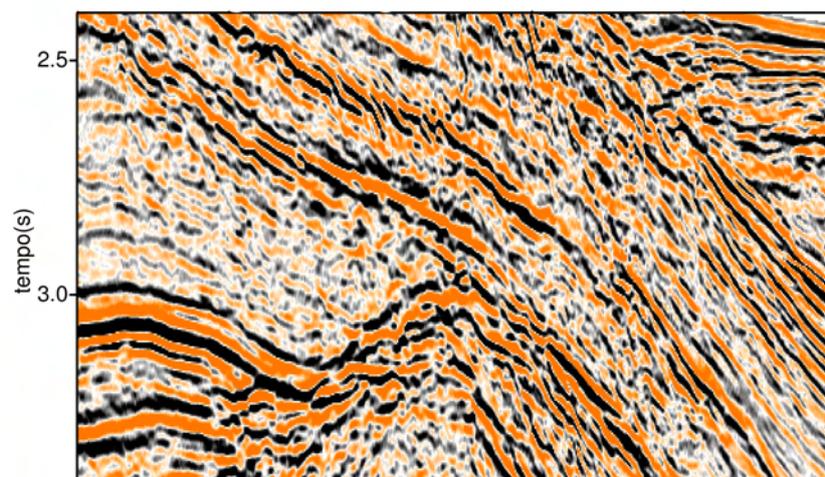
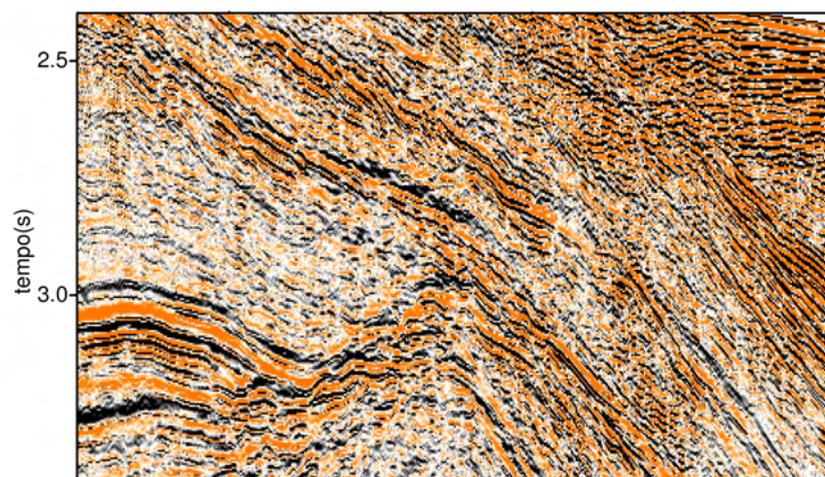


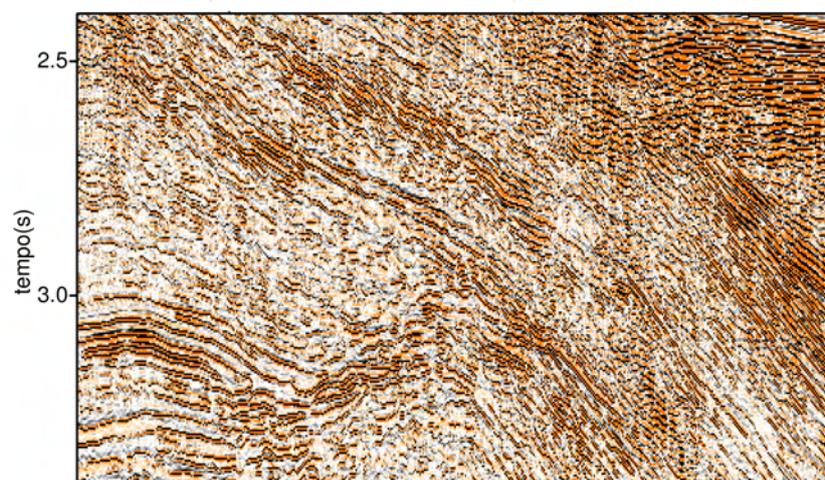
Figura 5.13: Resultados da deconvolução da área 1 com *variable density*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).



(A)



(B)



(C)

Figura 5.14: Resultados da deconvolução da área 2 com *variable density*. Seção original em (A), resultado da deconvolução de WL em (B) e deconvolução com filtro de fase mista ótimo em (C).

