



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

PROCESSAMENTO SÍSMICO E USO DE
ATRIBUTOS EM DADOS DE REFLEXÃO
DA PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DO
RECÔNCAVO

VERENA SANTOS ALMEIDA

SALVADOR – BAHIA
NOVEMBRO – 2019

Processamento sísmico e uso de atributos em dados de reflexão da porção
central da Bacia do Recôncavo

por

VERENA SANTOS ALMEIDA

Orientador: Dr. Michelângelo Gomes da Silva

Co-orientador: Me. Daniel Bono Ribeiro Vilas Boas

GEOA76 – TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO II

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

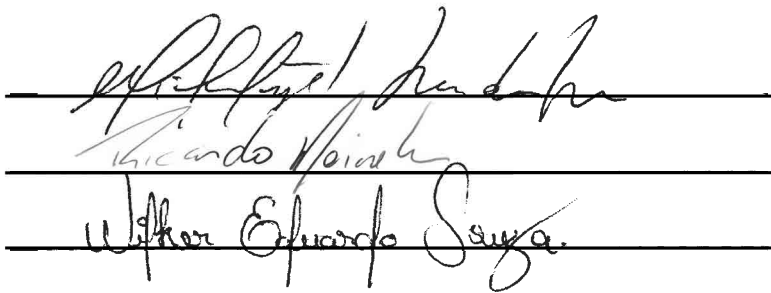
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

COMISSÃO EXAMINADORA



The image shows three handwritten signatures in black ink, each written over a horizontal line. The first signature is 'Michelângelo Gomes da Silva', the second is 'Ricardo Piazza Meireles', and the third is 'Wilker Eduardo Souza'.

Dr. Michelângelo Gomes da Silva

Dr. Ricardo Piazza Meireles

Me. Wilker Eduardo Souza

DATA DA APROVAÇÃO: 29/11/2019

Dedico este trabalho aos meus pais,
Carlos e Edelvira, e à minha irmã
Verusca. Amo vocês.

Resumo

Neste trabalho foi realizado o processamento e a interpretação sísmica das estruturas geológicas existentes na subsuperfície da porção central da Bacia do Recôncavo com o uso de atributos sísmicos extraídos de seções empilhadas. A área de estudo está localizada na porção central da Bacia do Recôncavo, a qual faz parte do sistema de riftes abortados Recôncavo-Tucano-Jatobá, desenvolvido no Eocretáceo sob o campo de tensões que formou o oceano Atlântico Sul. Foram utilizados dados sísmicos 2D fornecidos pela ANP. A região em que se encontram os dados sísmicos está inserida a leste do Baixo de Alagoinhas e a noroeste do Baixo de Miranga, e compreende sete linhas sísmicas de reflexão empilhadas e uma pré-empilhada.

Foi realizado o processamento da linha sísmica de reflexão 0227-0018 e definido um fluxograma de processamento. O uso do método ST-SVD na etapa de filtragem permitiu a atenuação do ruído groundroll e a melhoria da continuidade espacial dos eventos hiperbólicos existentes nos sismogramas de ponto médio comum e possibilitou uma melhor estimativa do campo de velocidades. A seção sísmica obtida após o processamento da linha 0227-0018 apresenta uma boa resolução e maior razão sinal-ruído.

Após o processamento, foram calculados os atributos sísmicos do traço complexo, o tecVA e o de similaridade das linhas sísmicas da área de estudo. Esses atributos foram usados para auxiliar a interpretação sísmica. A interpretação estrutural das linhas sísmicas, em conjunto com a análise das seções obtidas após o cálculo dos atributos, permitiram a identificação e mapeamento com maior confiabilidade da grande falha (F1) e fraturas existentes em subsuperfície, e a definição dos horizontes sísmicos relacionados ao embasamento e ao pré-rifte da área de estudo. Foram gerados os mapas de superfície do pré-rifte e embasamento, e o plano da F1. Foram utilizados os softwares comerciais OpendTect e *SeisSpace* para interpretação e processamento sísmico, respectivamente.

Abstract

In this work the seismic processing and interpretation of the geological structures existing in the subsurface of the central portion of the Recôncavo Basin was performed using seismic attributes extracted from stacked sections. The study area is located in the central portion of the Recôncavo Basin, which is part of the Recôncavo-Tucano-Jatobá aborted rift system, developed in the Eocretaceous under the stress field that formed the South Atlantic Ocean. The 2D seismic data provided by ANP were used. The 2D seismic data provided by ANP were used. The region where the seismic data is located in the eastern direction of Baixo de Alagoinhas and northwest of Baixo de Miranga, and comprises seven post-stacked and one pre-stacked reflection seismic lines.

The reflection seismic line 0227-0018 was processed and defined a flowchart. The using ST-SVD method in the filtering allowed groundroll attenuation and improved spatial continuity of hyperbolic events in common midpoint seismograms and enabled a better estimation of the velocity field. The seismic section obtained after processing the 0227-0018 line has a good resolution and higher signal to noise ratio.

After processing, the seismic attributes of the complex trace and tecVA and similarity of the seismic lines were calculated. These attributes were used to aid seismic interpretation. The structural interpretation of the seismic lines, together with the analysis of the sections obtained after the attributes calculation, allowed the identification and mapping with greater reliability of the major fault (F1) and fractures, and the definition of seismic horizons related to the basement and pre-rift of the study area. The pre-rift and basement surface maps and the plan of the F1 were generated. The commercial software OpendTect and SeisSpace were used to interpretation and seismic processing, respectively.

Sumário

Resumo	3
Abstract	4
Introdução	12
1 Aspectos geológicos da Bacia do Recôncavo	14
1.1 Geologia regional	14
1.2 Evolução tectono-sedimentar	17
1.3 Sistema petrolífero	21
1.4 Informações relacionadas ao rifteamento	21
1.5 Área de estudo	24
2 Processamento sísmico	26
2.1 Pré-processamento	27
2.1.1 Leitura do dado	27
2.1.2 Geometria	28
2.1.3 Correção estática	31
2.1.4 Correção de amplitude	35
2.2 Processamento avançado	37
2.2.1 Filtragem SVD	37
2.2.2 Análise de velocidades	44
2.2.3 Correção NMO	46
2.2.4 Empilhamento e deconvolução	48
2.2.5 Migração	52
3 Atributos Sísmicos	54
3.1 Classificação dos atributos	54
3.2 Atributos convencionais do traço complexo	57
3.3 Técnica volume de amplitude – tecVA	60

3.4	Similaridade	62
4	Resultados	64
4.1	Similaridade	64
4.2	Amplitude instantânea	72
4.3	Frequência instantânea	76
4.4	Atributo tecVA	80
4.5	Fase instantânea	85
5	Conclusões	91
	Agradecimentos	93
	Referências	95
I	Carta cronoestratigráfica da Bacia do Recôncavo	98

Lista de Tabelas

2.1 Principais parâmetros empregados na aquisição da linha sísmica de reflexão 0227-0018 da Bacia do Recôncavo.	30
--	----

Lista de Figuras

1.1	Mapa com os limites e principais estruturas da Bacia do Recôncavo. Fonte: Silva (2013)	15
1.2	Mapa estrutural da Bacia do Recôncavo com as seções geológicas dos seus principais compartimentos e localização de dados sísmicos 2D adquiridos pela Petrobras. Fonte: Modificado de Destro et al. (2003)	16
1.3	Mapa de distribuição dos campos de óleo e gás na Bacia do Recôncavo com a localização das linhas sísmicas utilizadas. Fonte: Modificado de Destro (2002)	22
1.4	Bloco diagrama da estruturação do rifte. Falhas de vergências opostas são separadas por uma zona de acomodação Fonte: Holz (2012)	23
1.5	Bloco diagrama representativo do arcabouço estrutural da bacia com a indicação das principais falhas. Fonte: Modificado de Destro (2002)	24
1.6	Mapas com a localização da Bacia do Recôncavo em (a), da área de estudo em (b) e de detalhes com os dados sísmicos 2D pré e pós-empilhados fornecidos pela ANP em (c).	25
2.1	Fluxograma do processamento sísmico realizado na linha sísmica de reflexão 0227-0018 localizada na porção central da Bacia do Recôncavo.	27
2.2	Opções de reorganização dos traços sísmicos em famílias de traço comum. Fonte: Silva (2004)	29
2.3	Sismograma de tiro original em (a) e após a definição da geometria em (b)	31
2.4	Efeitos da topografia e ZBV na seção de afastamento nulo, para um refletor horizontal em subsuperfície. Fonte: Souza (2016)	32
2.5	Definição da janela em tempo para treinamento da rede neural.	33
2.6	<i>Picking</i> automático das primeiras quebras.	34
2.7	Parâmetros da ferramenta <i>Refraction Statics Calculation</i>	34
2.8	Sismograma de tiro com geometria em (a) e após aplicação da correção estática em (b).	35

2.9	Sismograma de tiro após a correção estática em (a) e após a com correção de amplitude em (b).	36
2.10	Representação esquemática da SVD de uma matriz de dados \mathbf{D} e suas autoimagens. Fonte: Silva (2015)	39
2.11	Matriz \mathbf{D}_N com traço original deslocado e suas autoimagens. Fonte: Silva (2015)	40
2.12	Decomposição SVD de ordem $N = 5$ do traço sísmico. Componentes de baixa para alta frequências representadas pelos traços: (a), (b), (c), (d), (e). Soma das componentes em(f) traço sísmico original em (g). Fonte: Silva (2015)	41
2.13	Resultado da aplicação do método ST-SVD na família de tiro 59 da linha sísmica 0227-0018, em (a) temos os sismograma após a correção de amplitude, em (b) a componente de baixa frequência contendo o groundroll e em (c) o sismograma filtrado correspondente a componente de alta frequência.	42
2.14	Resultado da aplicação do método ST-SVD na família de tiro 204 da linha sísmica 0227-0018, em (a) temos os sismograma após a correção de amplitude, em (b) a componente de baixa frequência contendo o groundroll e em (c) o sismograma filtrado correspondente a componente de alta frequência.	42
2.15	Espectros de amplitude dos sismogramas apresentados na figura 2.13.	43
2.16	Espectros de amplitude dos sismogramas apresentados na figura 2.14.	43
2.17	Análise de velocidades da linha 0227-0018, em (a) o espectro de velocidades gerado, o sismograma <i>supergather</i> com as reflexões em (b) e o espectro com a função velocidade definida pelos pontos selecionados em (c)	45
2.18	Campo de velocidades obtido da linha sísmica 0227-0018.	46
2.19	Sismograma com as hipérbolas de reflexão em (a) e após a correção NMO em (b).	47
2.20	Seção sísmica empilhada bruta da linha 0227-0018.	50
2.21	Seção sísmica empilhada deconvolvida da linha 0227-0018.	51
2.22	Seção sísmica migrada da linha 0227-0018	53
3.1	Atributos sísmicos relacionados à informação sísmica básica de tempo, amplitude, frequência e atenuação. Fonte: Brown (2001)	56
3.2	Classificação dos atributos de acordo com o modo como são gerados. Baseados na seção sísmica, em eventos ou volumétricos. Fonte: Chen e Sidney (1997)	57
3.3	Traço sísmico complexo. Fonte: Souza (2016)	58
3.4	Atributos sísmicos amplitude instantânea $a(t)$ e fase instantânea $\phi(t)$. Fonte: Souza (2016)	59
3.5	Traço com valor absoluto e amplitude RMS. Fonte: Meneses (2010)	61

3.6	Traço com amplitude RMS e atributo tecVA. Fonte: Meneses (2010)	62
4.1	Seção sísmica da linha 0026-1414.	65
4.2	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1414.	65
4.3	Seção sísmica da linha 0227-0016.	66
4.4	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0227-0016.	66
4.5	Seção sísmica da linha 0026-1463.	67
4.6	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1463.	67
4.7	Seção sísmica da linha 0026-1407.	68
4.8	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1407.	68
4.9	Seção sísmica da linha 0227-0006	69
4.10	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0227-0006.	69
4.11	Seção sísmica da linha 0227-0007.	70
4.12	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0227-0007.	70
4.13	Seção sísmica da linha 0026-1172.	71
4.14	Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1172.	71
4.15	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1414.	72
4.16	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0227-0016.	72
4.17	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1463.	73
4.18	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1407.	73
4.19	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0227-0006.	74
4.20	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0227-0007.	75
4.21	Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1172.	75
4.22	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1414.	76
4.23	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0227-0016.	76
4.24	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1463.	77
4.25	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1407.	77
4.26	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0227-0006.	78
4.27	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0227-0007.	79
4.28	Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1172.	79
4.29	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1414.	80
4.30	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0016.	80
4.31	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1463.	81
4.32	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1407.	81
4.33	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0006.	82
4.34	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0018 processada.	82
4.35	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0007.	83

4.36	Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1172.	83
4.37	Representação geral do plano de falha (acima) e do caimento do plano de falha (abaixo).	84
4.38	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1414.	85
4.39	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0016.	85
4.40	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1463.	86
4.41	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1407.	86
4.42	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0006.	87
4.43	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0018 processada. . .	87
4.44	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0007.	88
4.45	Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1172.	88
4.46	Representação das superfícies de topo estrutural do pré-rifte (horizonte superior) e topo do embasamento (horizonte inferior).	89
4.47	Representação da superfície referente ao topo do pré-rifte (acima) e da superfície referente ao topo do embasamento (abaixo).	90
I.1	Carta cronoestratigráfica da Bacia do Recôncavo. Fonte: Silva et al. (2007) .	98

Introdução

Impulsionados pela indústria do petróleo, diversas áreas científicas sofreram grandes avanços tecnológicos, entre elas a geofísica, a qual estuda a subsuperfície através de métodos indiretos. Entre os métodos geofísicos, a sísmica de reflexão é aquela que apresenta o maior sucesso na exploração de acumulações de hidrocarbonetos, devido à profundidade de investigação e quantidade de informações fornecidas pelas seções sísmicas, responsável pelo imageamento das feições em subsuperfície a partir do registro do tempo de trânsito de ondas acústicas (Vilas Boas, 2016).

O processamento de dados sísmicos é uma atividade rotineira na indústria do petróleo e tem como principal objetivo obter uma imagem representativa da superfície. Afim de que essa imagem obtida seja a mais condizente com a geologia, uma série de etapas devem ser seguidas, tais como a filtragem e atenuação dos ruídos coerentes e aleatórios, correção estática, empilhamento e migração, que leva os refletores à sua posição real (Souza, 2016). Essas etapas se inserem em duas fases do fluxo de processamento: o pré-processamento e o processamento avançado (Silva, 2004). Na primeira é feito um tratamento inicial ao dado bruto, em que técnicas mais simples são aplicadas; na segunda são utilizadas técnicas mais sofisticadas, o que implica no aumento da razão sinal-ruído.

Atributo sísmico é qualquer medida do dado sísmico que ajude a visualizar melhor ou a quantificar valores de interesse da interpretação (Meneses, 2010). Considerar o traço sísmico registrado como parte real de um traço sísmico analítico torna possível extrair informações de amplitude, fase e frequência. A parte imaginária é a transformada de Hilbert do traço registrado (Taner et al., 1979). Os dois atributos fundamentais do traço complexo são a amplitude e a fase instantânea. A frequência instantânea é a taxa de variação temporal da fase instantânea.

Este trabalho propõe realizar o processamento de uma linha sísmica de reflexão 2D localizada na porção central da Bacia do Recôncavo, em conjunto com a análise de sete linhas pós-empilhadas e sua interpretação estrutural com o auxílio de atributos sísmicos.

O processamento do dado sísmico foi feito utilizando o *software SeisSpace*, o cálculo e visualização dos atributos, além da interpretação estrutural, foram feitos no *OpenTect* da

dGB Earth Sciences.

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira: no capítulo 1 é apresentado o estudo da geologia da Bacia do Recôncavo; o capítulo 2 abrange a teoria do processamento sísmico, as etapas realizadas e seus resultados alcançados, destacando-se em especial a etapa de filtragem com o uso do método ST-SVD (Silva, 2015) para atenuação do ruído *groundroll* dos dados ; no capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos dos atributos sísmicos; no capítulo 4 são demonstrados e discutidos os resultados sob o ponto de vista dos atributos utilizados, além disso, é apresentado o plano da falha F1 e ilustrados os mapas de superfície de topo estrutural do embasamento e pré-rifte da área de estudo. Por fim, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho.

Capítulo 1

Aspectos geológicos da Bacia do Recôncavo

Neste capítulo é apresentado os aspectos geológicos gerais da Bacia do Recôncavo, tais como a sua deposição sedimentar e evolução tectono-sedimentar. Além disso, serão abordadas informações referentes ao rifteamento no contexto geológico no qual se insere a área de estudo.

Será mostrada mais adiante a localização dos dados sísmicos na área de estudos, a qual está inserida numa zona de falha composta por falhas normais e em regiões de campos de óleo e gás. A falha normal F1 passa pelas linhas sísmicas, como pode ser verificado na Figura 1.2. Um dos objetivos deste trabalho é tentar mapear essa estrutura nos dados sísmicos.

1.1 Geologia regional

A Bacia do Recôncavo localiza-se no Estado da Bahia, Nordeste do Brasil. Está inserida numa grande bacia tafogênica – o sistema de riftes Recôncavo-Tucano-Jatobá, originado nos momentos iniciais de ruptura do paleocontinente Gondwana ocidental, no Eocretáceo (cerca de 144 Ma), sob os campos de tensões que produziram o Oceano Atlântico Sul ([Magnavita et al., 2005](#)).

Seus limites são representados pelo Alto de Aporá, a norte e noroeste; pelo sistema de Falhas da Barra, a sul; pela Falha de Maragogipe, a oeste; e pelo sistema de Falhas de Salvador, a leste ([Silva et al., 2007](#)). Na Figura 1.1 é ilustrado o mapa com os limites da Bacia do Recôncavo.

A arquitetura básica da bacia reflete as heterogeneidades do embasamento pré-cambriano sobre o qual atuaram esforços distensionais, resultando em um meio-gráben com orienta-

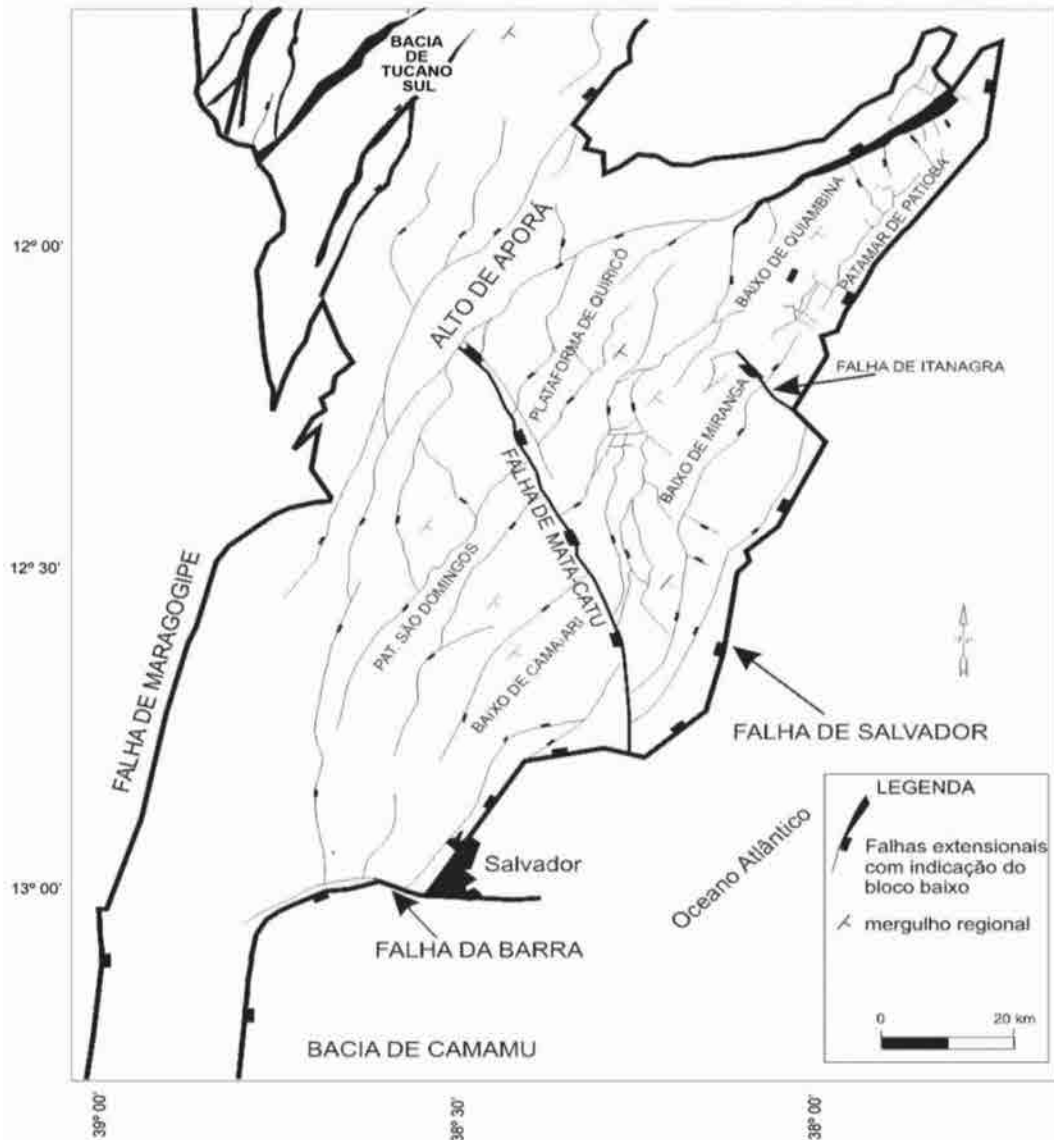


Figura 1.1: Mapa com os limites e principais estruturas da Bacia do Recôncavo. Fonte: [Silva \(2013\)](#).

ção geral NE-SW e falha de borda a leste (Sistema de Falhas de Salvador), com rejeito que excede os 6.000 metros no principal depocentro da Bacia do Recôncavo, o Baixo de Camaçari-Miranga ([Milhomem et al., 2003](#); [Magnavita et al., 2005](#)).

Segundo [Milhomem et al. \(2003\)](#), a configuração estrutural da Bacia do Recôncavo é definida principalmente por falhamentos normais planares, com direção preferencial N30°E, que condicionam o mergulho regional das camadas para SE, em direção às áreas mais subsidentes. Taxas de extensão diferenciadas ao longo da bacia são acomodadas através de zonas de transferência com orientação N40°W, a exemplo das Falhas de Mata-Catu e Itanagra-Araçás (Figura 1.2).

Além das falhas normais predominantemente de orientação NE-SW, falhas de alívio

atravessam a bacia, como o sistema de Falhas de Mata-Catu, segmentando-a em três porções: nordeste, central e sul. Assim como as falhas normais e de alívio, a sedimentação da bacia é também influenciada por diápiros de argila que provocam diversas falhas lístricas ao longo da seção rifte (Vilas Boas, 2016).

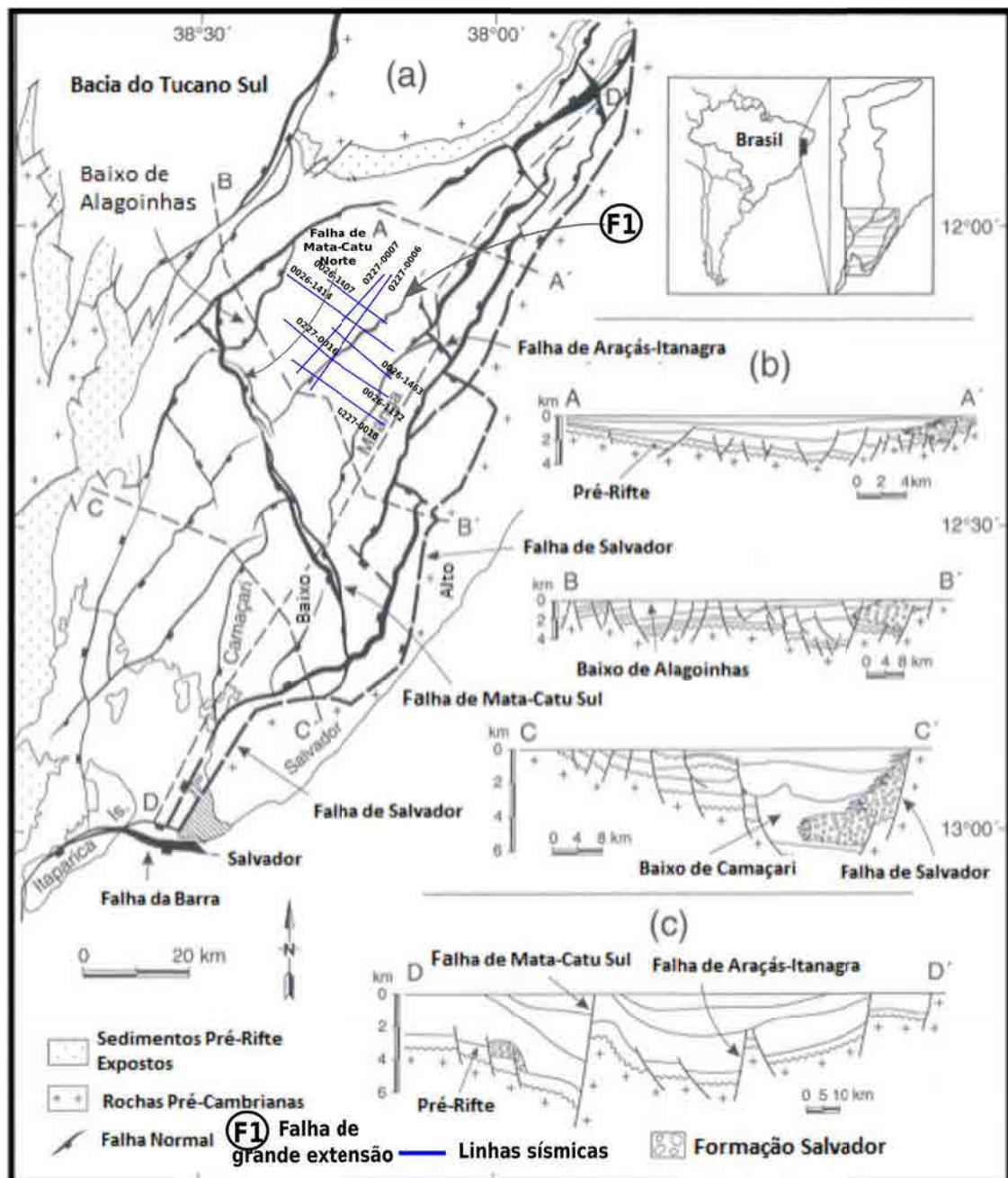


Figura 1.2: Mapa estrutural da Bacia do Recôncavo com as seções geológicas dos seus principais compartimentos e localização de dados sísmicos 2D adquiridos pela Petrobras. Fonte: Modificado de Destro et al. (2003).

Desenvolvido sobre o Cráton do São Francisco, o embasamento da bacia é composto predominantemente por gnaisses granulíticos arqueanos do Bloco Serrinha, a oeste e norte;

pelos cinturões Itabuna-Salvador-Curaçá, a oeste-sudeste; e Salvador-Esplanada, a leste-nordeste. Ao norte, ocorrem ainda rochas metassedimentares de idade neoproterozóica, relacionadas ao Grupo Estância (Silva et al., 2007).

1.2 Evolução tectono-sedimentar

As sequências sedimentares relacionadas ao preenchimento da Bacia do Recôncavo, propriamente dito, compreendem os depósitos acumulados durante o processo extensional juro-cretáceo e são caracterizadas pelos estágios pré-rifte, rifte e pós-rifte (Silva et al., 2007; Milhomem et al., 2003; Magnavita et al., 2005). A carta estratigráfica desta bacia, em Anexo, apresenta a sua evolução estratigráfica.

Segundo Silva et al. (2007), os sedimentos paleozóicos da fase sinéclise, representados pelos membros Pedrão e Cazumba da Formação Afligidos, se depositaram em um contexto de bacia intracratônica no Período Permiano. Depositadas sob paleoclima árido, as associações faciológicas que caracterizam estas unidades ilustram uma tendência geral regressiva, com transição de uma sedimentação marinha rasa, marginal, a sistemas lacustres (Aguiar e Mato (1990) apud Silva et al. (2007)). Arenitos com feições de retrabalhamento por onda, laminitos algais e evaporitos, principalmente anidrita, caracterizam o Membro Pedrão. No Membro Cazumba, predominam pelitos e lamitos vermelhos lacustres, com nódulos de anidrita na base da seção.

A fase pré-rifte ocorreu durante o Neojurássico e o Eocretáceo (Regali e Viana (1989); Arai et al. (1989) apud Magnavita et al. (2005)). Os sedimentos correspondentes, provavelmente, foram depositados além dos limites atuais da bacia, como indicam depósitos correlatos existentes em outras bacias brasileiras e ao longo do Oeste Africano (Magnavita et al., 2005). De acordo com Silva et al. (2007), a sucessão pré-rifte abrange rochas dos andares Dom João e Rio da Serra Inferior. Esta sedimentação pré-rifte engloba três grandes ciclos flúvio-eólicos, representados, da base para o topo, pelo Membro Boipeba da Formação Aliança e pelas formações Sergi e Água Grande. Intercalando estes ciclos houveram transgressões lacustres de caráter regional com sedimentação predominantemente pelítica caracterizadas pelo Membro Capianga (Formação Aliança) e Formação Itaparica.

O estabelecimento do rifte aconteceu durante o Berriasiano (há aproximadamente 144 Ma), e teve duração de aproximadamente 24 milhões de anos. Neste período acumularam-se estratos que constituem os andares Rio da Serra inferior ao Jiquiá, com unidades equivalentes nas bacias da margem Atlântica da América do Sul (Sergipe-Alagoas, Camamu e Almada) e da África (Gabão) (Magnavita et al., 2005).

O limite entre os estágios pré-rifte e sin-rifte tem sido objeto de discussão (Magnavita (1996); Da Silva (1996) apud Silva et al. (2007)). De acordo com Ghignone (1979) apud Silva et al. (2007), a configuração atual da Bacia do Recôncavo já se esboçava ao tempo de deposição da Formação Itaparica e mais notadamente da Formação Água Grande, sugerindo um incipiente controle tectônico. Da Silva (1993, 1996) apud Silva et al. (2007) atribui esta última unidade à fase rifte com o argumento de que a discordância erosiva que a separa da Formação Itaparica, na porção setentrional da bacia e na Sub-bacia do Tucano Sul, estaria relacionada a um rejuvenescimento de relevo, com basculamento para sul, testemunhando uma mudança de regime tectônico.

Por sua vez, Caixeta et al. (1994) e Magnavita (1996) apud Silva et al. (2007) relacionam o início do rifteamento à transgressão regional que sobrepõe os pelitos lacustres do Membro Tauá à fácies eólicas presentes no topo da Formação Água Grande. Esta transgressão estaria relacionada não apenas a uma provável umidificação climática, mas também a um incremento nas taxas de subsidência, com ruptura da crosta ainda sob atividade tectônica moderada.

Outra concepção relacionada a essa transição pré-rifte para início de rifte se refere ao aparecimento dos conglomerados sintectônicos durante o desenvolvimento da bacia do Recôncavo. Tradicionalmente, a fase de início do rifte era marcada no primeiro aparecimento da espessa cunha de conglomerados da Formação Salvador, a qual constitui parte do sistema de borda do rifte (Magnavita e Da Silva (1995) apud Magnavita et al. (2005)). Entretanto, a presença de conglomerados parece indicar apenas a existência de uma elevação topográfica ao longo da borda falhada (Magnavita (1996) apud Magnavita et al. (2005)). A deposição desses conglomerados tem início apenas no Mesorrio da Serra inicial (Berriasiano), estendendo-se até o Jiquiá (Neobarremiano/Eoaptiano). Esta defasagem entre o primeiro registro dos conglomerados de borda e o início do estágio rifte é considerada compatível com o tempo necessário para o soerguimento das ombreiras do rifte e sua posterior erosão para constituição de leques aluviais e fan deltas (Magnavita (1996) apud Silva et al. (2007)).

De acordo com Milhomem et al. (2003), a fase sin-rifte da Bacia do Recôncavo é caracterizada por um estágio inicial de lago profundo, progressivamente assoreado por estágios mais tardios. Durante essa fase, a bacia foi preenchida por dois sistemas progradantes, sendo o principal deles um sistema flúvio-deltaico-lacustre (longitudinal a oblíquo) proveniente da Bacia do Tucano, que depositou folhelhos prodeltaicos e arenitos turbidíticos; o secundário, transversal à bacia, consistiu em leques conglomeráticos derivados da erosão do bloco alto da falha de borda (Magnavita et al., 2005).

A atuação de um clima mais úmido somada à intensificação da atividade tectônica resultou numa fase inicial de incremento batimétrico e estruturação da bacia em áreas pla-

taformais pouco subsidentes, relativamente estáveis, e depocentros com elevadas taxas de subsidência (Milhomem et al., 2003). Neste contexto de bacia faminta, depositaram-se folhelhos lacustres, calcilutitos e arenitos turbidíticos do Membro Gomo (Formação Candeias), de idade Mesorrio da Serra (Eoberriasiano/Eovalanginiano) (Da Silva et al. (2000) apud Magnavita et al. (2005)). Ao longo do Neo-Rio da Serra (Eovalanginiano/Eohauteriviano), a atenuação da atividade tectônica e o incremento no aporte sedimentar resultaram na redução dos gradientes deposicionais, com o progressivo assoreamento dos depocentros. Neste processo, paleobatimetrias ainda relativamente elevadas mantiveram-se ao tempo de deposição da Formação Maracangalha acomodando um grande volume de depósitos relacionados a fluxos gravitacionais (Membros Pitanga e Caruaçu), depósitos estes relacionados à ressedimentação das fácies deltaicas que posteriormente progradariam ao longo da bacia (Formação Marfim), sob condições de relativa quiescência tectônica. A estruturação e o basculamento da bacia, associados a sobrecarga exercida pelos depósitos gravitacionais de idade Mesorrio da Serra e Neo-Rio da Serra (Berriasiano/Valanginiano), foi determinante para o início do processo e argilocinese e o desenvolvimento de falhamentos lítricos sindeposicionais. Estes últimos são feições de extrema importância nos depocentros da bacia, tendo atuado na distribuição e estruturação de reservatórios das formações Maracangalha, Marfim e Pojuca (Silva et al., 2007; Milhomem et al., 2003).

De acordo com Milhomem et al. (2003) e Magnavita et al. (2005), a diminuição da taxa de subsidência, baixos gradientes deposicionais e a iminente geometria de rampa da bacia, no período que inclui as idades Rio da Serra e Aratu, possibilitaram que sucessões cíclicas de fácies deltaicas progradassem de NNW sobre as plataformas existentes na margem flexural do rifte. Dessa forma, os depocentros foram progressivamente preenchidos com siltitos, folhelhos e ocasionais carbonatos do Grupo Ilhas, constituído pela Formação Marfim, Membro Catu e Formação Pojuca, enquanto os sítios deposicionais eminentemente lacustres representados pela Formação Maracangalha sofreram um recuo para sul. Pelitos e carbonatos lacustres relacionados ao afogamento recorrente do sistema deltaico possuem expressão comumente regional, constituindo importantes marcos estratigráficos (Milhomem et al., 2003).

No início do Mesoaratu (Neo-Hauteriviano), a reativação da Falha de Paranaguá, associada a um provável rebaixamento do nível de base sob controle climático, deu origem ao Cânion de Taquipe na porção oeste das bacias do Tucano Sul e Recôncavo (Caixeta et al. (1991) apud Silva et al. (2007)). Os sedimentos que o preencheram (Formação Taquipe) compreendem folhelhos, siltitos, arenitos e, subordinadamente, depósitos resultantes de fluxos de detritos e correntes de turbidez a partir da desestabilização das fácies de frente deltaica da Formação Pojuca e, eventualmente, da remobilização de sedimentos mais antigos, pertencentes às formações Marfim e Maracangalha (Amorim (1992) apud Milhomem et al.

(2003)).

A deposição das fácies fluviais da Formação São Sebastião caracteriza a fase final de assoreamento do rifte, que durante o Jiquiá esteve submetido a um novo ciclo tectônico, com a criação e a reativação de falhamentos (Aragão (1994) apud Silva et al. (2007)). Nesse estágio da bacia, as maiores taxas de subsidência são compensadas por elevadas taxas de aporte sedimentar, resultando em uma sucessão estratigráfica de caráter agradacional, com preservação de espessas seções fluviais. Os conglomerados sintectônicos da Formação Salvador (Silva et al., 2007; Milhomem et al., 2003) são uma feição conpíscua na borda leste da bacia durante toda a fase sin-rifte (andares Rio da Serra a Jiquiá).

Os depósitos cretáceos mais jovens preservados na bacia do Recôncavo são representados pelos clásticos grossos (conglomerados e arenitos), folhelhos e calcários que caracterizam os sistemas fluviais da Formação Marizal (idade Alagoas), depositados num contexto de subsidência termal pós-rifte, como indicado pela subhorizontalidade dos estratos, que se sobrepõem discordantemente a seções estruturadas, relacionadas à fase rifte (Silva et al., 2007; Milhomem et al., 2003). Segundo Magnavita et al. (2005), a discordância na base da Formação Marizal correlaciona-se com a discordância de ruptura continental *break up unconformity* que comumente precede a fase de deriva continental. Essa mesma superfície erosiva é reconhecida não apenas nas bacias da margem continental leste brasileira (Kiang et al. (1998) apud Magnavita et al. (2005)), como também nas suas correspondentes africanas (por exemplo, Bacia do Gabão, segundo Teisserenc e Villemín (1989) apud Magnavita et al. (2005)).

Não há unidades estratigráficas correspondentes ao intervalo temporal Mesoalbiano ao Eoceno preservadas na Bacia do Recôncavo. No período Neógeno uma ingressão marinha próxima à atual linha de costa depositou os folhelhos e calcários ricos em foraminíferos da Formação Sabiá do Mioceno (Petri (1972) apud Magnavita et al. (2005)). Sobrepostos a estes, cobrindo boa parte da porção sul do rifte, bem como em larga porção da costa brasileira, ocorrem os depósitos de leques aluviais pliocênicos do Grupo Barreiras (Magnavita et al., 2005).

1.3 Sistema petrolífero

Os principais reservatórios do Recôncavo são de natureza siliciclástica e envolvem fácies fluvio-eólicas (Membro Boipeba da Formação Aliança, formações Sergi e Água Grande), deltaicas (formações Marfim e Pojuca) ou vinculadas a fluxos gravitacionais (Membro Gomo da Formação Candeias e Membro Caruaçu da Formação Maracangalha). Folhelhos dos membros Tauá e Gomo da Formação Candeias representam os intervalos geradores da bacia (Milhomem et al., 2003).

Como modelos de migração e trapeamento, de acordo com Rostirolla (1997), têm-se: trapas estruturais formadas por horsts, basculados ou não, onde os reservatórios pré-rifte são alimentados lateralmente a partir de folhelhos geradores localizados nos baixos de falhas normais; trapas estratigráficas ou combinadas, principalmente em reservatórios turbidíticos das formações Candeias e Marfim, conectados diretamente aos folhelhos geradores, com migração por pequenas distâncias e *rollovers* formados em baixos de falhas de crescimento da seção sin-rifte, ao nível dos reservatórios deltaicos das formações Pojuca e Marfim, com migração vertical ao longo de falhas regionais. Os selos correspondem a folhelhos sobrepostos e intercalados.

O sistema petrolífero principal é o denominado Sergi/Água Grande-Candeias, responsável por 2,7 bilhões de barris, e correspondendo a 57% do volume provado da bacia (Figueiredo et al. (1994) apud (Destro, 2002)).

As linhas sísmicas do presente trabalho estão localizadas nas proximidades dos Campos de Araçás, a NE, e Miranga, a SW, como ilustrado na Figura 1.3. Observando o mapa, nota-se que a linha pré-empilhada (0227-0018) passa pelo Campo de Miranga e duas linhas pós-empilhadas (0026-1407 e 0227-0006) passam pelo Campo de Araçás.

Esses dois campos estão associados à Falha de Itanagra-Araçás, tendo se dado o desenvolvimento de diápiros de folhelho no Campo de Miranga devido ao controle indireto dessa falha.

1.4 Informações relacionadas ao rifteamento

Durante as décadas de 70 e 80 do século passado, diversos modelos geotectônicos de bacias rifte foram elaborados com o intuito de melhor compreender o contexto de desenvolvimento das mesmas. Apesar da evolução dos riftes seguir uma tendência deposicional, cada bacia rifte apresenta características diferenciadas e específicas de sua formação. Atualmente, é fato que bacias rifte se desenvolvem por meio das características principais de um ou outro

modelo (Kuchle, 2010).

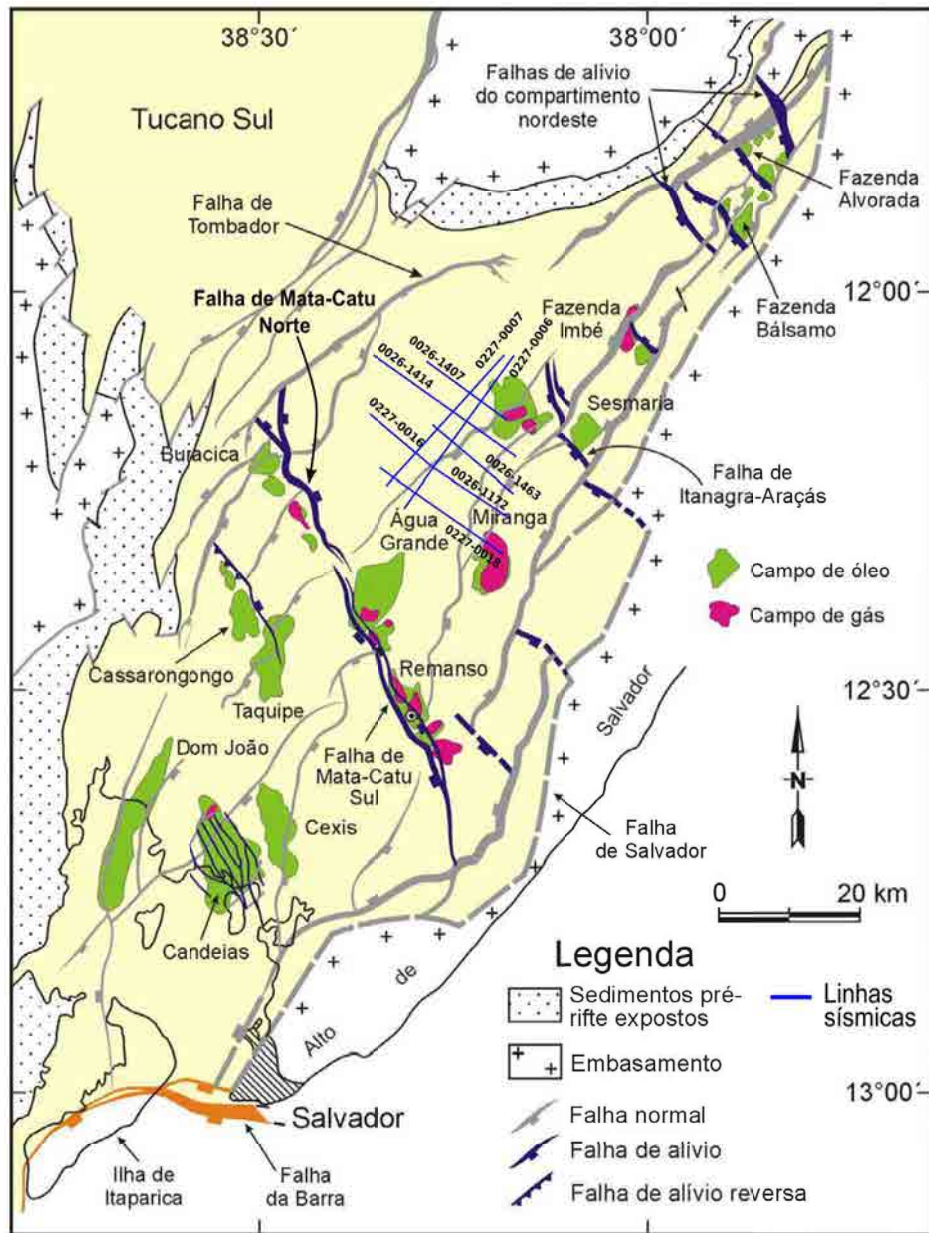


Figura 1.3: Mapa de distribuição dos campos de óleo e gás na Bacia do Recôncavo com a localização das linhas sísmicas utilizadas. Fonte: Modificado de Destro (2002).

Uma bacia rifte forma-se em um contexto tectônico de extensão, em que a crosta continental estira e afina até romper, formando depressões assimétricas e uma série de vales estruturados por falhas extensionais (Holz, 2012). Quando o rompimento se estabelece efetivamente, pode gerar uma bacia de margem passiva, ao abortar, preserva sua estruturação rifte. São bacias representadas como feições alongadas e, não raro, ramificadas, revelando-se como estruturas de alta complexidade geológica. As falhas normais extensionais que marcam este tipo de bacia se apresentam nas mais variadas disposições, sendo predominante traços

lísticos nas mesmas (Destro, 2002).

A atuação dos movimentos tectônicos extensivos resulta na configuração em forma de meio-grábens (ou semi-grábens), caracterizado por uma calha deposicional assimétrica. O semi-gráben é composto uma rampa de declive variável, correspondente à margem flexural, e uma falha de borda ou falha-mestra, de acordo com Davis (1984) apud Kuchle (2010), na porção mais profunda.

As falhas normais de maiores rejeitos permitem a seguinte classificação em blocos: o que se situa acima do plano de falha e apresenta movimento relativo descendente, ocorrendo subsidência, é definido como capa ou *hangingwall*, enquanto que o bloco com regime de soerguimento que se situa abaixo deste plano é a lapa ou *footwall*, no qual predomina o soerguimento ocasionado pela tectônica.

Outro fato é que esses meio-grábens vizinhos comumente possuem vergências opostas, com os mergulhos das falhas ora para um sentido, ora para outro (Figura 1.4), separadas por zonas de transferência ou de acomodação (Destro, 2002).