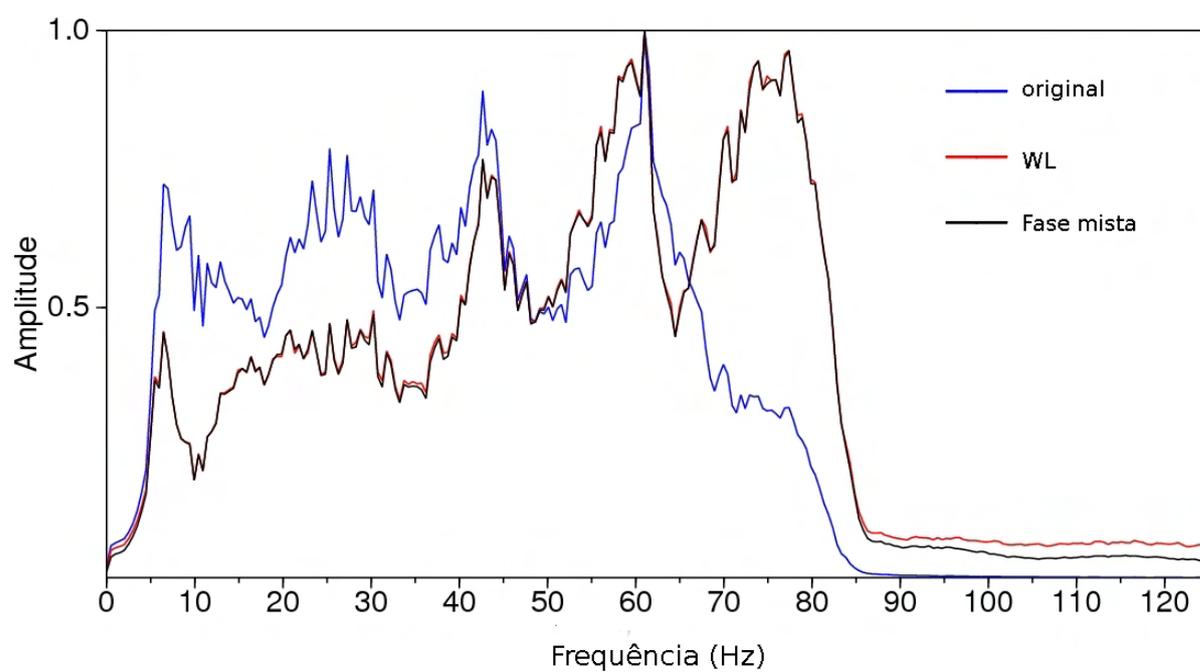


Figura 5.15: Espectros de amplitude médio dos dados originais e deconvolvidos da Seção sísmica 2D da Bacia do Jequitinhonha.

Capítulo 6

Conclusões

Se apresentam dois novos métodos para a deconvolução de dados sísmicos de reflexão. Os métodos permitem a obtenção de filtros inversos, utilizados na deconvolução do pulso sísmico, como também permitem estimar o pulso sísmico presente nos dados. Estes métodos utilizam operadores *all-pass*, que são aplicados no domínio do tempo para a mudança da fase do filtro de Wiener-Levinson ou para a mudança de fase do pulso de fase mínima.

Operadores *all-pass* foram implementados para o desenho dos filtros de fase mista através de dois métodos: (i) o método de configuração artificial das raízes fictícias e (ii) o método das raízes do filtro de Wiener-Levinson. Os dois métodos foram testados sobre dados sísmicos sintéticos e reais e apresentaram bom desempenho. Com o método das raízes fictícias estudamos o desenho dos operadores *all-pass* em função do número de raízes e de sua distribuição ao redor do círculo unitário. Este método pode ser implementado computacionalmente de forma relativamente simples, entretanto requer um número grande de raízes (cerca de 2000). Com o método das raízes do filtro de Wiener-Levinson foi possível obter bons resultados mesmo com um número pequeno de raízes obtidas de filtros de WL de 20 a 30 coeficientes. Os dois métodos possibilitam a obtenção de operadores *all-pass* para a mudança de fase do filtro de WL ou do pulso de fase mínima a ele associado.

A determinação do filtro ótimo foi obtida com um processo de otimização através de um algoritmo genético (AG). Através do AG exploramos a condição binária de cada raiz estar fora ou dentro do círculo de raio unitário, para determinar o filtro inverso ótimo e estimar o pulso sísmico associado. Também analisamos a influência do número de indivíduos (modelos) da população inicial do AG. Populações com número pequeno de indivíduos não permitem que se explore de forma adequada o universo de possibilidades, enquanto populações com

número muito grande tornam o custo computacional alto. Neste sentido o método que utiliza as raízes do filtro de WL se mostrou computacionalmente mais eficiente. A norma varimax, utilizada no AG, se mostrou adequada para mensurar a qualidade da deconvolução e selecionar os melhores modelos.