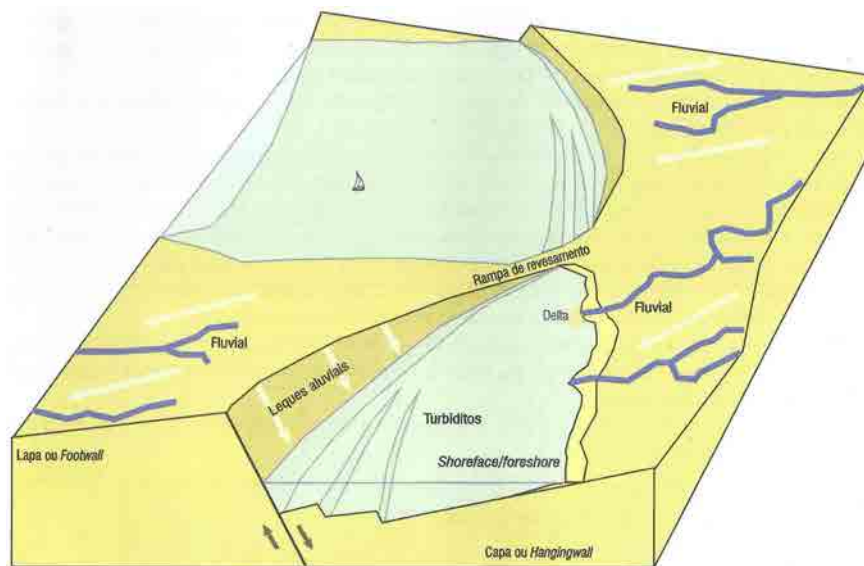


Figura 1.4: Bloco diagrama da estruturação do rifte. Falhas de vergências opostas são separadas por uma zona de acomodação Fonte: Holz (2012).

As estruturas geradas no desenvolvimento de um sistema de riftes, incluindo depressões e elevações topográficas, irão influenciar fortemente os sistemas deposicionais, demonstrando a importância da tectônica no preenchimento dessas bacias.

Acompanhando o arcabouço geral da bacia o compartimento central está estruturado pelos dois principais sistemas de falhamentos de direção NE-SW e NW-SE. A área estudada compreende as regiões do Baixo de Alagoinhas e do Baixo de Miranga.

Como pode ser visto na Figura 1.5, a Falha de Tombador limita a área de estudo a NW e a Falha de Mata-Catu Norte limita a SW. A falha de Itanagra-Araçás limita a área a NE.

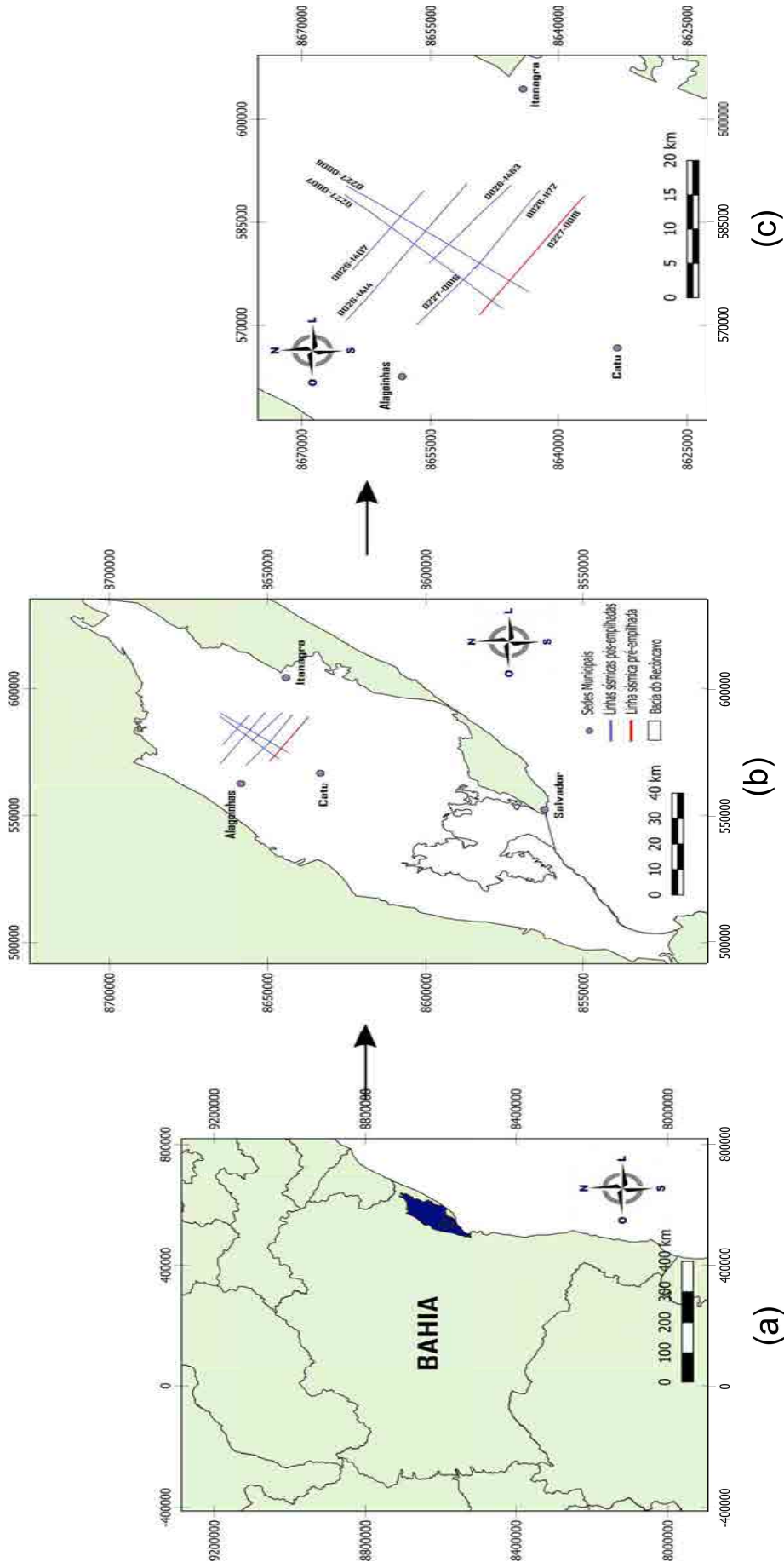


Figura 1.6: Mapas com a localização da Bacia do Recôncavo em (a), da área de estudo em (b) e de detalhes com os dados sísmicos 2D pré e pós-empilhados fornecidos pela ANP em (c).

Capítulo 2

Processamento sísmico

O processamento de dados sísmicos é uma tarefa que está presente no dia-a-dia na indústria de hidrocarbonetos. O objetivo e resultado final do processamento é a geração da seção empilhada ou de afastamento nulo, ou simplesmente seção sísmica. A seção sísmica é uma imagem representativa da subsuperfície que contém informações sobre a estruturação geológica na área investigada. Portanto, é de fundamental importância para interpretação sísmica que essa imagem tenha uma boa resolução para que o intérprete possa fazer com maior segurança as suas análises acerca da geologia da subsuperfície.

O fluxograma de processamento sísmico pode ser dividido em duas fases: pré-processamento e processamento avançado. Cada uma das fases é composto por uma série de etapas. A fase do pré-processamento consiste em um tratamento inicial dos dados originais registrados na aquisição (chamado normalmente de dado bruto) com técnicas simples, preparando esses dados para fase do processamento avançado, onde são empregadas técnicas mais sofisticadas para aumentar a razão sinal-ruído e que culmina na seção sísmica final migrada.

Não existe um fluxograma de processamento sísmico pré-definido, pois isso dependerá do tipo de dado sísmico (terrestre ou marinho) e o nível de ruído nos traços sísmicos, porém algumas etapas das duas fases do processamento são imprescindíveis, tais como: geometria, filtragem, organização de traços, análise de velocidades, correção do sobretempo normal ou *normal moveout* (NMO), empilhamento e migração.

Neste capítulo são descritas de forma objetiva as principais etapas que compõem o fluxograma do processamento sísmico realizado na linha sísmica de reflexão 0227-0018, localizada na porção central da Bacia do Recôncavo (ver Figura 1.6 do capítulo 1). Também são apresentados os resultados obtidos nas etapas. Foi adotado para o processamento o *software* comercial *Seispace* desenvolvido pela empresa Haliburton e o pacote *Seismic Unix* da Colorado School of Mines (CWP). Na etapa de filtragem foi empregado o algoritmo desenvolvido no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG) com o método de decomposição

em valores singulares para um traço sísmico, denominado de filtragem SVD no domínio $t\tau$ ou ST-SVD (*Single Trace SVD*). A Figura 2.1 ilustra o fluxograma construído para o processamento da linha sísmica de reflexão 0227-0018.

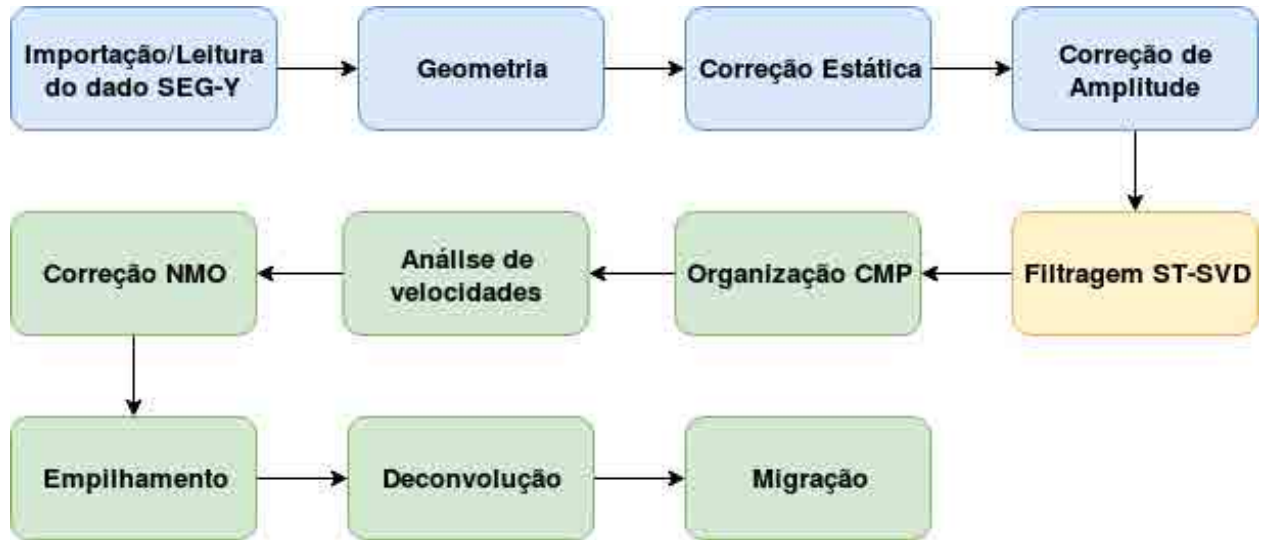


Figura 2.1: Fluxograma do processamento sísmico realizado na linha sísmica de reflexão 0227-0018 localizada na porção central da Bacia do Recôncavo.

2.1 Pré-processamento

Essa fase comporta um conjunto de etapas iniciais do processamento sísmico, onde são usadas as informações de aquisição dos dados, visualizados os sismogramas registrados (geralmente em famílias de tiro comum) e avaliados os traços conforme o seu nível de ruído. Um problema enfrentado nessa fase são os efeitos existentes no registro sísmico devido às irregularidades do terreno e da existência da zona de baixa velocidade (ZBV) na área de aquisição. Uma importante tarefa nessa fase é a correção das amplitudes do traço sísmico causadas por alguns fenômenos (por exemplo, divergência esférica, absorção, múltiplas, etc) que normalmente ocorrem durante a propagação da onda sísmica em subsuperfície. Portanto, as etapas dessa fase são extremamente importantes para o prosseguimento e sucesso do processamento avançado, pois incluem correções e atenuações de ruídos no traço sísmico.

2.1.1 Leitura do dado

Os dados sísmicos adquiridos numa aquisição são gravados em arquivos digitais, que geralmente seguem um dos formatos criados pelo comitê de padrões técnicos da SEG (*Society Exploration Geophysics*). O formato de dados sísmicos mais comumente usado é o formato

padrão SEG-Y, que foi definido originalmente em 1973 para o registro digital de dados sísmicos de reflexão.

O formato SEG-Y possui um cabeçalho (*header*) com 240 bytes para cada traço sísmico, onde ficam gravadas importantes informações acerca da aquisição, tais como: número dos disparos ou tiros, número do receptor, intervalo de amostragem, número de amostras em cada traço sísmico. Outras informações são gravadas durante o processamento, grande parte na etapa de geometria.

A linha sísmica de reflexão processada neste trabalho é a 0227-0018 (ver Figura 1.6 do capítulo 1), que foi adquirida junto a ANP e que faz parte do acervo de dados sísmicos do sub-projeto do INCT-GP (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo), denominado GASBRAS que está sendo desenvolvido no CPGG/UFBA. O arquivo com os dados sísmicos dessa linha estava no formato SEG-Y e foi necessário convertê-lo para o formato interno do *software SeisSpace*, chamado (*dataset*). Para isso, foi montado um fluxo de importação de dados com o uso do módulo **SEG-Y input**. Esse módulo tem a função de acessar todas as informações existentes no cabeçalho do arquivo SEG-Y importado.

Uma vez convertido o arquivo SEG-Y para o formato do *dataset*, para a próxima etapa do processamento será essencial a coleta de informações sobre a aquisição sísmica.

2.1.2 Geometria

É uma das etapas mais importantes do pré-processamento uma vez que informações erroneamente definidas ou calculadas irão comprometer outras etapas do processamento sísmico. Quando erros ocorrem nessa etapa, devem ser imediatamente corrigidos para que se possa continuar com o fluxograma de processamento.

O objetivo básico dessa etapa é a amarração de cada traço sísmico com a coordenada real da fonte geradora da onda sísmica e do receptor que o registrou, o cálculo da distância de afastamento e a coordenada do ponto médio comum (CMP - *Common Mid Point*) de cada par de fonte e receptor. Todas essas e outras informações da geometria são gravadas no chamado *header* ou cabeçalho do traço sísmico. Especificamente, todas as informações são gravadas nas chamadas *keys* ou chaves do cabeçalho, que ocupam os 240 *bytes* antes da primeira amostra de cada traço sísmico. É importante salientar que normalmente os registros obtidos na aquisição são geralmente sismogramas de tiro ou famílias de tiro comum e que apenas depois da geometria ser montada corretamente, se pode fazer com segurança a reorganização dos dados em outras famílias de traço comum (isso é necessário em algumas etapas do processamento). A Figura 2.2 ilustra as opções de reorganização dos traços sísmicos.

Na etapa de geometria são utilizadas as informações contidas no relatório de campo ou observador. Geralmente o relatório de campo é fornecido com arquivos de coordenadas

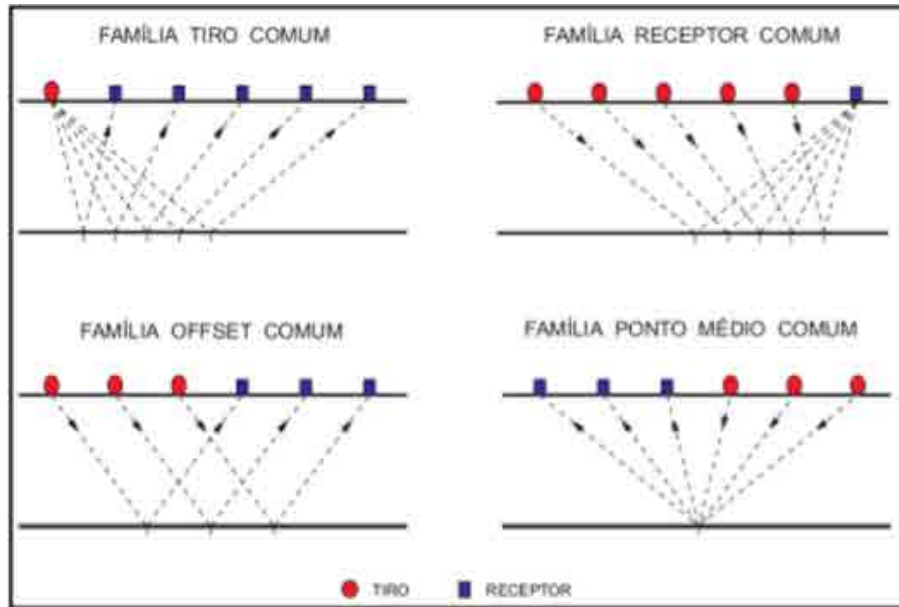


Figura 2.2: Opções de reorganização dos traços sísmicos em famílias de traço comum.

Fonte: [Silva \(2004\)](#)

UTM ([Vieira, 2018](#)). No relatório de campo estão descritas e detalhadas todos os parâmetros, operações e observações anotadas pelo responsável pela aquisição sísmica em campo. As informações mais importantes e/ou essenciais da aquisição sísmica para montagem da geometria são: o tipo de arranjo, o número do registro de campo ou tiro, número de receptores do cabo, a localização geográfica das estações de fontes e receptores (normalmente em coordenadas no sistema UTM), a distância entre receptores e entre tiros, grau de cobertura e localização de pontos de tiro perdidos e de receptores (devido a defeito ou teste dos equipamentos de aquisição ou ainda por causa de obstáculos existentes na rota do levantamento).

Nesse trabalho, após a conversão do arquivo sísmico SEG-Y para o formato compatível com o *software*, foi feito a leitura do relatório de campo para compreensão e verificação dos parâmetros usados na aquisição da linha sísmica 0227-0018. A tabela 2.1 traz os principais parâmetros de aquisição da linha processada.

Essas informações, quando inseridas corretamente, permitem o agrupamento dos traços em famílias CMP (*Common Mid Point*).

No presente trabalho, a geometria foi realizada no *software SeisSpace*. A montagem da geometria é feita executando-se o módulo *2D Land Geometry Spreadsheet* para ativar o painel principal que contém um menu de escolha, com as seguintes opções: *Setup*; *Receivers*; *Sources*; *Patterns*; *Bin*; *TraceQC*. Cada uma das opções possui uma tabela que deve ser preenchida com informações, de acordo com os parâmetros da aquisição da linha sísmica a ser processada.

DESCRIÇÃO	PARÂMETRO
Arranjo	En-don
Lanço	0-50-4800m
Extensão	21,5 Km
Número de tiros	387
Número de receptores	96
Tempo de registro	4 s
Razão de amostragem	2 ms
Distância entre geofones	50 m
Distância entre pontos de tiros	50 m
Grau de cobertura	48

Tabela 2.1: Principais parâmetros empregados na aquisição da linha sísmica de reflexão 0227-0018 da Bacia do Recôncavo.

Para montagem da geometria da linha 0227-0018 foi necessário preencher as seguintes tabelas:

- Tabela *Geometry Setup* da opção *Setup*

Corresponde à janela de diálogo de configurações da geometria onde se especifica alguns parâmetros da aquisição, tais como: distância entre pontos de tiros, distância entre receptores, azimuth, primeira e última estações vivas e unidade de medida a ser usada (Souza, 2014).

- Tabela *SRF* da opção *Receivers*

Nessa tabela são inseridas as informações sobre as estações receptoras usadas na aquisição dos dados, tais como: número da estação, coordenadas (U.T.M.) e elevação do terreno.

- Tabela *SIN* da opção *Source*

Nessa tabela são inseridas as informações sobre o posicionamento dos tiros em relação ao cabo de receptores, ou seja, a estação das fontes de tiro e suas coordenadas UTM, o número do registro de campo, elevação do terreno da estação das fontes, o número de receptores usado em cada tiro, o número das estações do primeiro e último receptor/canal ativo em cada tiro registrado e o código para identificar o padrão de arranjo usado em cada tiro.

- Tabela *PAT Order Parameter File* da opção *Pattern*

Essa tabela é usada para fazer a amarração dos receptores do cabo às estações de acordo com o tipo padrão de arranjo usado na aquisição.

- Tabela *2D Land Binning* da opção *Binning*

Essa é a última etapa na montagem da geometria e é chamada de binagem ou *Binning* onde são efetuados o cálculo das posições dos CMPs e dos afastamentos entre fonte-receptor com o uso de todas as informações inseridas nas tabelas anteriores. Os traços sísmicos são distribuídos por diversas celas, em função das coordenadas do CMP. Trata-se de uma malha, em que cada cela deve contemplar apenas um ponto médio para que as informações da geometria sejam corretamente atribuídas ao *header* dos dados (Souza, 2014).

Ao final da etapa de Geometria, todas as informações definidas e calculadas são gravadas no *header* de cada traço e tem-se a possibilidade de organizar os dados em famílias de traço comum (ver Figura 2.2). Isso foi feito com a execução do módulo *Inline Geometry Header Load*.

A Figura 2.3 ilustra o resultado da gravação da geometria no *header* dos dados. Pode ser verificado que os valores de *offset* só estão definidos para o sismograma com geometria.

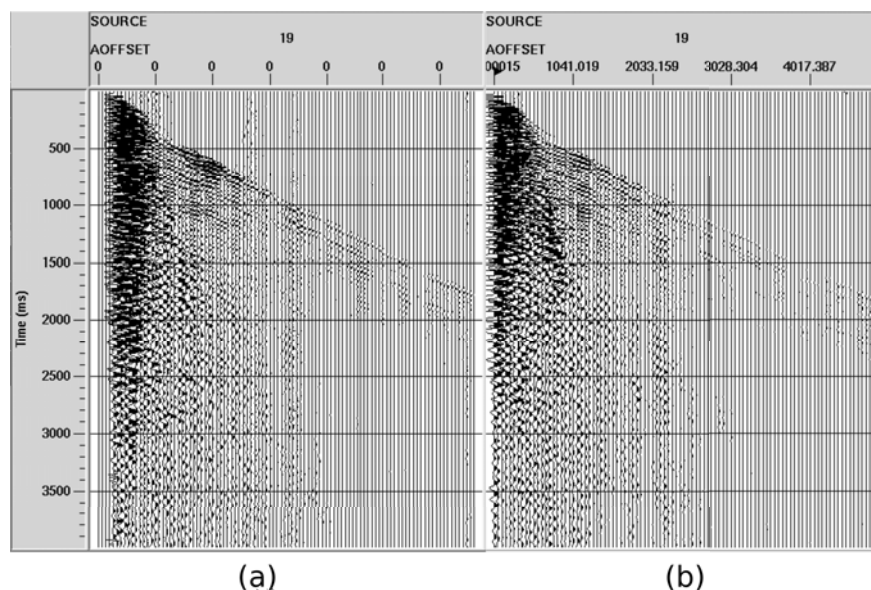


Figura 2.3: Sismograma de tiro original em (a) e após a definição da geometria em (b)

2.1.3 Correção estática

A correção estática é um deslocamento nos tempos de chegada das reflexões aplicado a cada traço para corrigir atrasos ou antecipações. Estes deslocamentos ocorrem em decor-

rência de variações topográficas da superfície terrestre e da zona intemperizada, denominada Zona de Baixa Velocidade (ZBV), a qual possui baixa velocidade de propagação das ondas sísmicas, inferior a 1500 m/s. Essa baixa velocidade se deve pelo fato de o pacote litológico que constitui a ZBV estar submetido aos intemperismos físico (fragmentação mecânica) e químico (alteração mineralógica). As ondas elásticas, ao percorrê-la, têm velocidade baixa e sofrem atenuações, ou seja, a ZBV é um meio dispersivo e influencia negativamente a qualidade do dado sísmico.

Na Figura 2.4 tem-se um exemplo dos efeitos da topografia e da ZBV separadamente em uma seção sísmica. Para isso, considerou três situações distintas de um levantamento com afastamento nulo feito sobre um modelo geológico com um refletor horizontal em sub-superfície.

A Figura 2.4A mostra o efeito apenas da topografia numa seção *zero-offset*, supondo-se um modelo geológico sem efeitos da ZBV, composto por uma camada homogênea de base plana e superfície irregular. Para se observar apenas o efeito das variações da espessura da ZBV, considera-se que os levantamentos realizados nas duas situações (Figuras 2.4B e C) foram feitos sobre uma superfície horizontal, ou seja, sem efeitos da topografia. Nos dois modelos geológicos tem-se a presença de uma ZBV de velocidade constante e espessura variável, logo, os atrasos dos tempos de trânsito que causam deformações na estrutura do refletor serão apenas devido à variação da espessura ao longo da ZBV (Souza, 2016).

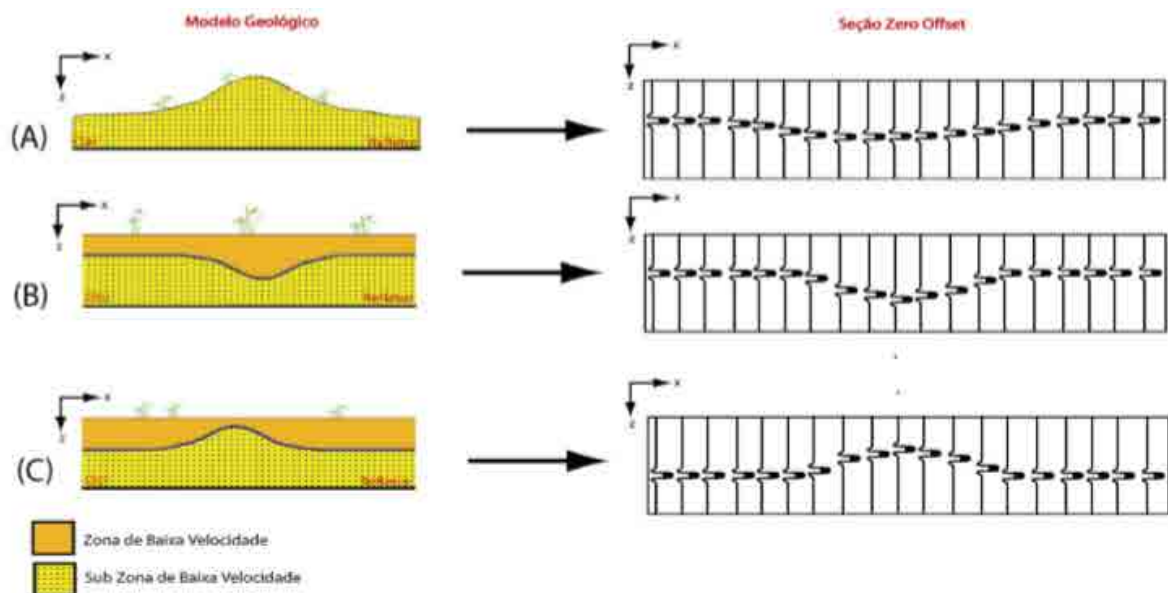


Figura 2.4: Efeitos da topografia e ZBV na seção de afastamento nulo, para um refletor horizontal em subsuperfície. Fonte: Souza (2016)

No *software SeisSpace* a correção estática é realizada mediante três etapas, quais sejam:

1. **Picking de primeiras quebras:** marcação traço a traço dos tempos correspondentes às primeiras quebras (onda direta, nos *offsets* menores; onda refratada, nos *offsetes* maiores), os quais guardam informações sobre a ZBV. Utilizou-se o módulo *First Break Picking*, o qual marca automaticamente as primeiras quebras de cada traço através de redes neurais, seguido de ajuste manual, a fim de aprimorar o resultado. De acordo com Souza (2014), as etapas realizadas para esta picagem automática são as seguintes:

- Definição de uma janela em tempo que contemple os primeiros registros do sismograma, limitando uma faixa de tempo de atuação do programa, com o objetivo de auxiliar o *software* durante o mapeamento automático das primeiras quebras.
- Treinamento da rede neural para estabelecimento de um padrão que identifique o evento das primeiras quebras na análise estática que busca traço a traço as primeiras quebras.
- *Picking* automático dos tempos das primeiras quebras de todos os traços dos sismogramas.
- Edição manual dos *picking* visto que, devido aos ruídos presentes nos dados sísmicos, os resultados obtidos através do módulo *First Break Picking* para os *picking* automáticos não são satisfatórios para a maior parte do dado, fazendo-se necessário uma intervenção manual para a correção dos pontos em que o módulo automático não obteve resultados satisfatórios.

A figura 2.5 mostra a definição da janela para treinamento da rede neural e a figura 2.6 mostra a picagem automática de um registro.

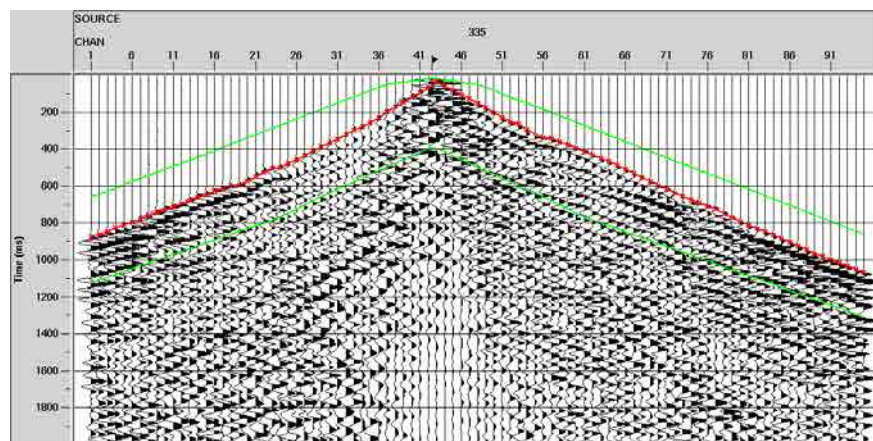


Figura 2.5: Definição da janela em tempo para treinamento da rede neural.

2. **Cálculo da correção estática:** computa a velocidade e o *delay* temporal do refrator causados pela topografia e pela ZBV. Esta etapa é feita através do módulo *Refraction*

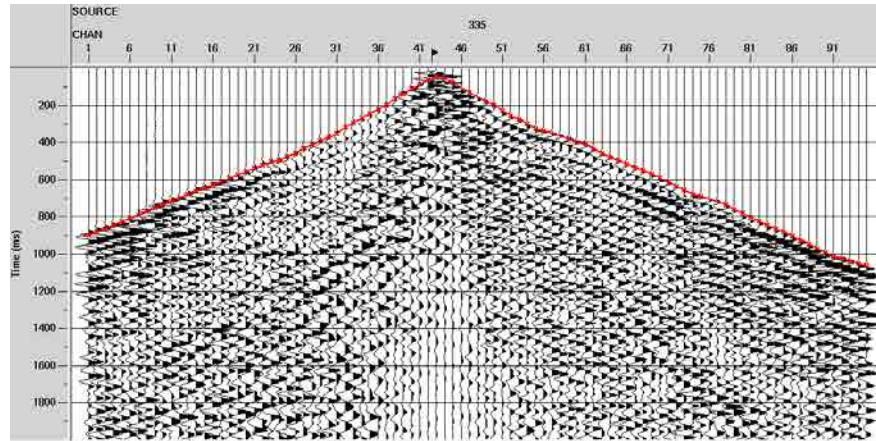


Figura 2.6: *Picking* automático das primeiras quebras.

Statics Calculation, o qual também calcula a profundidade do modelo e os tempos de correção estática das fontes e dos receptores. Os parâmetros utilizados por esse módulo são mostrados na figura 2.7.

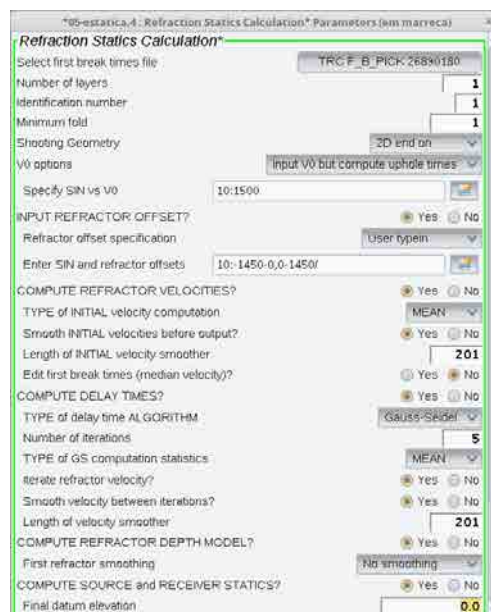


Figura 2.7: Parâmetros da ferramenta *Refraction Statics Calculation*.

3. **Aplicação da correção estática:** foi utilizado o módulo *Apply Refraction Statics* para aplicação da correção estática. Esta ferramenta calcula a estática do datum flutuante e final para cada traço. A velocidade de reposição escolhida foi de 2400 m/s.

A figura 2.8 mostra o sismograma do tiro 347 antes e após a aplicação da correção estática. É nítido que após a correção estática os eventos de reflexão ficaram mais definidos na sua forma hiperbólica, outro detalhe são eventos da onda direta que ficaram muito mais lineares após a correção.

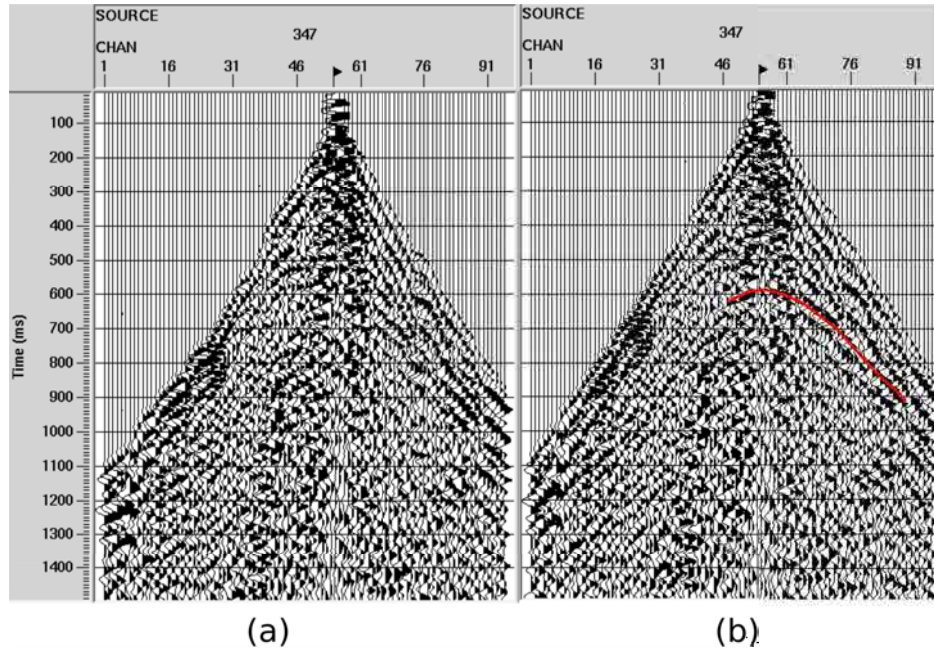


Figura 2.8: Sismograma de tiro com geometria em (a) e após aplicação da correção estática em (b).

2.1.4 Correção de amplitude

Alguns sismogramas são mais difíceis de serem visualizados devido a perda de energia que a onda sofre ao se propagar no meio geológico devido a diversas razões. Os mecanismos físicos envolvidos na perda de energia podem ser: divergência esférica, absorção, perdas por transmissão, reflexões de múltiplas e curvatura da superfície do refletor, sendo os três primeiros os que mais afetam o sinal sísmico.

O espalhamento geométrico ou divergência esférica está relacionada ao decaimento da amplitude pelo espalhamento da frente de onda sísmica durante sua propagação em subsuperfície [Silva \(2004\)](#). O objetivo desta subetapa é então tentar fazer com que a amplitude se aproxime o máximo possível da amplitude inicial da onda (momento em que esta parte da fonte).

A recuperação das amplitudes perdidas referentes à divergência esférica foi feita utilizando-se o módulo *True Amplitude Recovery*, a qual utiliza um campo de velocidades, mostrada na Figura 2.9. Observa-se nessa figura que houve uma equalização das amplitudes dos traços após a correção, sendo recuperadas as amplitudes nos tempos mais altos de registro.

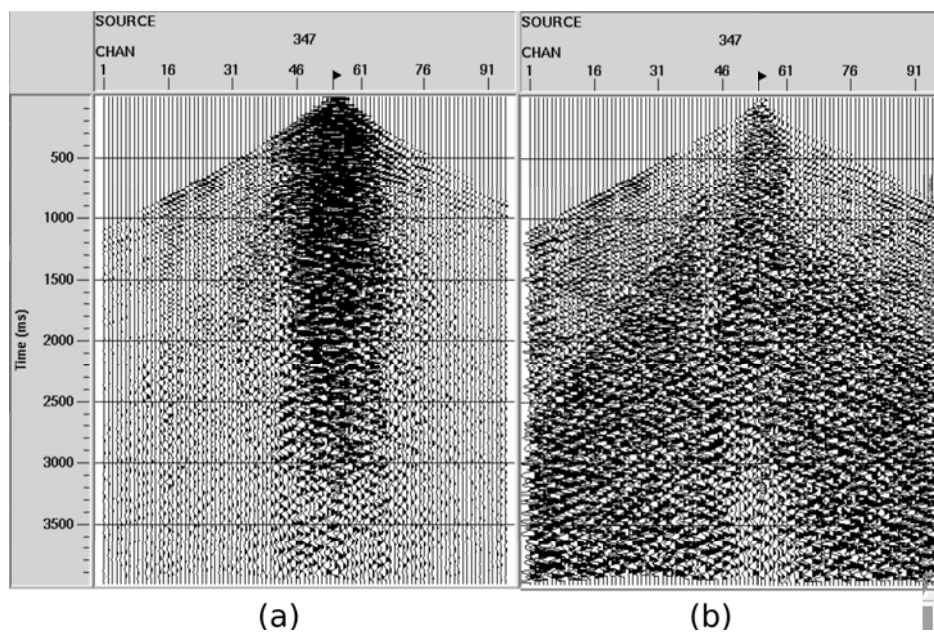


Figura 2.9: Sismograma de tiro após a correção estática em (a) e após a com correção de amplitude em (b).

2.2 Processamento avançado

Nesta fase encontram-se etapas complexas, as quais utilizam técnicas mais sofisticadas para o tratamento do sinal sísmico e de correção dos dados.

Um problema existente nos dados da linha sísmica 0227-0018 processada é a presença do ruído coerente devido a onda superficial Rayleigh. Esse ruído prejudica bastante qualquer processamento de dados sísmicos terrestres, pois mascara o sinal das reflexões nos sismogramas ao longo de muitos afastamentos. É necessário tratar eficazmente esse ruído, pois seus efeitos são prejudiciais às etapas de análise de velocidades, correção NMO e empilhamento.

Nesse trabalho, um dos focos do processamento sísmico da linha 0227-0018 foi a atenuação do *groundroll* para aumentar a razão sinal-ruído. Outras etapas importantes foram feitas: a análise de velocidades para estimar as velocidades em subsuperfície, a correção NMO para remover o sobretempo nos CMPs, o empilhamento e a migração para gerar a seção sísmica final.

2.2.1 Filtragem SVD

A decomposição de uma matriz em valores singulares é uma técnica muito útil no processamento de dados sísmicos pois permite a separação entre eventos correlacionáveis (reflexões) e eventos não correlacionáveis (ruídos, tais como o *groundroll*). A atenuação do *groundroll* foi o principal objetivo de utilização deste método de filtragem.

Normalmente a filtragem SVD (do inglês, *Singular Value Decomposition*) é aplicada no domínio do tempo e espaço, explorando a correlação espacial entre um conjunto de traços sísmicos. Neste trabalho inclui-se a variável de deslocamento temporal τ , a qual permite explorar a correlação temporal entre eventos refletidos ao longo de cada traço sísmico. Com isso, pode-se decompor cada traço sísmico individualmente em bandas de frequência, tendo por base a coerência temporal.

Filtragem SVD no domínio $t - x$

Um subconjunto de N traços sísmicos com M amostras no tempo, pode ser representado por $d(t, x_j)$, onde $t = 1, \dots, M$ e $j = 1, \dots, N$ (Silva, 2015). A matriz desses dados pode ser definida por

$$\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1 \dots \mathbf{d}_N] = \{d(t, x_1), \dots, d(t, x_N)\}, \quad (2.1)$$

onde \mathbf{d}_1 e \mathbf{d}_N , representam o primeiro e último traço, respectivamente.

A decomposição da matriz \mathbf{D} em valores singulares pode ser escrita da seguinte forma

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T, \quad (2.2)$$

onde:

- $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}\{\sigma_1, \dots, \sigma_N\}$ é a matriz $N \times N$ dos autovalores $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N \geq 0$,
- $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_N]$ é a matriz $M \times N$ dos autovetores de cada traço associada à dimensão do tempo, e
- $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N]$ é a matriz $N \times N$ dos autovetores de cada traço associada à dimensão do espaço.

Outra maneira de escrever a equação (2.2) é

$$\mathbf{D} = \sum_{k=1}^r \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T = \sum_{k=1}^r \tilde{\mathbf{D}}_k, \quad (2.3)$$

onde r é o posto da matriz \mathbf{D} , σ_k é o k -ésimo valor singular de \mathbf{D} , \mathbf{u}_k é o k -ésimo autovetor de $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$ e \mathbf{v}_k é o k -ésimo autovetor $\mathbf{D}^T\mathbf{D}$.

De acordo com a equação (2.3), a matriz \mathbf{D} pode ser vista como uma soma de matrizes de posto unitário, ponderadas pelos seus respectivos valores singulares (Silva, 2015). Cada produto escalar externo $\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$ define uma matriz de posto unitário, definida como autoimagem de \mathbf{D} . Portanto, $\tilde{\mathbf{D}}_k = \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$ é a k -ésima autoimagem da matriz de dados \mathbf{D} (Figura 2.10).

O fato que justifica utilizar o método SVD como um filtro para os dados sísmicos é que o ruído e o sinal ocupam bandas diferentes de autoimagens, dessa forma selecionando as autoimagens devidamente pode-se atenuar ruídos, mas preservando as reflexões (Freire, 1986).

Os primeiros autovalores possuem maiores valores singulares, de modo que as autoimagens associadas irão preservar a porção de maior grau de correlação ou coerência entre traços. Quanto menor o posto da matriz de dados sísmicos \mathbf{D} , maior será a correlação entre os traços, e a informação ou energia coerente estará concentrada nas primeiras autoimagens. Dessa forma, preservam-se eventos horizontais e sub-horizontais, e atenuam-se os eventos mais verticais, tal como o *groundroll*. Quando o sinal sísmico apresenta coerência entre traços, as primeiras autoimagens irão conter o sinal coerente de interesse, enquanto nas últimas autoimagens irão predominar o ruído ou a porção mais incoerente dos dados (Silva, 2015).

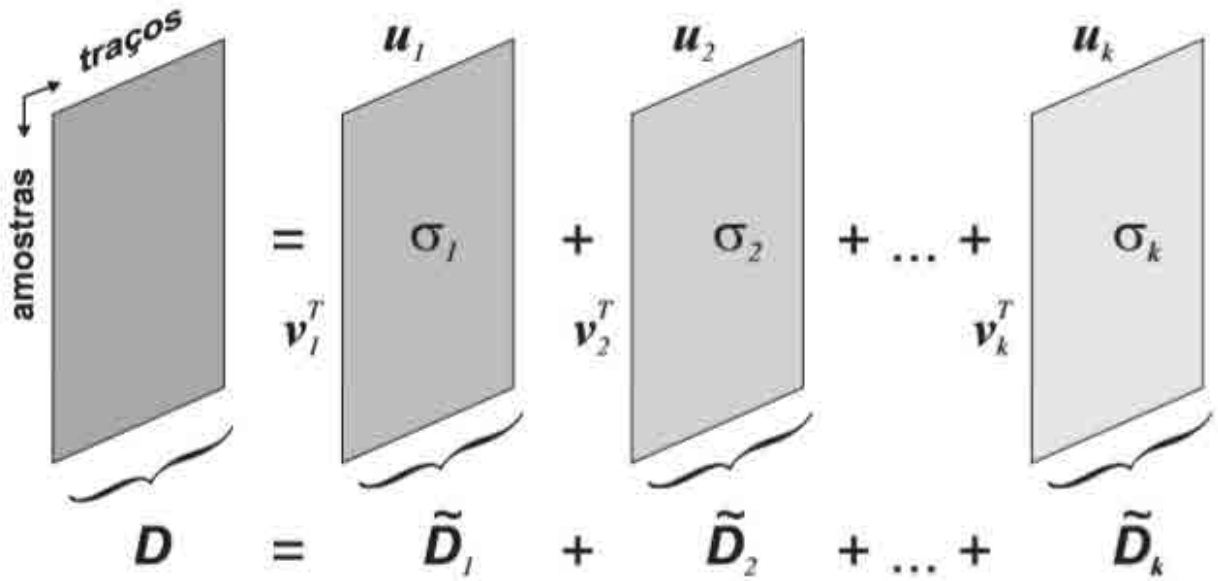


Figura 2.10: Representação esquemática da SVD de uma matriz de dados \mathbf{D} e suas autoimagens. Fonte: [Silva \(2015\)](#)

Filtragem SVD no domínio $t\tau$ do traço sísmico ou filtragem ST-SVD

Considerando uma matriz \mathbf{D}_N formada pelo traço sísmico representado pelo vetor $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_M)^T$ deslocado como representado na expressão:

$$\mathbf{D}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{d} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{d} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{d} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Este método de filtragem faz a decomposição em valores singulares no domínio $t\tau$, sendo a variável τ associada ao deslocamento do traço ($\tau = 0, \dots, N - 1$), e a matriz \mathbf{D}_N possui dimensões, $(M + N - 1) \times N$. Utilizando a decomposição SVD, pode-se representar a matriz dos dados em termos de autoimagens no domínio $t\tau$ ([Silva, 2015](#)) (Figura 2.11).

$$\mathbf{D}_N = \sum_{\tau=0}^{N-1} \sigma_{\tau} \mathbf{u}_{\tau} \mathbf{v}_{\tau}^T = \sum_{\tau=0}^{N-1} \tilde{\mathbf{D}}_{N\tau}, \quad (2.5)$$

onde $\tilde{\mathbf{D}}_{N\tau} = \sigma_{\tau} \mathbf{u}_{\tau} \mathbf{v}_{\tau}^T$ representa a autoimagem de índice τ associadas ao domínio $t\tau$.