Os resultados mostraram que os métodos implementados, das raízes fictícias e o outro com as raízes do filtro de Wiener-Levinson, possuem robustez equivalente na deconvolução e o tempo de processamento do método de WL foi consideravelmente menor comparado com o método das raízes fictícias. Os filtros ótimos de fase mista foram testados em dados sintéticos e reais apresentando bons resultados. Utilizamos os dados de linhas sísmicas da Bacia de Jequitinhonha, demonstrando melhoria na resolução vertical e a continuidade dos refletores.

As duas novas abordagens podem ser implementadas de forma relativamente simples. A deconvolução utilizando operadores *all-pass* é computacionalmente eficiente e proporciona maior resolução temporal dos traços sísmicos. Os resultados obtidos indicam que a nova abordagem para deconvolução de dados sísmicos pode ser utilizada para melhorar a identificação dos eventos sísmicos refletidos e permite revelar em maior detalhe as feições sismo-estratigráficas e estruturais, de interesse para a exploração e o estudo de reservatórios de hidrocarbonetos.

Agradecimentos

Ao Professor Milton Porsani por sua orientação para a realização deste trabalho e seu acompanhamento, motivação e apoio durante meu curso de Doutorado.

Ao pessoal do CPGG-UFBA, especialmente ao professor Hedison Sato por sua colaboração e apoio neste Doutorado, à todos os amigos e colegas, especialmente a Flor Alba, Joaquin, Michael, Paulo Espinheira, Gary e Michelângelo.

Ao Governo e ao povo Brasileiro pela oportunidade dos estudos de Pós-Graduação, através da CAPES, PRH-ANP e CNPQ.

Especialmente à minha esposa Adriana por desafiar este caminho juntos, e minha querida mãe Isolina pelo acompanhamento espiritual.

Referências

- Van der Baan, M. (2008) Time varying wavelet estimation and deconvolution by kurtosis maximization, *Geophysics*, **73**:V11–V18.
- Van der Baan, M. e Pham, D. T. (2008) Robust wavelet estimation and blind deconvolution of noisy surface seismics., *Geophysics*, **73**:V37–V46.
- Caraballo, D. e Porsani, M. J. (2011) Design of all-pass operators using a genetic algorithm for mixed phase deconvolution, 81st Annual International SEG Meeting expanded abstracts, **30**:2674–2678.
- Claerbout, J. (1985) *Fundamentals of geophysical data processing*, Blackwell Science Inc.
- Eisner, A. e Hampson, G. (1990) Decomposition into minimum and maximum-phase components, *Geophysics*, **55**:897–901.
- Gan, Q., X. D. T. J. e Wang, Y. (2009) Seismic resolution enhancement for tight-sand gas reservoir characterization, *Journal of geophysics and Engineering*, **6**:21–28.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Reading, MA: Addison-Wesley.
- Holland, J. H. (1975) *Adaptation in natural and Artificial systems*, University of Michigan, press, USA.
- Lazear, G. D. (1993) Mixed-phase wavelet estimation using fourth order cumulants, *Geophysics*, **58**:1042–1051.
- Leinbach, J. (1993) Wiener spiking deconvolution and minimum phase wavelet: a tutorial, *Leading Edge*, **14**:189–192.
- Levi, S. e Oldenburg, D. W. (1982) The deconvolution of phase shifted wavelet, *Geophysics*, **47**:1285–1294.
- Lu, X. e Wang, Y. (2007) Mixed-phase wavelet estimation by iterative linear inversion of high-order statistics, *Geophysics*, **6**:21–28.
- Misra, S. e Chopra, S. (2010) Phase stability via nonlinear optimization: A case study, *Leading Edge*, **29**:1338–1343.