Define-se o operador $\mathbf{J}\{\cdot\}$, tal que, aplicado à matriz \mathbf{D}_N corrige os deslocamentos do traço, soma, e faz a média, restituindo assim, o sinal original:

$$\mathbf{J}\{\mathbf{D}_N\} = \mathbf{d}. \quad (2.6)$$

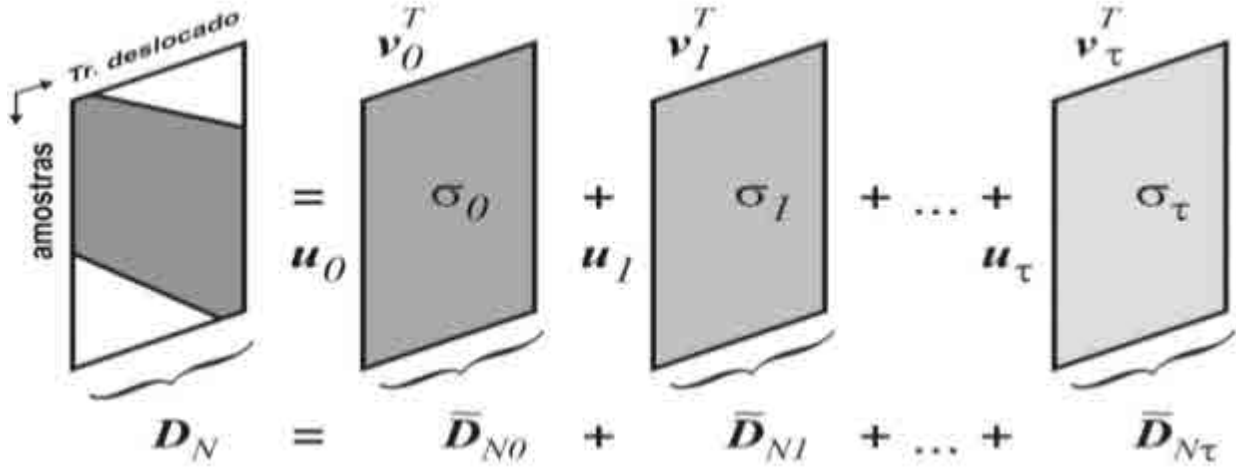


Figura 2.11: Matriz \mathbf{D}_N com traço original deslocado e suas autoimagens. Fonte: [Silva \(2015\)](#)

Considerando a decomposição SVD representada pela equação acima e utilizando o operador $\mathbf{J}\{\cdot\}$, pode-se representar o traço sísmico em termos de N componentes no domínio $t\tau$:

$$\mathbf{J}\{\mathbf{D}_N\} = \sum_{\tau=0}^{N-1} \mathbf{J}\{\tilde{\mathbf{D}}_{N\tau}\} = \sum_{\tau=0}^{N-1} \tilde{\mathbf{d}}_{N\tau} = \mathbf{d}. \quad (2.7)$$

A Figura 2.12 ilustra a decomposição de um traço sísmico no domínio $t\tau$, utilizando $N = 5$. Os traços representados em (a), (b), até (e), representam as componentes para valores de τ , variando de 0 a 4s, respectivamente. A soma das componentes em (f) e o traço sísmico original em (g).

O algoritmo ST-SVD utilizado neste trabalho foi desenvolvido por [Silva \(2015\)](#) e tem por objetivo utilizar a decomposição SVD em um procedimento recursivo para retirar do sinal sísmico a componente mais determinística. São geradas as componentes de mais alta e baixa frequência, de forma que é possível selecionar a banda desejada dos dados, ou seja, a que está livre de ruídos.

O método de filtragem ST-SVD foi aplicado aos dados da linha sísmica 0227-0018 após as amplitudes dos traços serem corrigidos, com o objetivo de atenuar o ruído denominado groundroll e com isso aumentar a razão sinal-ruído dos dados para as próximas etapas do processamento.

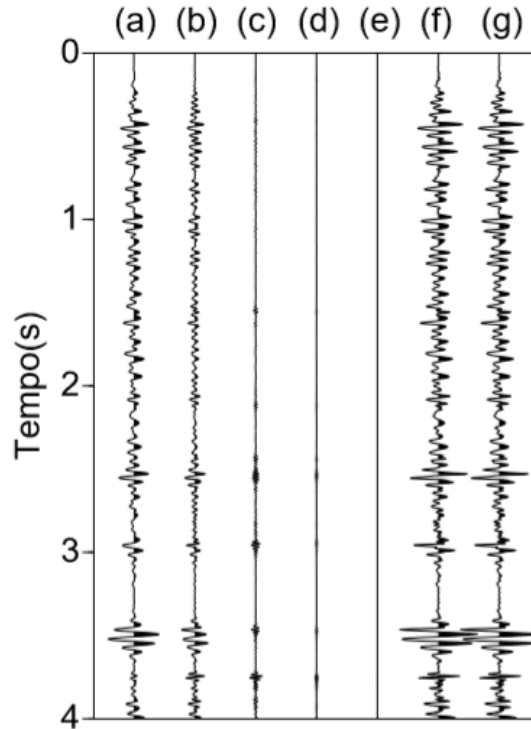


Figura 2.12: Decomposição SVD de ordem $N = 5$ do traço sísmico. Componentes de baixa para alta frequências representadas pelos traços: (a), (b), (c), (d), (e). Soma das componentes em (f) traço sísmico original em (g). Fonte: [Silva \(2015\)](#)

O *groundroll* ou ruído de rolamento superficial é um ruído coerente comumente presente em dados sísmicos terrestres. Está associado ao percurso das ondas superficiais do tipo *rayleigh* na zona de baixa velocidade e são caracterizados nos sismogramas por um padrão linear com elevada amplitude, baixa frequência e baixa velocidade. De acordo com [Telford et al. \(1976\)](#), a velocidade de propagação das ondas *rayleigh* está na faixa de 100 a 1000 m/s e a frequência do *ground roll* inferior a dos eventos de refração e reflexão, por volta de 10Hz.

O *ground roll* camufla boa parte das reflexões e sua atenuação se torna imprescindível para aumentar a razão sinal-ruído de dados sísmicos terrestres.

As Figuras 2.13 e 2.14 apresentam os resultados obtidos após a aplicação do método em dois sismogramas tiro. Foram feitas 11 recursões na filtragem ST-SVD.

Observando as Figuras 2.13 e 2.14 é notório que os eventos de interesse, no caso, as reflexões, estão bastante nítidas, ou seja, foram evidenciadas, enquanto que o *groundroll* quase que totalmente foi concentrado no sismograma da componente de baixa frequência. Claramente, na Figura 2.13, pode ser percebido que os eventos localizados entre a janela de tempo entre 200-2200ms possuem mais continuidade ao longo da hipérbole de reflexão, o mesmo acontece nos eventos localizados na janela de tempo entre 200-1400ms da Figura 2.14.

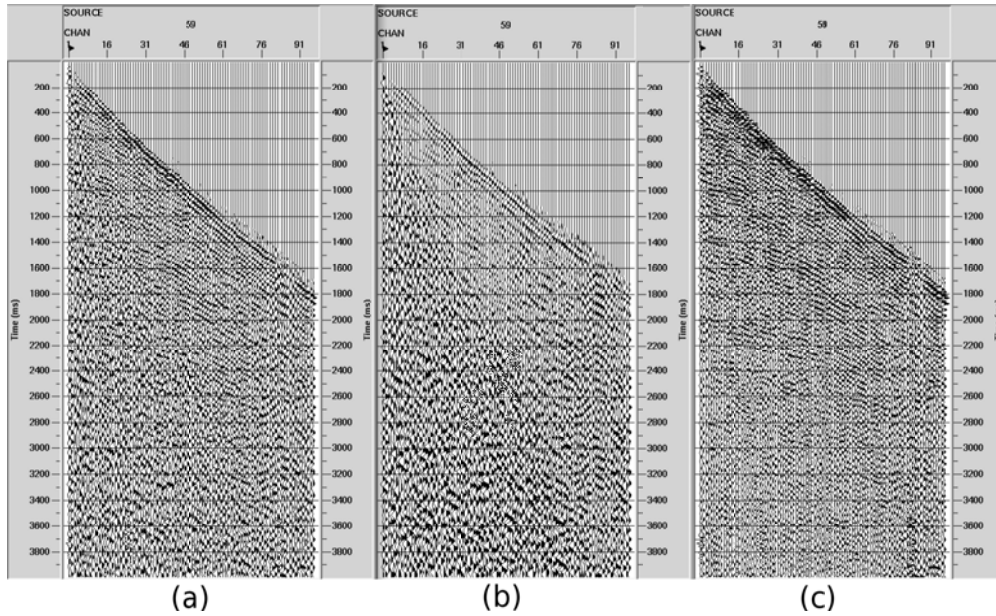


Figura 2.13: Resultado da aplicação do método ST-SVD na família de tiro 59 da linha sísmica 0227-0018, em (a) temos os sismograma após a correção de amplitude, em (b) a componente de baixa frequência contendo o groundroll e em (c) o sismograma filtrado correspondente a componente de alta frequência.

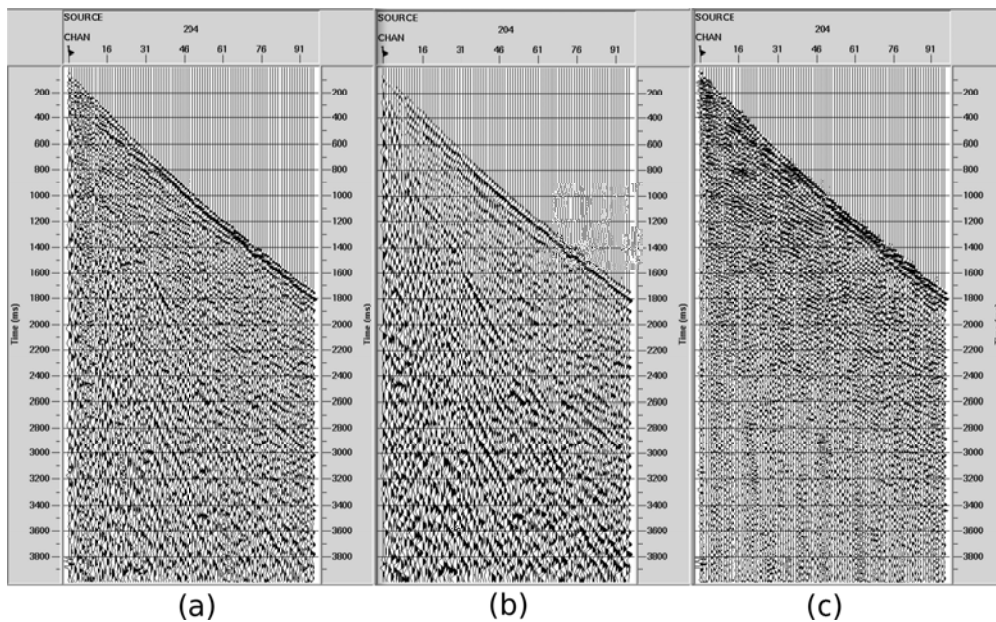


Figura 2.14: Resultado da aplicação do método ST-SVD na família de tiro 204 da linha sísmica 0227-0018, em (a) temos os sismograma após a correção de amplitude, em (b) a componente de baixa frequência contendo o groundroll e em (c) o sismograma filtrado correspondente a componente de alta frequência.

Nas Figuras 2.15 e 2.16 são ilustrados os espectros de amplitude dos sismogramas apresentados nas Figuras 2.13 e 2.14, respectivamente. Verificando esses espectros, comprovamos

a eficácia do método ST-SVD em separar bandas de frequência dos dados em duas componentes de baixa e alta frequência. Em ambas as figuras, também é facilmente perceptível que as curvas associadas às componentes de baixa frequência estão concentradas na faixa de frequência do groundroll, inclusive as curvas indicam que as maiores amplitudes atenuadas pela filtragem foram de aproximadamente 9 Hz para o tiro 59 e de 13 Hz para o tiro 204. É importante destacar característica das componentes obtidas com o método ST-SVD, que é o fato de nenhuma delas modificar a forma da curva do dado original e também não ultrapassam os valores das amplitudes originais do espectro.

Os bons resultados apresentados confirmaram a viabilidade do uso do método ST-SVD para o tratamento do groundroll da linha 0227-0018.

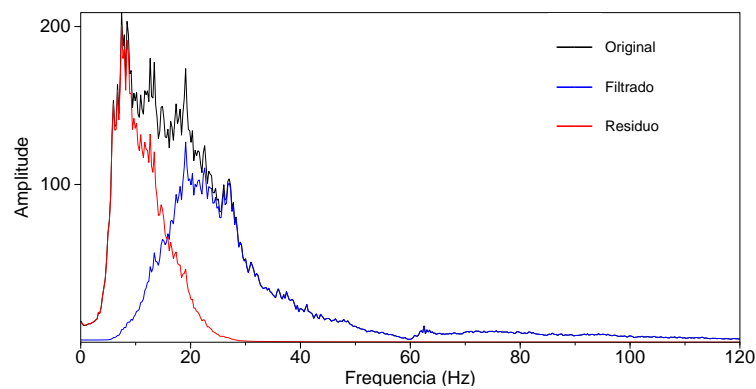


Figura 2.15: Espectros de amplitude dos sismogramas apresentados na figura 2.13.

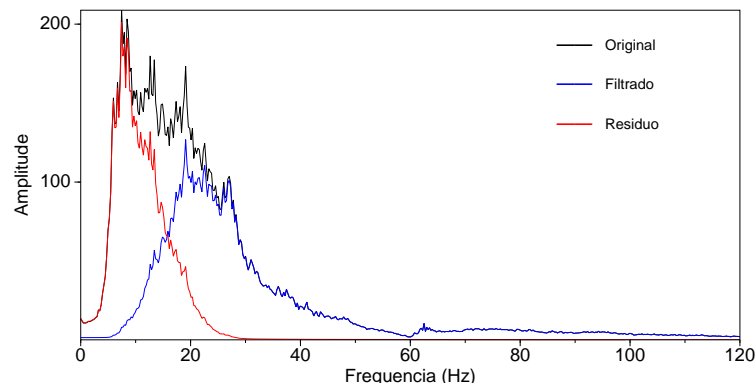


Figura 2.16: Espectros de amplitude dos sismogramas apresentados na figura 2.14.

2.2.2 Análise de velocidades

É necessário antes de partir para análise de velocidade a reorganização dos traços sísmicos que estão em sismogramas de tiro comum para sismogramas de ponto médio comum CMP (*Common MidPoint*) ou famílias CMPs.

Numa família CMP, serão colecionados todos os traços sísmicos obtidos por diferentes pares de fontes e receptores mas com o mesmo ponto médio em superfície. Para um modelo de uma única camada isotrópica em subsuperfície, plana e horizontal, a família CMP pode ser chamada também de família de ponto médio em profundidade ou família CDP, esse caso é ilustrado na Figura 2.2.

A etapa de análise de velocidades tem por objetivo a determinação de um campo de velocidades da subsuperfície, o qual seja capaz de compensar as diferenças de sobretempo normal (*normal moveout*) das reflexões sísmicas em cada família CMP. Na prática, devem ser selecionados criteriosamente os valores de velocidade que melhor horizontalize as hipérbolos de reflexão, de forma que os traços apresentem maior coerência espacial ao longo dos afastamentos do CMP. Esse processo tem um efeito direto na etapa de empilhamento, pois quanto mais horizontalizada as reflexões, maior será a correlação do sinal nos traços e os ruídos aleatórios atenuados.

Alguns fatores podem ajudar na realização de uma boa análise de velocidades: i) sismogramas CMP com boa razão sinal-ruído, ii) alta cobertura CMP e iii) conhecimento geológico da bacia e informações de perfis de poços para auxiliar na interpretação dos espectros de velocidades (mapas de velocidades).

Na prática, a análise de velocidades é um processo inverso, em que se faz uma estimativa do campo de velocidades considerando um modelo estratificado para subsuperfície, com o uso da equação do tempo de trânsito das reflexões no sismograma e uma medida de coerência do sinal sísmico.

A análise de velocidades no *Seispace* é realizada numa janela contendo, basicamente, o espectro de velocidades *semblance* e ao lado o painel CMP ou super família de traços (*supergather*). No processamento realizado, foi utilizado famílias *supergathers*, as quais consistem num empilhamento parcial dos traços de um grupo de CMPs, o resultado dessa estratégia é um aumento da cobertura quando os dados possuem uma baixa cobertura ou razão sinal-ruído dos dados, deixando mais delineadas as hipérbolos de reflexão e assim facilitando a visualização e marcação dos pontos de máxima coerência no espectro de velocidades.

No *SeisSpace* foi utilizado o módulo *2D Supergather Formation* para criação de *supergathers*. Definidos os *supergathers*, parte-se para a análise de velocidades propriamente dita, em que são escolhidos os pontos no espectro de velocidades associados ao pares de tempo e velocidade que representam o melhor ajuste do tempo de trânsito para cada uma

das hipérbolas de reflexão presentes no sismograma CMP ou *supergather*. Os pares de tempo e velocidade escolhidos num espectro de velocidades formam a chamada função velocidades.

Na prática, a marcação desses pontos é feita a partir da escolha dos valores de máxima coerência *semblance* do espectro de velocidades. Essa medida varia de 0 a 1, comumente é utilizado um mapa de cores para ajudar o intérprete na marcação dos pontos de máxima coerência. No *SeisSpace* o mapa de cor padrão usado define a cor vermelha para os valores de máxima coerência.

No presente trabalho, os parâmetros usados na análise de velocidades da linha 0227-0018, foram os seguintes: 700 CMPs de máxima cobertura (48 traços em cada), para a formação dos *supergathers* foram utilizados 11 CMPs e o incremento entre *supergathers* foram de 50 CMPs. A faixa de velocidades nos espectros de velocidades analisados foi de 1500 a 5000 m/s.

A Figura 2.17 ilustra a análise de velocidades com o espectro de velocidades gerado com o *supergather* 650. Nessa figura, percebe-se no espectro de velocidades que poucos pontos de máxima concentração de energia de coerência (na cor vermelha) relacionadas às reflexões do sismograma ao lado, também é mostrada a função velocidade obtida após a seleção dos maiores pontos de coerência no espectro do lado direito da figura. É importante mencionar que em praticamente todos os espectros de velocidades analisados, encontrou-se poucos pontos de máxima coerência para marcação dos pontos (pares de tempo e velocidade) para definição das funções de velocidades, o que dificultou bastante a definição dos máximos de coerência.

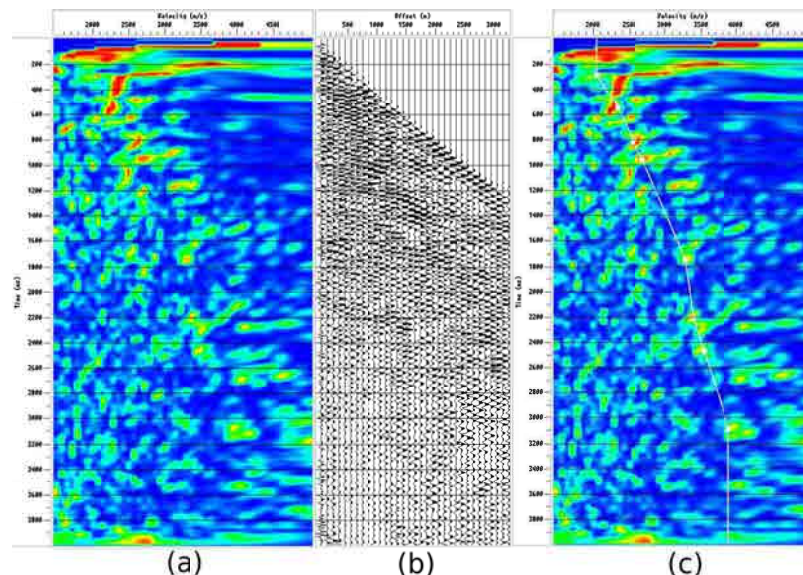


Figura 2.17: Análise de velocidades da linha 0227-0018, em (a) o espectro de velocidades gerado, o sismograma *supergather* com as reflexões em (b) e o espectro com a função velocidade definida pelos pontos selecionados em (c)

A Figura 2.18 ilustra o campo de velocidades obtido após a finalização da análise de velocidades.

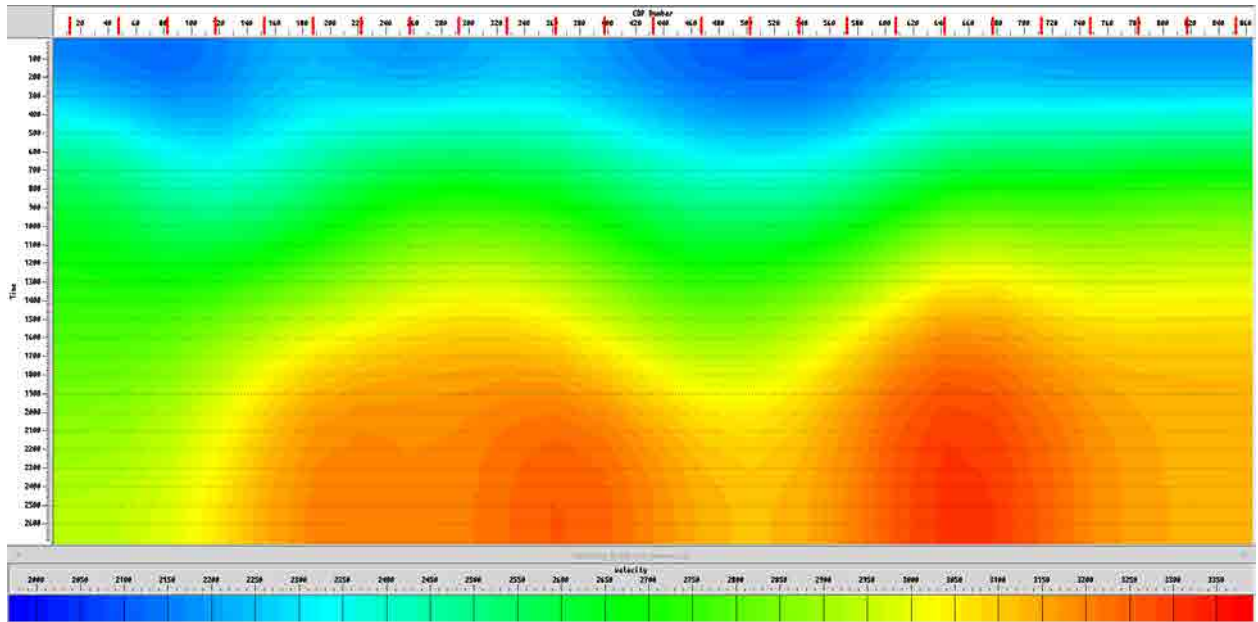


Figura 2.18: Campo de velocidades obtido da linha sísmica 0227-0018.

2.2.3 Correção NMO

A correção NMO (*Normal Moveout*) ou correção do sobretempo normal não é fixa, e sim dinâmica, ou seja, essa correção varia em função do tempo e do offset. Essa etapa é feita após a análise de velocidades e tem por finalidade corrigir o sobretempo normal (ou atraso no tempo) presente nos traços sísmicos da família CMP, causado pelo afastamento dos pares fonte e receptor. Considerando que numa camada horizontal com velocidade constante, as reflexões em função do afastamento tem um formato hiperbólico. A correção NMO quando aplicada numa família CMP fará com que todos os traços sejam iguais ao traço de afastamento nulo ou *zero-offset* obtido se a fonte e o receptor ocupassem a mesma posição (Rosa, 2010).