- Misra, S. e Sacchi, M. D. (2006) Nonminimum phase wavelet estimation by nonlinear optimization of all-pass operators, *Geoph. Prosp*, **55**:223–234.
- Ooe, M. e Ulrych, T. J. (1979) Minimum entropy deconvolution with an exponential transformation, *Geoph. Prosp*, **27**:458–473.
- Oppenheim, A. B., W. A. S. e Nawab, S. H. (1998) *Signals and Systems*, second edition, Prentice Hall, Inc.
- Papoulis, A. (1977) *Signal Analysis*, McGraw-Hill Companies.
- Porsani, M. e Ursin, B. (2000) Mixed-phase deconvolution and wavelet estimation, *Leading Edge*, **19**:76–79.
- Porsani, M. J. e Ursin, B. (1998) Mixed-phase deconvolution, *Geophysics*, **63**:637–647.
- Regalia, P. A., M. S. K. e Vaidyanathan, P. P. (1988) The digital all-pass filter: A versatile signal processing building block, *Proceedings of the IEEE*, **76**:19–37.
- Robinson, E. A. (1954) - Predictive deconvolution of time series with application to seismic exploration, Department of Geology and G, M.I.T.
- Robinson, E. A. e Treitel, S. (1982) *Geophysical signal Analysis*, Prentice-Hall, Inc.
- Sacchi, M. D. e Ulrych, T. (2000) Non minimum phase wavelet estimation using higher order statistics, *Leading Edge*, **19**:80–83.
- Taner, M.T., K. F. e Sheriff, R. (1979) Complex seismic trace analysis, *Geophysics*, **44**:1041–1063.
- Taner, M. e Sheriff, R. (1977) Application of Amplitude, Frequency, and Other Attributes to Stratigraphic and Hydrocarbon Determination, *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir 26, 301-327.
- Ulrych, T. e Walker, C. (1982) Analytic minimum entropy deconvolution, *Geophysics*, **36**:467–481.
- Ursin, B. e Porsani, M. J. (2000) Estimation of an optimal mixed-phase inverse filter, *Geoph. Prosp*, **19**:76–79.
- Velis, D. R. e Ulrych, T. (1996) Non minimum phase wavelet estimation using higher order statistics, *Leading Edge*, **61**:1939–1948.
- Wiggins, R. A. (1978) Minimum entropy deconvolution, *Geoexploration*, **16**:21–31.
- Yilmaz, O. (1987) *Seismic Data Processing*, Society Of Exploration Geophysicists.

Apêndice **A**

Obtenção de filtros inversos utilizando as equações estendidas de Yule-Walker

Neste apêndice apresentamos o método proposto por Porsani e Ursin, (1998) para obtenção de filtros inversos e pulsos de fase mista. O método utiliza a solução de sistemas de equações denominadas equações estendidas de Yule-Walker, EYW, cuja matriz dos coeficientes possui a estrutura bandeada porém não é simétrica. Estas equações são formadas a partir dos coeficientes da FAC do pulso que se deseja deconvolver. O método está apresentado a seguir.

Equações estendidas de Yule-Walker

Conhecendo-se os coeficientes da FAC do pulso que se deseja deconvolver,

$$\{0_\infty, \dots, 0, r_{-M}, \dots, r_{-1}, r_0, r_1, \dots, r_M, 0, \dots, 0_\infty\},$$

pode-se representar o sistema de equações EYW na forma,

$$\begin{bmatrix} r_\alpha & r_{\alpha-1} & \dots & r_{\alpha-N} \\ r_{\alpha+1} & r_\alpha & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{\alpha-1} \\ r_{\alpha+N} & \dots & r_{\alpha+1} & r_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha c_1 \\ \vdots \\ \alpha c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha E_N \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \alpha < M. \quad (\text{A.1})$$

Nota-se que a matriz é não simétrica e possui bandeamentos co-diagonais. O sobrescrito α , utilizado em αc_t e αE_N , designa a solução obtida com o coeficiente r_α na diagonal principal da matriz. A solução do sistema (A.1) pode ser obtida de forma bastante rápida através de algoritmos recursivos tipo-Levinson (Porsani e Ursin, 1998).

Fatoração do pulso de fase mínima

Considerando-se $N \rightarrow \infty$ e tomando-se em conta a estrutura bandeada do sistema, pode se escrever,

$$K^2 {}^\alpha c_t * R\tilde{p}(t) = K^2 {}^\alpha c_t * {}^0 p_t * {}^0 \bar{p}_t = g_t \quad , \quad g_t = \begin{cases} = 0 & , t > \alpha \\ \neq 0 & , t \leq \alpha \end{cases} . \quad (\text{A.2})$$

Uma vez que ${}^0 \bar{p}_t = 0$, para $t > 0$, e $g_t = 0$, para $t > \alpha$, então ${}^\alpha c_t$ precisa necessariamente colapsar $M - \alpha$ termos do pulso de fase mínima, comprimindo-o,

$${}^\alpha c_t * {}^0 p_t = {}^\alpha b_t = 0 \quad , \quad t > \alpha , \quad (\text{A.3})$$

onde, ${}^\alpha b_t = \{1, {}^\alpha b_1, \dots, {}^\alpha b_\alpha\}$, representa a porção restante do pulso de fase mínima.

Ou seja, o filtro ${}^\alpha c_t$ deconvolve uma porção do pulso de fase mínima, resultando o sinal causal com $\alpha + 1$ termos não nulos. Uma vez que a_t é de fase mínima, ${}^\alpha b_t$ também será necessariamente de fase mínima. Desta forma tem-se,

$$K^2 {}^\alpha c_t * {}^0 p_t * {}^0 \bar{p}_t = K^2 {}^\alpha b_t * {}^0 \bar{p}_t = g_t = 0 \quad , \quad t > \alpha . \quad (\text{A.4})$$

Nota-se que deixando $\alpha = 0$ e $N \rightarrow \infty$ a equação acima reduz-se à equação utilizada na obtenção do filtro de WL onde a matriz é simétrica.

Deixando-se, ${}^\alpha a_t = \{1, {}^\alpha a_1, \dots, {}^\alpha a_{M-\alpha}\}$ representar a porção que é removida (deconvolvida) do pulso de fase mínima, pode-se escrever,

$${}^\alpha a_t * {}^\alpha b_t = {}^0 p_t . \quad (\text{A.5})$$

Utilizando-se a decomposição do pulso de fase mínima, acima representada, na equação (A.3), e deixando-se $N \rightarrow \infty$ conclui-se que,

$${}^\alpha c_t * {}^\alpha a_t = \delta_t \quad (\text{A.6})$$

Passos do algoritmo para obtenção de um filtro inverso de fase mista

1. Obtenção do filtro de WL:

$$\sum_{j=0}^N R_p(\tau - j) {}^0c_j = 0, \tau = 1, \dots, N, {}^0c_0 = 1$$

2. Obtenção do pulso de fase mínima:

$${}^0P(Z) = \frac{1}{{}^0C(Z)} \longleftrightarrow {}^0c_t^{-1} = {}^0p_t$$

3. Obtenção da componente causal do filtro inverso:

$$\sum_{j=0}^N R_p(\tau - j) {}^\alpha c_j = 0, \tau = \alpha + 1, \dots, \alpha + N$$

4. Obtenção da componente causal do pulso:

$${}^\alpha A(Z) = \frac{1}{{}^\alpha C(Z)} \longleftrightarrow {}^\alpha c_t^{-1} = {}^\alpha a_t$$

5. Obtenção da componente não causal do pulso:

$${}^\alpha B(Z) = {}^\alpha C(Z) {}^0P(Z) \longleftrightarrow {}^\alpha c_t * {}^0p_t = {}^\alpha b_t$$

6. Obtenção do pulso de fase mista causal com α raízes dentro círculo unitário:

$${}^\alpha P(Z) = {}^\alpha A(Z) {}^\alpha B(Z^{-1}) Z^\alpha \longleftrightarrow {}^\alpha a_t * {}^\alpha \bar{b}_t * \delta_{t-\alpha} = {}^\alpha p_t$$

7. Obtenção da componente não causal do filtro:

$${}^\alpha D(Z) = \frac{1}{B(Z)} \longleftrightarrow {}^\alpha d_t = {}^\alpha b_t^{-1}$$

8. Obtenção do filtro de fase mista:

$${}^\alpha H(Z) = \frac{{}^\alpha B(Z)}{{}^\alpha B(Z^{-1}) Z^\alpha} {}^0C(Z) = \frac{1}{A(Z)} \frac{1}{B(Z^{-1})} Z^{-\alpha} \longleftrightarrow {}^\alpha c_t * {}^\alpha \bar{d}_t * \delta_{t+\alpha} = {}^\alpha h_t$$

Como principais resultados temos que:

- A solução, ${}^\alpha c_t$, das equações EYW, tem a propriedade básica de cancelar uma parte do pulso de fase mínima extraindo o polinômio ${}^\alpha B(Z)$ cujas raízes estimam as raízes do pulso de fase mínima.
- Para coeficientes $\alpha = 1, \dots, M - 1$ na diagonal da matriz das EYW, diferentes filtros inversos, e os correspondentes pulsos de fase mista, podem ser estimados.