Para um modelo de refletor plano-paralelo, ou seja, modelo estratificado para a Terra, a correção NMO é calculada pela equação:

$$\Delta t = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2} - t_0 \quad (2.8)$$

Sendo, v é a velocidade estimada na análise de velocidade, t_0 é o tempo duplo de trânsito na posição $x = 0$ e x é o afastamento entre fonte e receptor. Δt é o valor do atraso no tempo ou *moveout*.

A velocidade utilizada na correção NMO é denominada velocidade de NMO (V_{NMO}). Existem três situações possíveis para velocidade NMO: i) V_{NMO} igual a velocidade da camada, nesse caso, a hipérbole de reflexão na família CMP será horizontalizada; ii) V_{NMO} maior que a velocidade da camada, ocorre uma sub-correção, e a curvatura da hipérbole de reflexão da família CMP será mais acentuada para baixo; e iii) V_{NMO} menor que a velocidade da camada, ocorre uma sobre-correção, e a curvatura da hipérbole de reflexão da família CMP será voltada para cima.

No *SeisSpace*, o módulo utilizado para aplicar esta correção foi o *Normal Moveout Correction*. Esse módulo possui um silenciamento automático de traços da família CMP para remover o estiramento do pulso que ocorre devido a correção NMO.

A Figura 2.19 ilustra a aplicação da correção NMO. Observa-se no sismograma as hipérboles de reflexão na janela de tempo entre 400 e 1800 *ms* antes da correção NMO e esses mesmos eventos horizontalizados após aplicação da correção, também é possível verificar que a onda direta também foi eliminada com o mute automático aplicado.

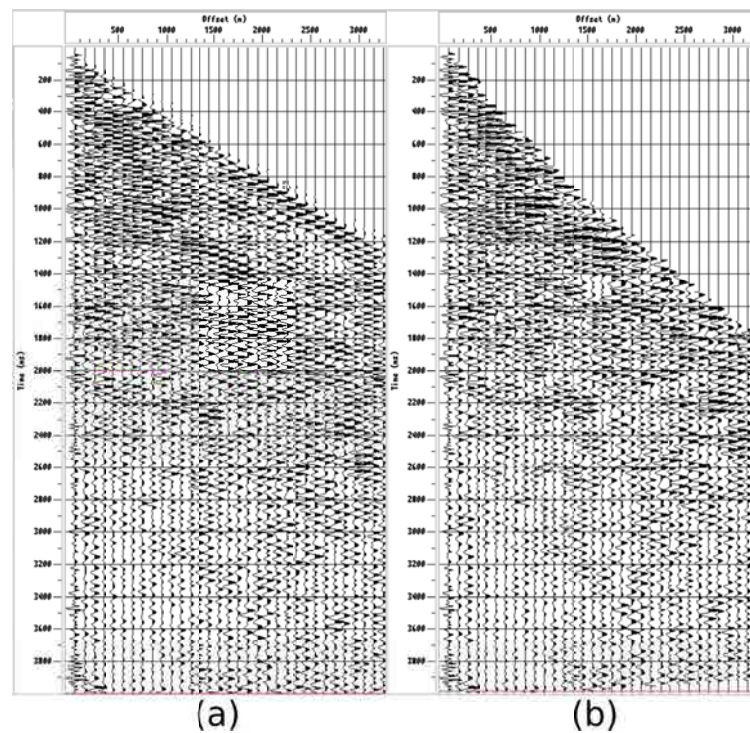


Figura 2.19: Sismograma com as hipérboles de reflexão em (a) e após a correção NMO em (b).

2.2.4 Empilhamento e deconvolução

Após a correção NMO todos os traços de uma mesma família CMP representam o mesmo traço de afastamento nulo ou *zero-offset*, o que implica no aumento da razão sinal-ruído no empilhamento. Nessa etapa do processamento, calcula-se a média aritmética de todos os traços da família CMP com correção NMO, isto é, cada amostra em tempo do traço sísmico resultante, foi obtida pela média aritmética das amostras em todos os traços pertencentes ao CMP de acordo com a seguinte equação:

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(t), \quad (2.9)$$

onde $A(t)$ é a amplitude do traço empilhado no tempo t , N é o número de traços ou cobertura da família CMP, i é o índice indicador do traço e a_i é o valor da amplitude do traço i no tempo t .

Dispondo, lado a lado, o traço resultante de cada uma das famílias CMP, tem-se a seção empilhada, cuja qualidade estará diretamente ligada à precisão do campo de velocidades estimado, isto é, ao resultado obtido com o uso das velocidades no processo de horizontalização dos eventos hiperbólicos de reflexão. O empilhamento das famílias CMP no *SeisSpace* foi feito utilizando o módulo *CDP/Ensemble Stack*.

Para aumentar a resolução da seção sísmica empilhada obtida foi aplicada o método de deconvolução do pulso. A idéia básica da deconvolução é comprimir o pulso ou (*wavelet*) a um impulso, e com isso aumentar a resolução temporal dos dados sísmicos, restituindo a resposta impulsiva da Terra (considerando a suposição de que a subsuperfície é composta por camadas planas, horizontais e com velocidade constantes e a onda tenha incidência normal).

O modelo convolucional para representar um traço sísmico livre de ruídos, é definida pela seguinte expressão:

$$x(t) = p(t) * e(t) \quad (2.10)$$

,

onde $x(t)$ compreende o traço sísmico, $e(t)$ a impulsividade da subsuperfície ou refletividade.

Para fazer a deconvolução deve ser estimado um operador ou filtro inverso, que é uma aproximação do inverso do pulso emitido pela fonte sísmica, e feita a convolução com o pulso para que o transforme em um impulso. Portanto, aplicando o operador $p^{-1}(t)$ em ambos lados da equação (2.10) temos:

$$p^{-1}(t) * x(t) = p^{-1}(t) * p(t) * e(t) \quad (2.11)$$

$$\tilde{x}(t) = e(t) \tag{2.12}$$

sendo obtido traço deconvolvido $\tilde{x}(t)$ que contém apenas a refletividade. O operador ou filtro inverso pode ser estimado através dos métodos dos mínimos quadrados e da recursão de Levinson. No presente trabalho, a deconvolução do pulso foi feita após o empilhamento, utilizando o módulo *Spiking/Predictive Decon* do *Seispace*, com a definição de uma janela de tempo (com maior razão sinal ruído possível) para estimativa do operador e definição do tamanho do operador de 18ms.

Para comparação, a Figura 2.20 apresenta a seção epilhada bruta sem filtragem e a Figura 2.21 apresenta a seção sísmica empilhada obtida após o empilhamento e aplicação da deconvolução. É possível observar uma boa resolução temporal e uma boa razão sinal-ruído. Nota-se a existência de boa continuidade lateral dos eventos até os 2.0s ao longo de toda a extensão da seção. Há eventos com mergulho mais acentuado do lado direito da seção na janela de tempo de 1 a 2.9s.

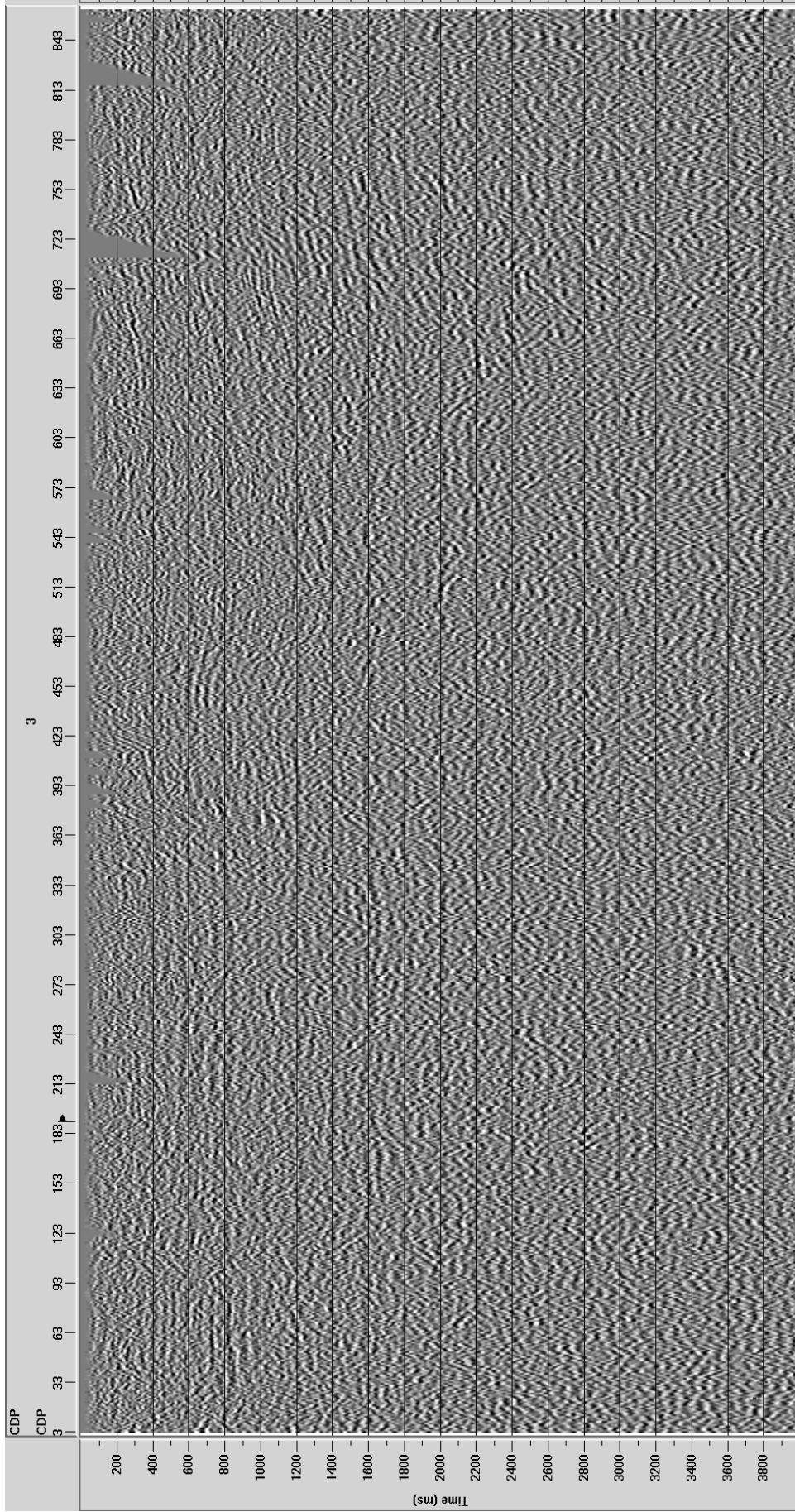


Figura 2.20: Seção sísmica empilhada bruta da linha 0227-0018.

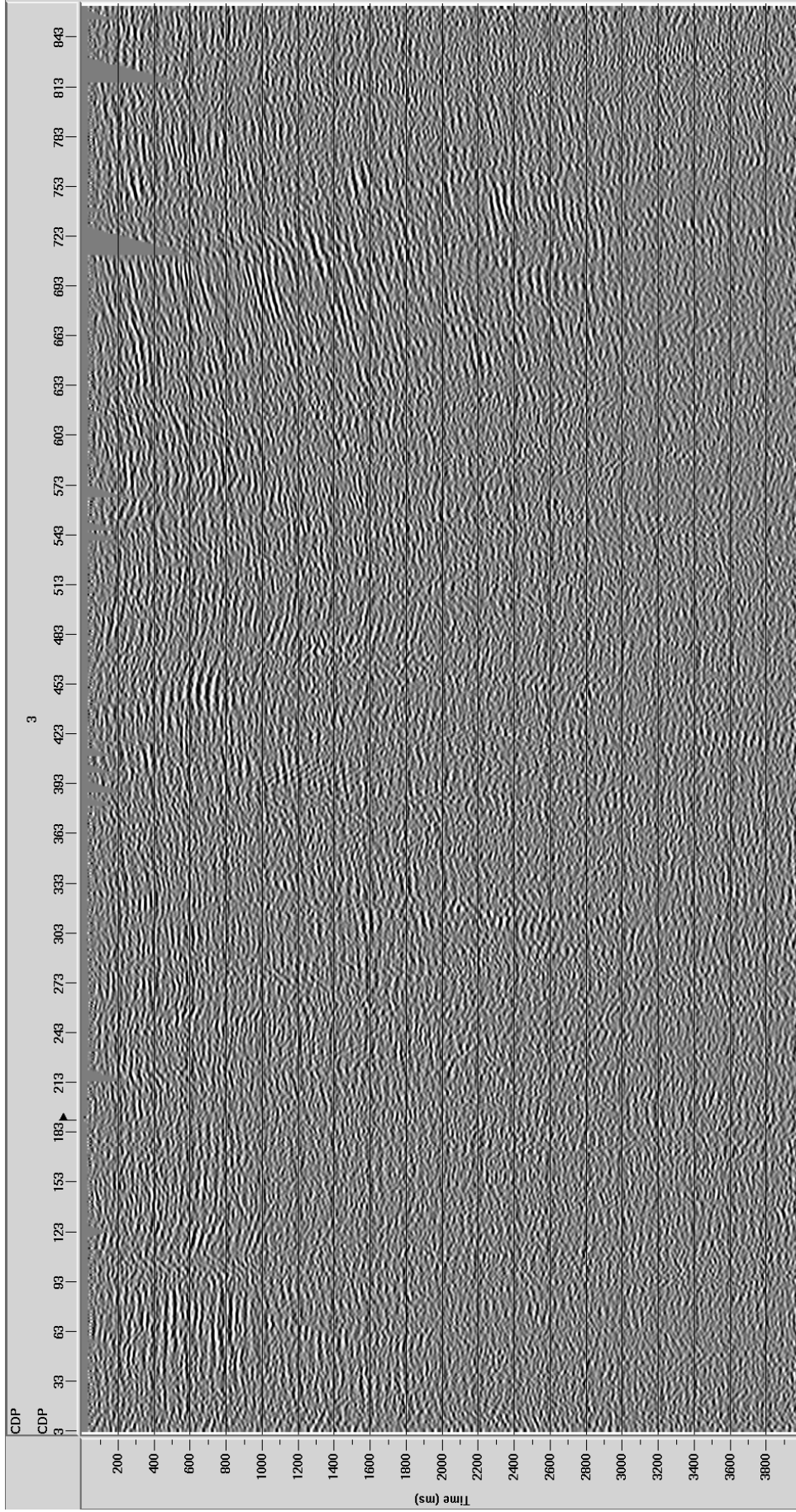


Figura 2.21: Seção sísmica empilhada deconvolvida da linha 0227-0018.

2.2.5 Migração

A migração de dados sísmicos tem por objetivo corrigir a imagem distorcida (seção sísmica empilhada ou pseudo-seção *zero-offset*) que representa o campo de onda temporal registrado na superfície transformando-o em outro campo, cujos refletores geológicos estarão verdadeiramente posicionados e as difrações colapsadas. A migração é um modelamento inverso, uma vez que utiliza a seção sísmica empilhada para obter uma seção geológica real da subsuperfície (Silva, 2004).

Uma seção pode ser migrada em tempo ou em profundidade e a migração pode ser realizada antes ou depois do empilhamento dos traços. O custo computacional da migração pré-empilhamento é maior, pois é realizada no volume total de traços do dado sísmico, enquanto a migração pós-empilhamento é realizada na seção empilhada ou *zero-offset* (que possui um número muito menor de traços sísmicos).

Neste trabalho foi aplicada a migração Kirchhoff no domínio do tempo, a partir do módulo *Kirchhoff Time Mig* do *SeisSpace*. Os principais parâmetros de entrada são: o campo de velocidade, a abertura do operador, o qual se relaciona com a distância máxima para qual a energia pode ser espalhada e o ângulo de migração, que determina os ângulos que se deseja decompor.

A Figura 2.22 apresenta a seção sísmica obtida após a migração ser aplicada na seção empilhada. Essa seção pode ser utilizada para interpretação geológica e no uso dos atributos sísmicos, uma vez que os refletores estão localizados na posição verdadeira.

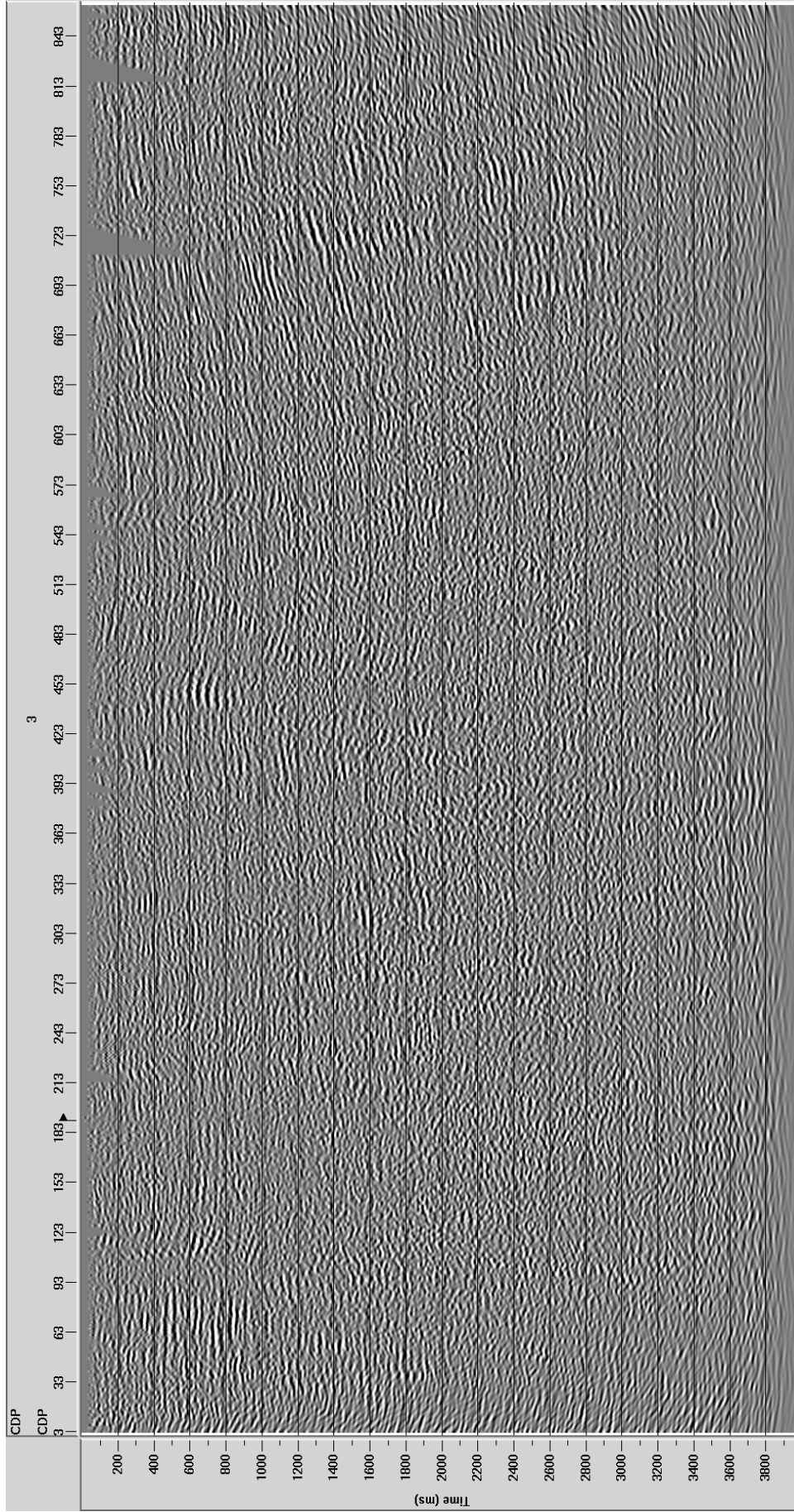


Figura 2.22: Seção sísmica migrada da linha 0227-0018

Capítulo 3

Atributos Sísmicos

Os atributos sísmicos são quaisquer informações extraídas a partir da análise dos dados sísmicos. Segundo [Taner et al. \(1979\)](#) essas informações podem ser obtidas através de medições diretas, lógicas ou baseadas na experiências e conhecimentos anteriores. São gerados para enfatizar a característica desejada, a qual não é diretamente identificada nos dados. Como uma ferramenta na interpretação sísmica, a análise de atributos sísmicos permite ao intérprete não só melhor mapeamento de feições estruturais, como falhas e contorno do embasamento, mas também a identificação de terminações estratigráficas, continuidade de refletores e reconhecimento de diferentes fácies sísmicas, levando a uma interpretação mais apurada ([Vilas Boas, 2016](#)).

Dentre os vários atributos existentes, alguns podem ser usados como indicadores de hidrocarbonetos, outros como indicadores de falhas geológicas, ou seja, através deles pode-se fazer análises do dado com objetivos diversos.

3.1 Classificação dos atributos

No que diz respeito a classificação dos atributos, [Taner \(2001\)](#) fez uma compilação uma compilação das classes dos atributos sísmicos baseadas em diferentes critérios tais como a etapa do processamento em que são derivados, conteúdo de informação, o tipo de informação geológica que cada atributo realça dentre outros.

Em relação ao momento do fluxo de processamento em que se utiliza o dado de entrada, os atributos podem ser classificados como:

- **Atributos pré-stack:** Os dados de entrada são os CDP que conterão informações relacionadas a direção (azimute) e ao *offset*. Contêm quantidades consideráveis de in-

formações que podem estar diretamente relacionadas ao conteúdo de fluido e orientação das fraturas e por isso são mais utilizados em estudos de detalhe na caracterização de reservatórios. AVO, velocidades e variação azimutal são atributos que estão incluídos nesta classe.

- **Atributos pós-stack:** Neste caso os dados de entrada podem ser CDP empilhados ou migrados. Atributos pós-stack são melhores para a observação de grandes quantidades de dados em investigações iniciais. Atributos do traço complexo, como frequência instantânea e fase instantânea, e atributos de coerência são exemplos desta classe.

Podem ser classificados ainda pelas suas características computacionais:

- **Atributos Instantâneos:** São calculados amostra por amostra e representam variações instantâneas de vários parâmetros. Valores instantâneos de atributos, tais como envelope do traço, seus derivados, frequência e fase podem ser determinados a partir de traços complexos.
- **Atributos *Wavelet*:** Esta classe compreende os atributos instantâneos que são computados no pico do envelope e têm uma relação direta com a Transformada de Fourier da *wavelet* na proximidade do pico do envelope. Por exemplo, a frequência instantânea no pico do envelope é igual à frequência média do espectro de amplitude da *wavelet*. A fase instantânea corresponde à fase de interceptação da *wavelet*. Este atributo também é chamado de "atributo de resposta".

Esses atributos podem ser subclassificados com base na relação com a geologia:

- **Atributos Físicos:** Atributos físicos se relacionam com qualidades e quantidades físicas. A magnitude do envelope do traço é proporcional ao contraste de impedância acústica, frequências relacionam-se com a espessura das camadas, dispersão e absorção da onda. Velocidades instantâneas e médias se relacionam diretamente com as propriedades das rochas. Conseqüentemente, esses atributos são usados principalmente para a classificação litológica e caracterização de reservatórios.
- **Atributos Geométricos:** Descrevem uma relação espacial e temporal de todos os outros atributos. A continuidade lateral medida pela coerência é um bom indicador de similaridade das camadas, bem como a descontinuidade. Os mergulhos e as curvaturas da camada fornecem informações de deposição. Também são úteis para a interpretação estratigráfica, uma vez que definem características do evento e suas relações espaciais, e podem ser usados para quantificar características que ajudam diretamente no reconhecimento de padrões da deposição e litologia relacionadas.

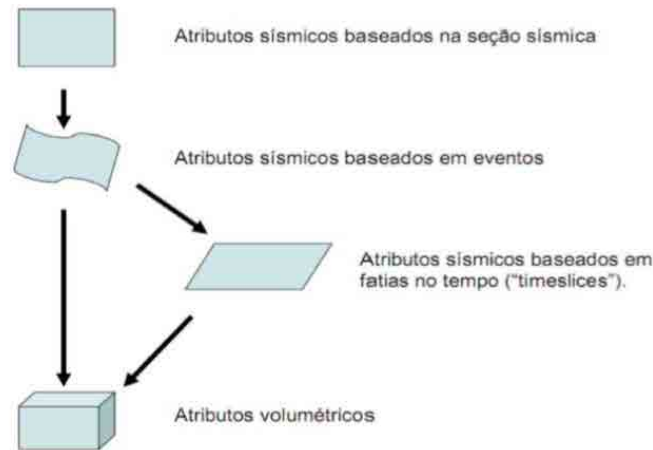


Figura 3.2: Classificação dos atributos de acordo com o modo como são gerados. Baseados na seção sísmica, em eventos ou volumétricos. Fonte: [Chen e Sidney \(1997\)](#).

3.2 Atributos convencionais do traço complexo

O traço complexo $z(t)$, representado na Figura 3.3, consiste de um componente real $x(t)$, que neste caso é o traço sísmico convencional, e de uma componente imaginária $y(t)$, a qual é a transformada de Hilbert de $x(t)$. Quando os traços são somados, o resultado é o traço sísmico complexo $z(t)$ (curva helicoidal), definido por:

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (3.1)$$

A parte imaginária $y(t)$, também denominada traço em quadratura e $z(t)$ podem ser determinados em termos da transformada de Hilbert ou por convolução no domínio do tempo, usando-se o operador de quadratura associado à transformada de Hilbert. Segundo [Souza \(2016\)](#), o espectro de amplitude do traço complexo desaparece para $w < 0$ e tem duas vezes a magnitude para $w > 0$. Como a fase mantém-se constante (exceto quando ela não é definida para $w < 0$) o traço complexo pode então ser estimado da seguinte forma:

1. Transformada de Fourier do traço real;
2. Anula-se as amplitudes para as frequências negativas e dobra-se as amplitudes das frequências positivas, e
3. Transformada inversa de Fourier.

Quando as partes real e imaginária são adicionadas em sentido vetorial, o resultado é uma hélice em espiral centrada no eixo do tempo sísmico (t). Este traço helicoidal é o traço sísmico complexo, como ilustra a Figura 3.3. Considerando o traço sísmico registrado como

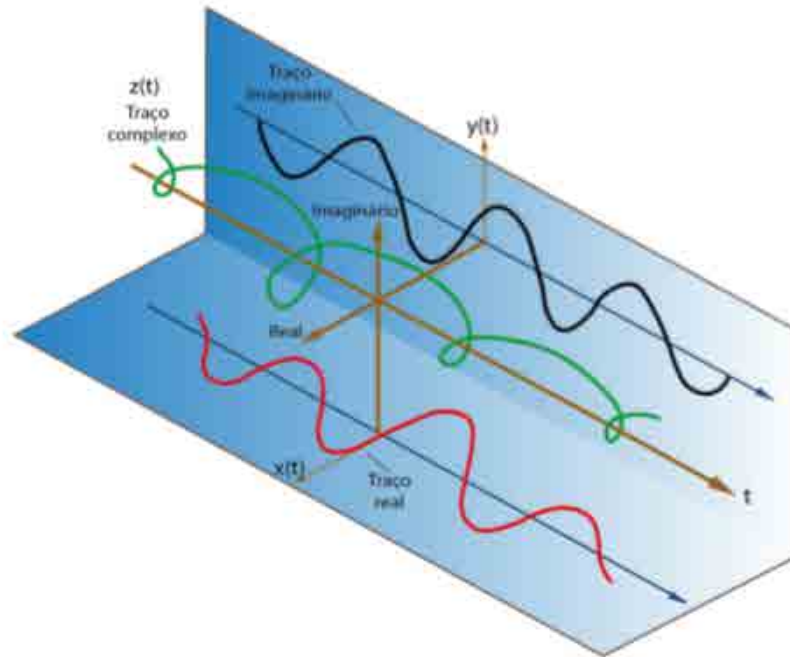


Figura 3.3: Traço sísmico complexo. Fonte: Souza (2016).

parte real de um traço sísmico analítico é possível extrair informações de amplitude, fase e frequência. A parte imaginária é a transformada de Hilbert do traço registrado. Os dois atributos fundamentais do traço complexo são a amplitude e a fase instantânea. A frequência instantânea é a taxa de variação temporal da fase.

Amplitude Instantânea

Também denominado envelope do traço, este atributo é dado pela raiz quadrada do total da energia do sinal sísmico em um determinado instante do tempo, ou seja, é a amplitude da energia sísmica total do traço sísmico num instante qualquer e descreve o fluxo de energia na subsuperfície. É definido matematicamente pela equação:

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (3.2)$$

Esse atributo, que traz informações de amplitude do traço sísmico, pode ser usado como um discriminador efetivo para as seguintes características:

- Contraste de impedância acústica, ou seja, a refletividade;
- Eventos *brigh spots*, que são possíveis acumulações de gás;
- Limites de sequências sísmicas e mudanças de litologia;

- Discordâncias, falhas e canais.

As fortes reflexões de energia podem ser associadas a principais mudanças litológicas, assim como acumulações de óleo e gás. As variações laterais da energia podem quantificar mudanças acústicas em propriedades da rocha, e mudanças abruptas na espessura das camadas podem indicar presença de hidrocarbonetos.

Fase Instantânea

A fase instantânea enfatiza continuidade dos eventos, fornecendo um caminho para que eventos fracos e fortes apareçam em equilíbrio. Isso decorre do fato de que, no seu cálculo, são ignoradas as informações de amplitude das amostras no tempo, conseqüentemente, descontinuidades que são difíceis de serem observadas em seções sísmicas convencionais, devido às baixas amplitudes, aparecerão mais claramente em exibições de fase. Matematicamente, este atributo é calculado a partir da seguinte equação:

$$\phi(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)}, \quad (3.3)$$

onde $\phi(t)$ é a fase instantânea, $y(t)$ o traço quadratura e $x(t)$ o traço sísmico real.

A fase instantânea aplica-se como indicador de continuidade lateral; usado para computar a velocidade de fase; representa todos os eventos, uma vez que não possui informações de amplitude e é utilizado na visualização de elementos estratigráficos, tais como terminações de refletores e discordância.

Na Figura 3.4 percebe-se que o ângulo $\phi(t)$ do vetor $a(t)$ é geralmente medido com relação ao plano real $x(t)$ e é definido como fase naquele ponto, ou seja, fase instantânea.

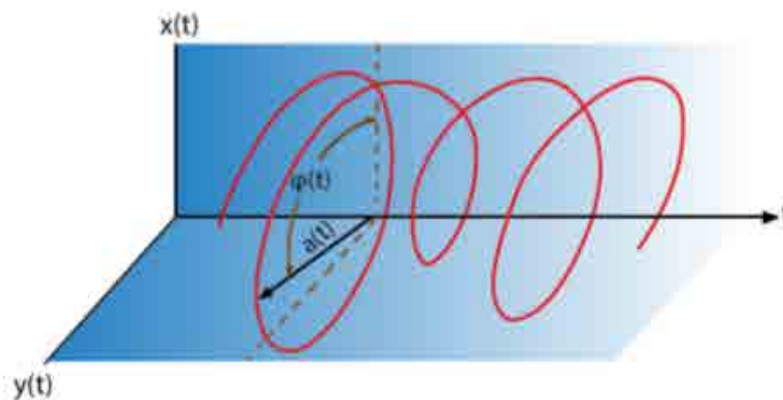


Figura 3.4: Atributos sísmicos amplitude instantânea $a(t)$ e fase instantânea $\phi(t)$. Fonte: Souza (2016).

Frequência Instantânea

A frequência instantânea corresponde à derivada da fase instantânea em relação ao tempo, sendo definida por:

$$w(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}. \quad (3.4)$$

Esse atributo pode ser usado como:

- Identificação da espessura das camadas, já que altas frequências representam camadas mais finas e frequências menores indicam geometria de camadas mais espessas;
- Indicador de hidrocarboneto através de anomalias de baixa frequência. Esse efeito é algumas vezes acentuado pelas areias não consolidadas devido ao alto teor de óleo dos poros (Subrahmanyam e Rao, 2008);
- Indicador de zonas fraturadas, aparecendo em zonas de mais baixas frequências.

3.3 Técnica volume de amplitude – tecVA

Também conhecida como *Pseudo Relief* (do inglês pseudo-relevo), este atributo foi desenvolvido por Bulhões e Amorim (2005) e calcula a média quadrática (ou RMS) em uma janela deslizante no tempo.

Para obter este atributo é utilizado o princípio da sismocamada elementar (SCE), que é a camada de rocha com menor espessura que o dado sísmico consegue registrar. Definido o topo (t_1) e base (t_2) da SCE, tem-se uma janela de tempo, a qual dará o número de amostras a ser utilizado no cálculo da média móvel ao longo do traço.

- **Passos fundamentais para gerar esse atributo:**

1) Cálculo da amplitude RMS ou do valor absoluto do traço para estimar a amplitude instantânea, sendo afetado por um fator de escala controlado por t_1 e t_2 , que é a janela (em milissegundos) escolhida para o cálculo. Tais amplitudes são definidas matematicamente como:

$$\bar{x}_{rms_i} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{j=i+M/2} x_j^2}, \quad (3.5)$$

$$\bar{x}_{abs_i} = \frac{1}{M} \sum_{j=i-\frac{M}{2}}^{j=i+\frac{M}{2}} |x_j|, \quad (3.6)$$

onde M é o número de amostras na janela móvel, j é a posição da amostra e x_j a amplitude da amostra na posição j .

A Figura 3.5 mostra os traços 3 e 4 com os resultados dos cálculos do valor absoluto e da amplitude RMS, respectivamente.

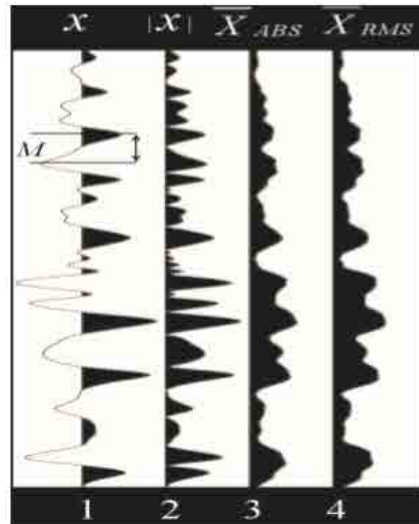


Figura 3.5: Traço com valor absoluto e amplitude RMS. Fonte: [Meneses \(2010\)](#).

2) Aplicar a transformada de Hilbert para rotacionar a fase do traço com amplitude RMS. Na Figura 3.6 é possível verificar o traço final que representa o atributo.

O atributo volume de amplitude com o dado rotacionado de $-\frac{\pi}{2}$ faz com que a seção sísmica convencional se assemelhe a planos verticais de afloramentos reais, pois este atributo parece aumentar os contrastes sísmicos, o que permite uma melhor visualização das características geológicas na seção.

Este atributo pode fornecer imagens que reforçam as características estruturais e estratigráficas contidas no dado sísmico. Como objetivos principais têm-se a identificação de discontinuidades (falhas e fraturas) e de variações laterais de sismofácies, facilita a interpretação de horizontes e auxilia a visualização da geometria dos reservatórios.

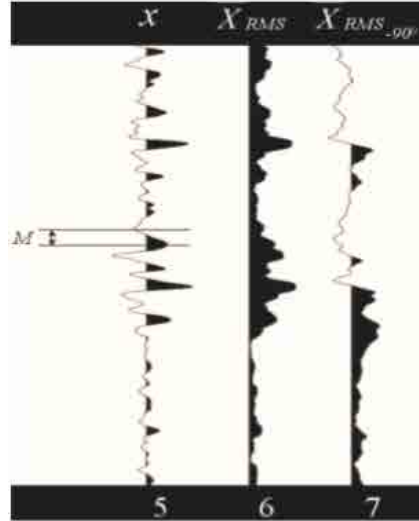


Figura 3.6: Traço com amplitude RMS e atributo tecVA. Fonte: [Meneses \(2010\)](#).

3.4 Similaridade

O atributo geométrico Similaridade é uma forma de coerência que expressa o quanto dois ou mais segmentos de traço sísmico são semelhantes ([Chopra e Marfurt, 2007](#)). As discontinuidades traço a traço nos dados sísmicos podem surgir devido à presença de falhas e feições estratigráficas que mudam as características dos traços em volta, promovendo uma perda de similaridade ([Troccoli, 2015](#)). O atributo mostra o quão similar um traço é do outro em uma escala que vai de 0 a 1, sendo considerado 1 quando os traços são completamente similares em forma e amplitude, e 0 quando os traços são completamente não similares.

No *software* utilizado, *OpendTect*, o atributo aplicado tenta buscar primeiramente a melhor direção em que os segmentos apresentam semelhanças, e então utilizando este primeiro resultado, busca semelhanças entre segmentos nesta direção preferencial.

Em termos matemáticos esse atributo faz a análise da correlação de segmentos dos traços em relação ao espaço volumétrico vizinho. As amostras do traço são vistas como componentes de um vetor em um hiperespaço. A Similaridade é definida como 1 menos a distância Euclidiana entre os vetores, normalizada em relação aos comprimentos vetoriais:

$$S = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}}, \quad (3.7)$$

onde S é o valor da similaridade buscada e X_i e Y_i são os vetores de comprimento igual a n amostras.

Como principais aplicações deste atributo têm-se a identificação de mudanças estruturais (falhas e fraturas) e identificação na mudança de geometria estratigráfica (canais e elementos de sistemas fluviais, fluxos de gravidade etc) nos dados sísmicos.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação dos atributos das linhas sísmicas de reflexão da área de estudo.

Foi feita a comparação do dado sísmico original (sem atributo) com o dado sísmico após a aplicação do atributo similaridade. São apresentados também os demais atributos e discutido quais características nas seções sísmicas os mesmos realçaram/destacaram. Para facilitar a discussão, foram inseridos polígonos e setas indicativas nas figuras com os atributos.

Os atributos foram gerados através do *software OpendTect* da *dGB Earth Sciences*.

4.1 Similaridade

Este atributo foi aplicado a todos os dados sísmicos. O dado de entrada foi o original. O *Output statistic* (tipo de atributo de similaridade) escolhido foi o de média similaridade. Este atributo retorna os valores 0 para máxima incoerência e 1 para máxima coerência e foi utilizado para marcar as discontinuidades do dado devido a falhas, fraturas, etc.

Nas figuras das seções com atributo, os polígonos amarelos delimitam regiões com anomalias de alta similaridade, ou seja, refletores contínuos com pouca ou nenhuma ocorrência de falhas ou fraturas. As setas pretas exemplificam regiões com baixos valores de similaridade, evidenciando discontinuidades nos refletores.

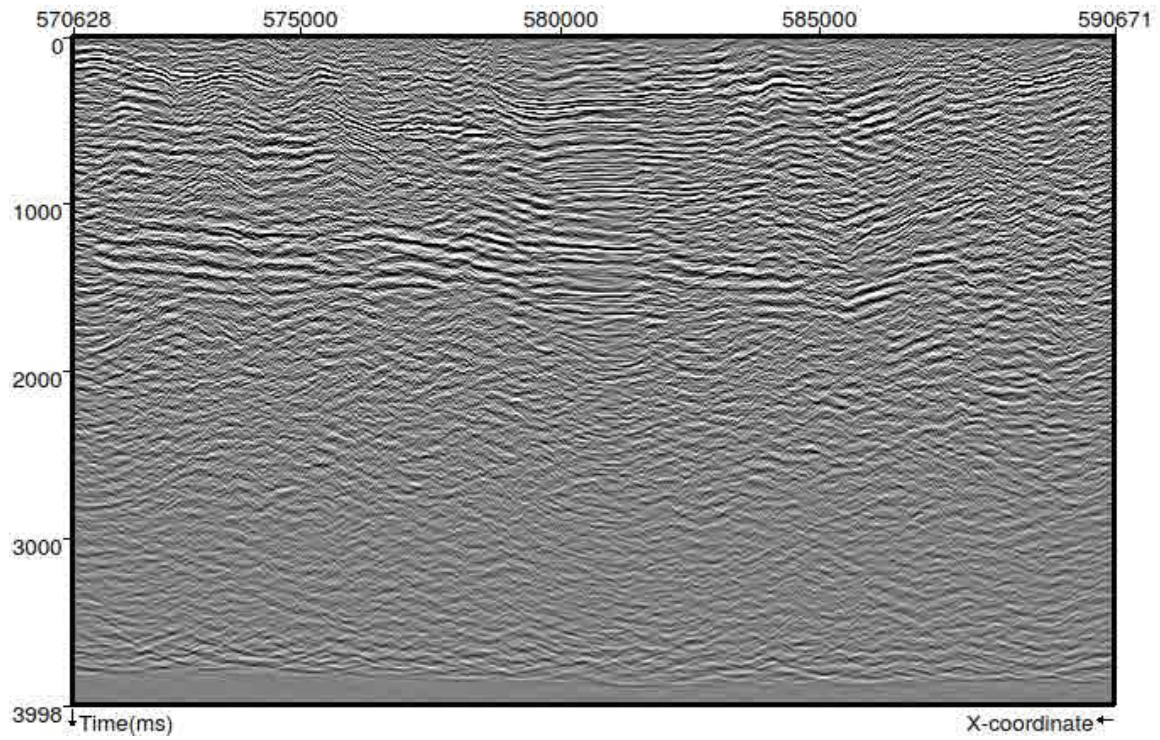


Figura 4.1: Seção sísmica da linha 0026-1414.

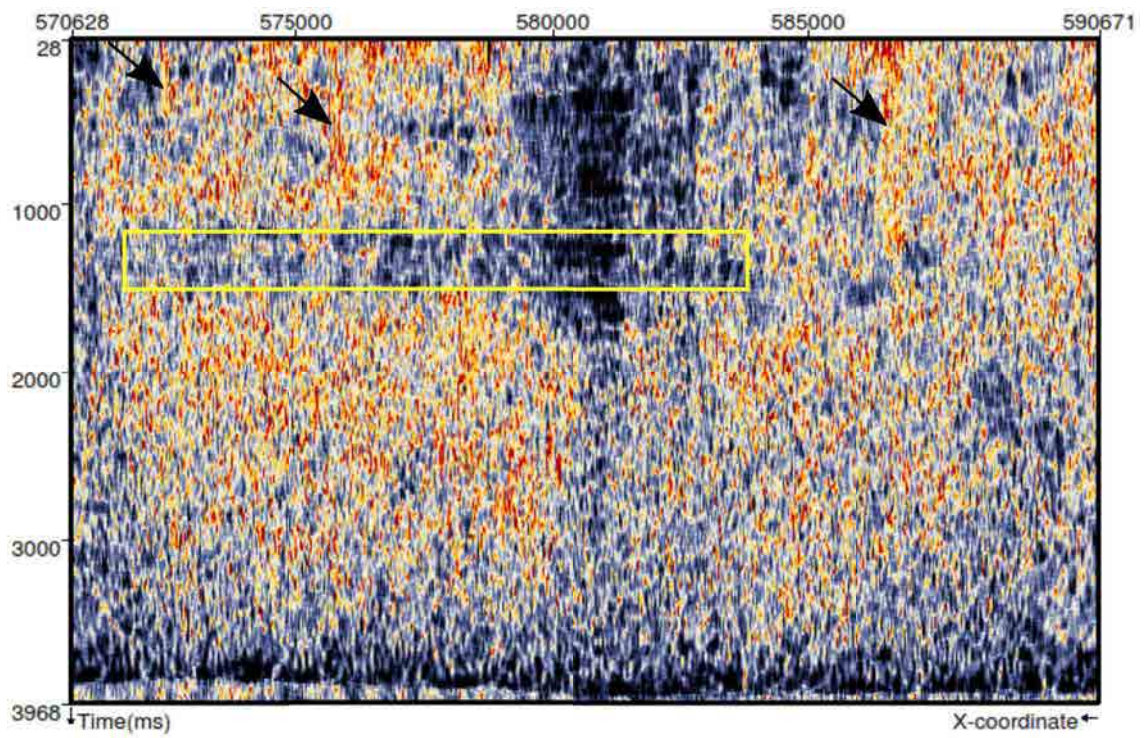


Figura 4.2: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1414.

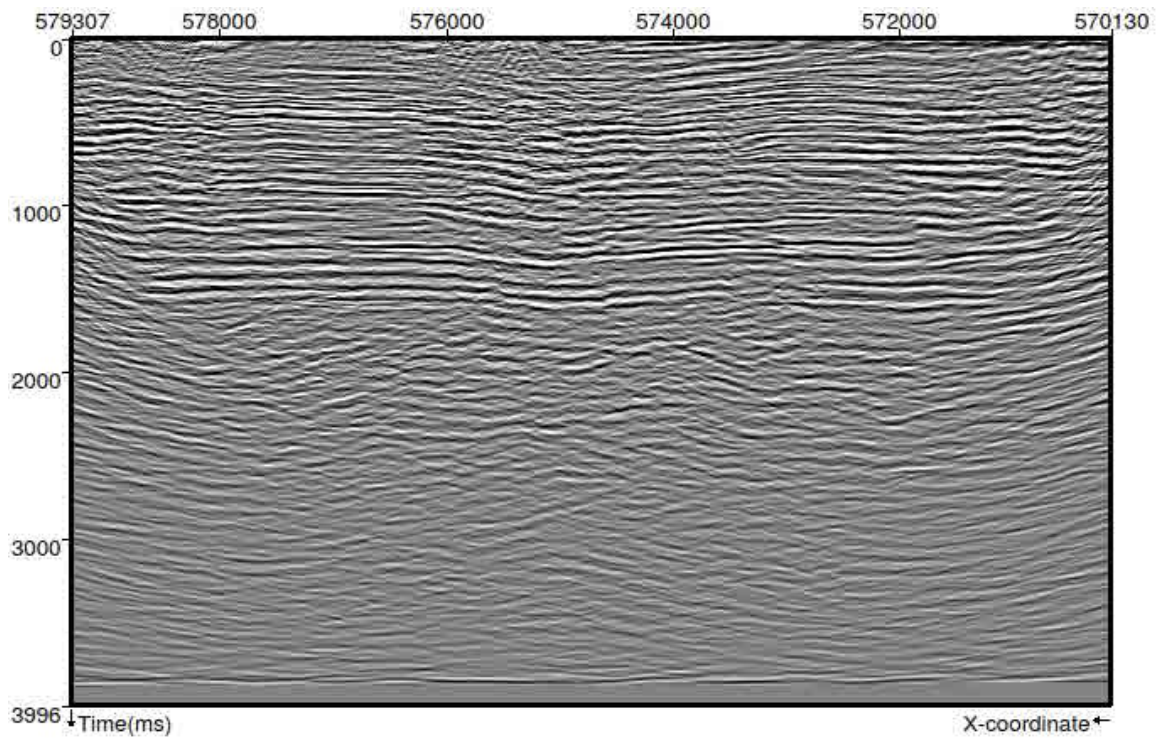


Figura 4.3: Seção sísmica da linha 0227-0016.

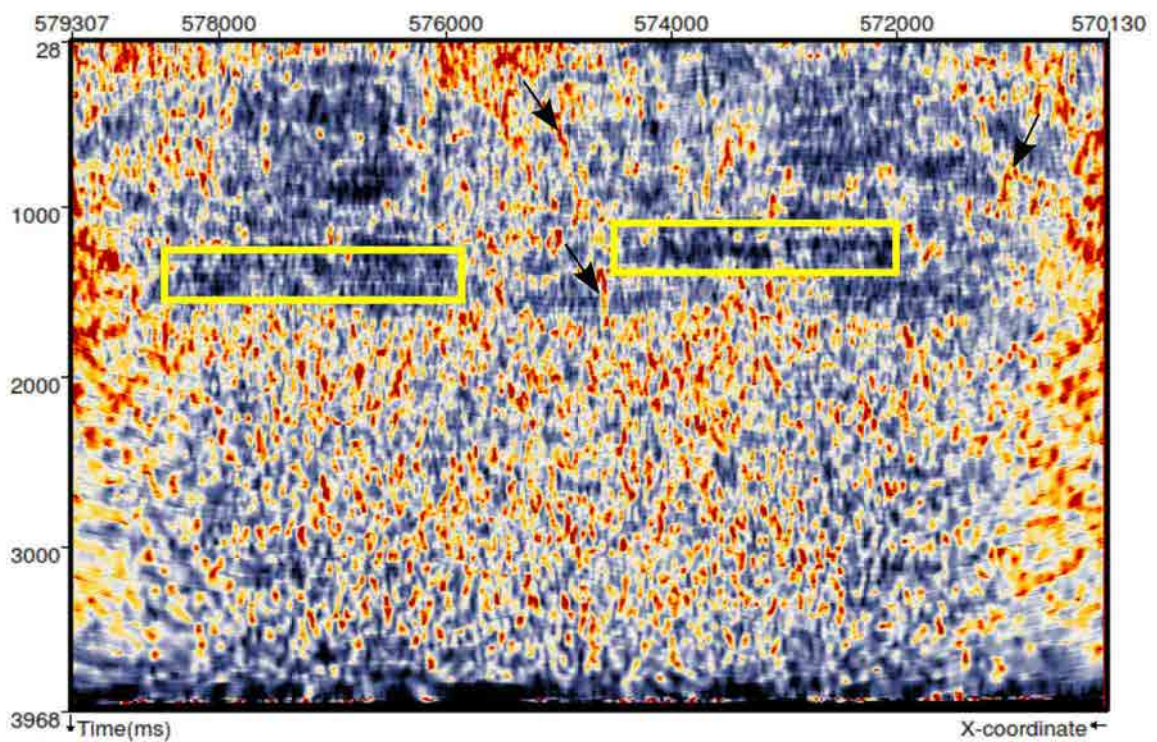


Figura 4.4: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0227-0016.

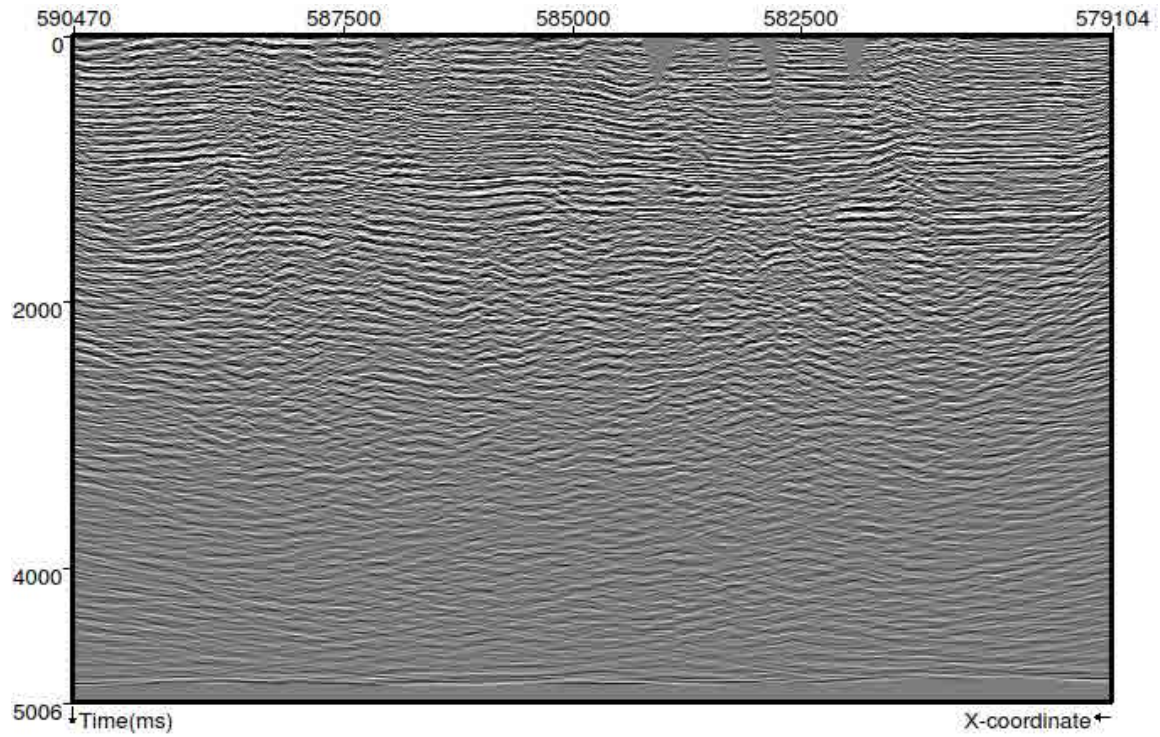


Figura 4.5: Seção sísmica da linha 0026-1463.

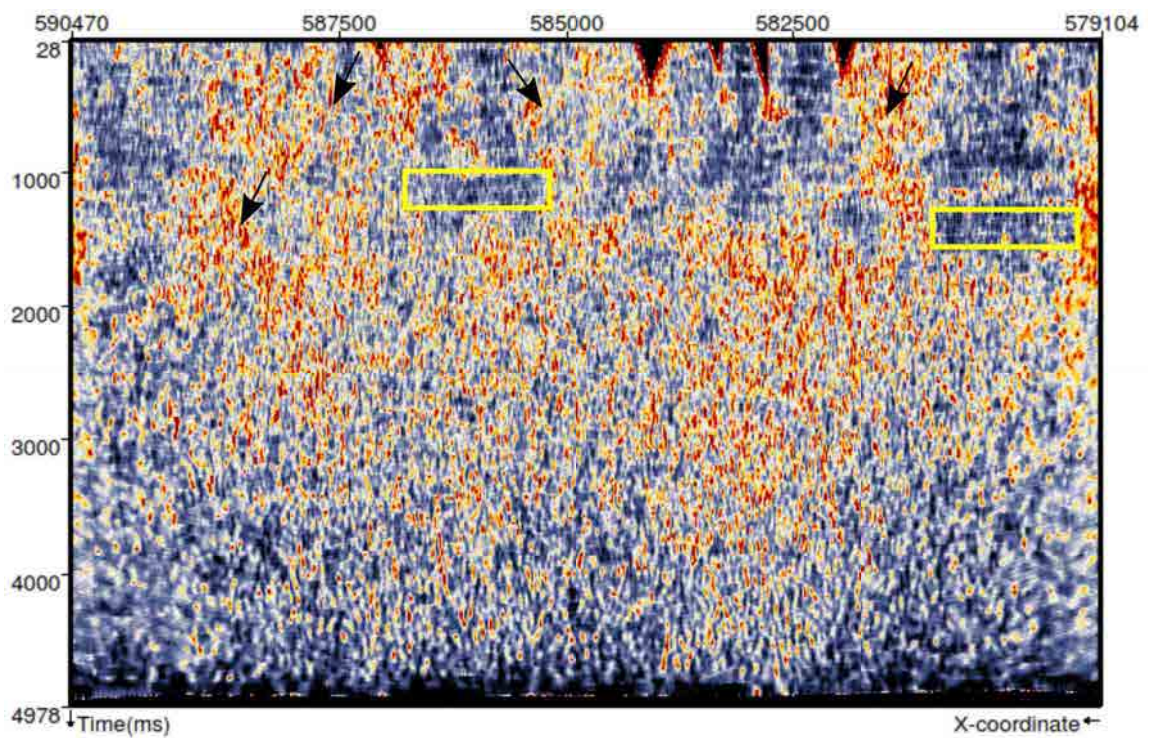


Figura 4.6: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1463.

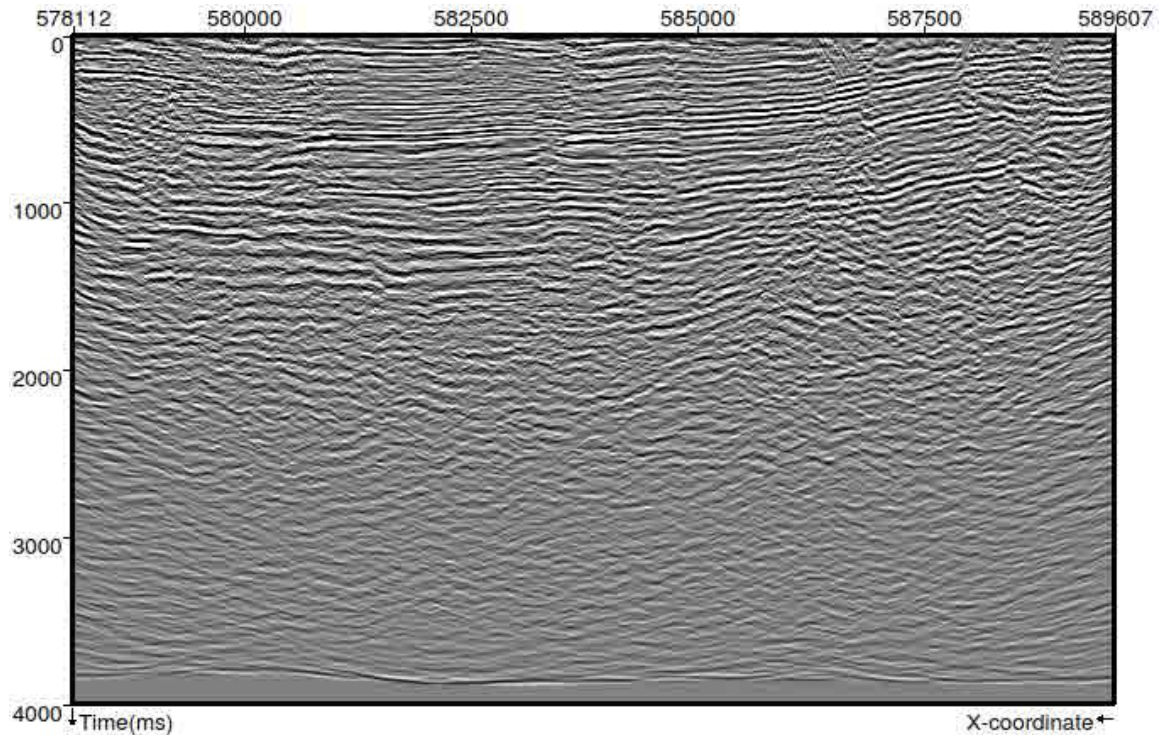


Figura 4.7: Seção sísmica da linha 0026-1407.

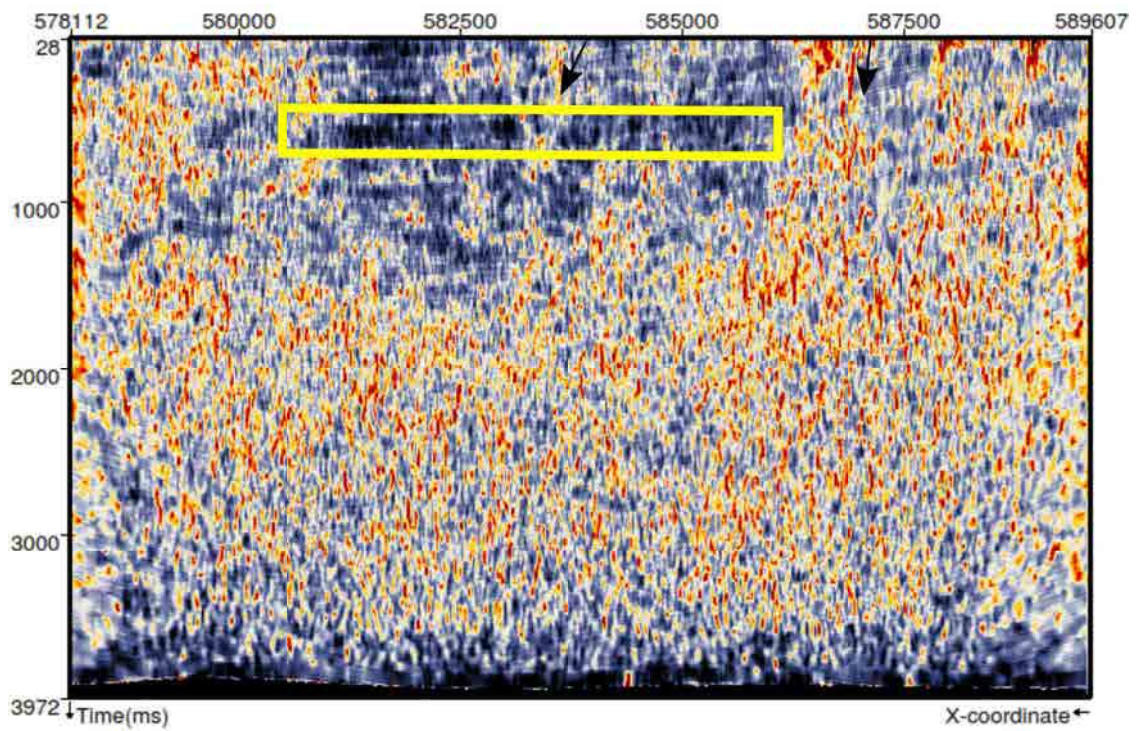


Figura 4.8: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1407.

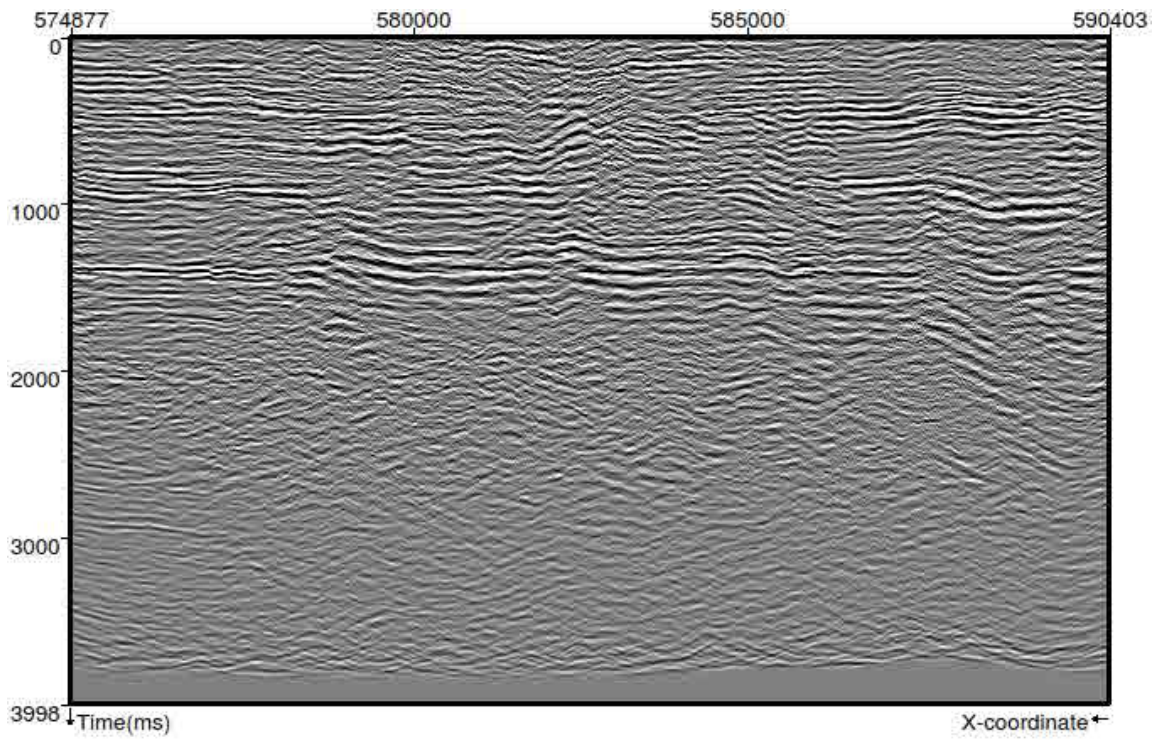


Figura 4.9: Seção sísmica da linha 0227-0006

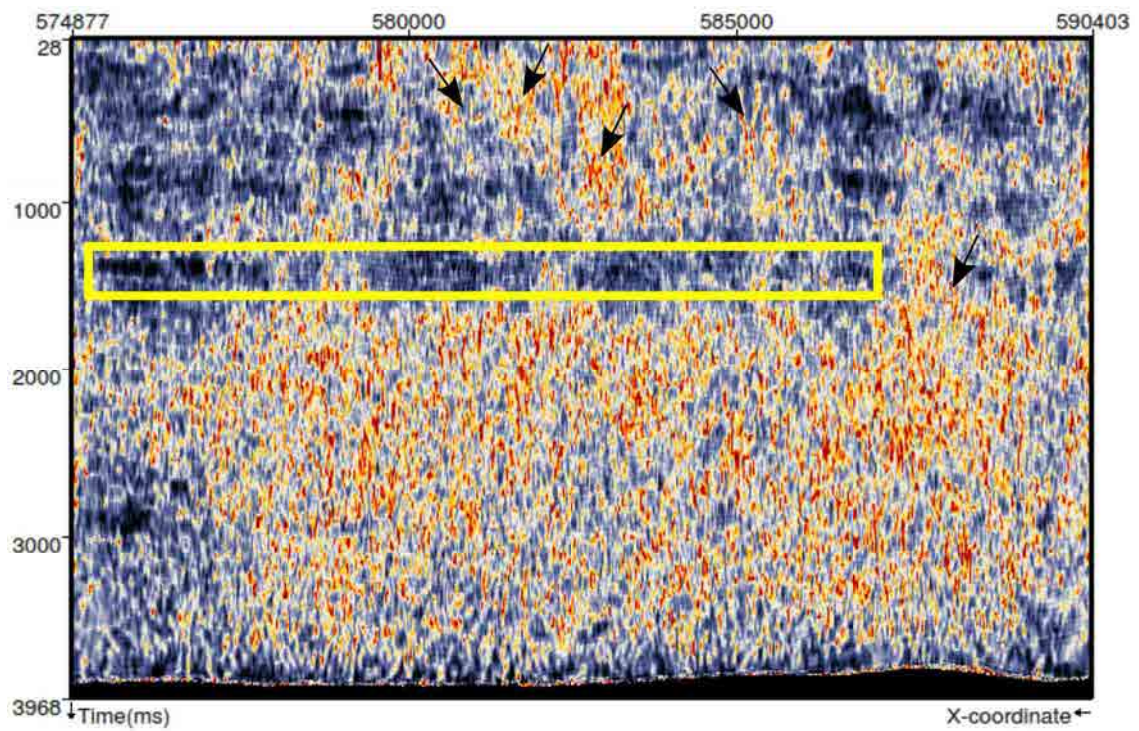


Figura 4.10: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0227-0006.

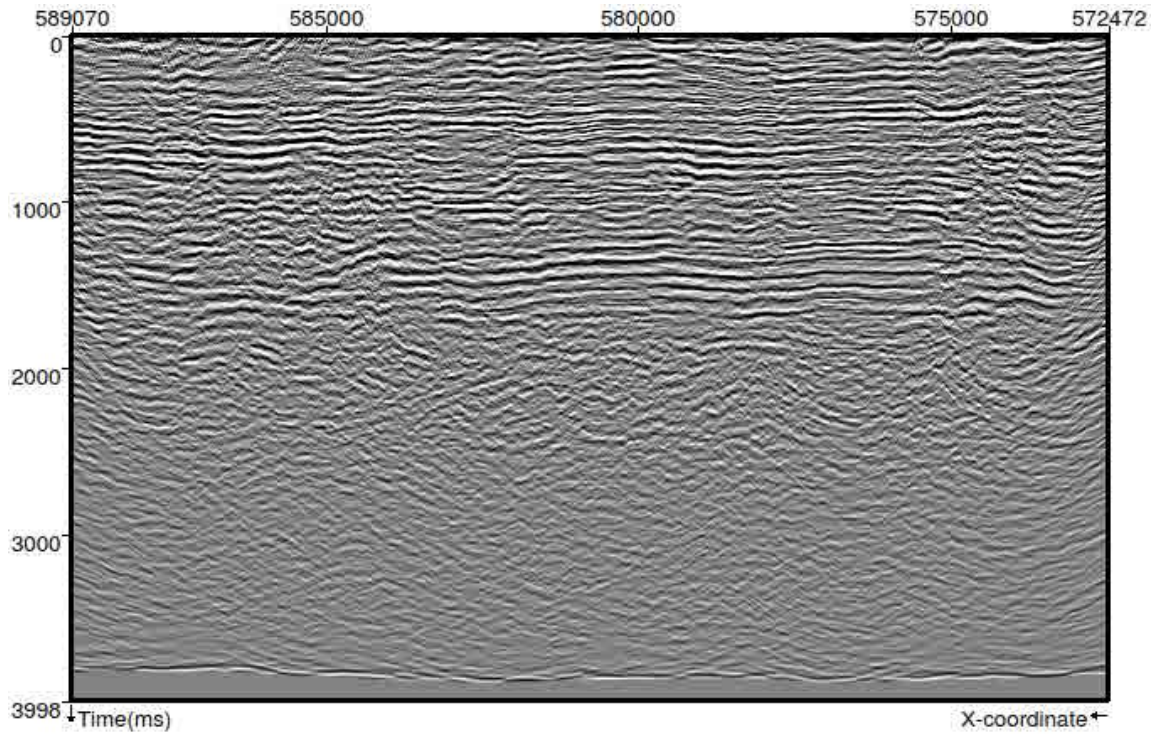


Figura 4.11: Seção sísmica da linha 0227-0007.

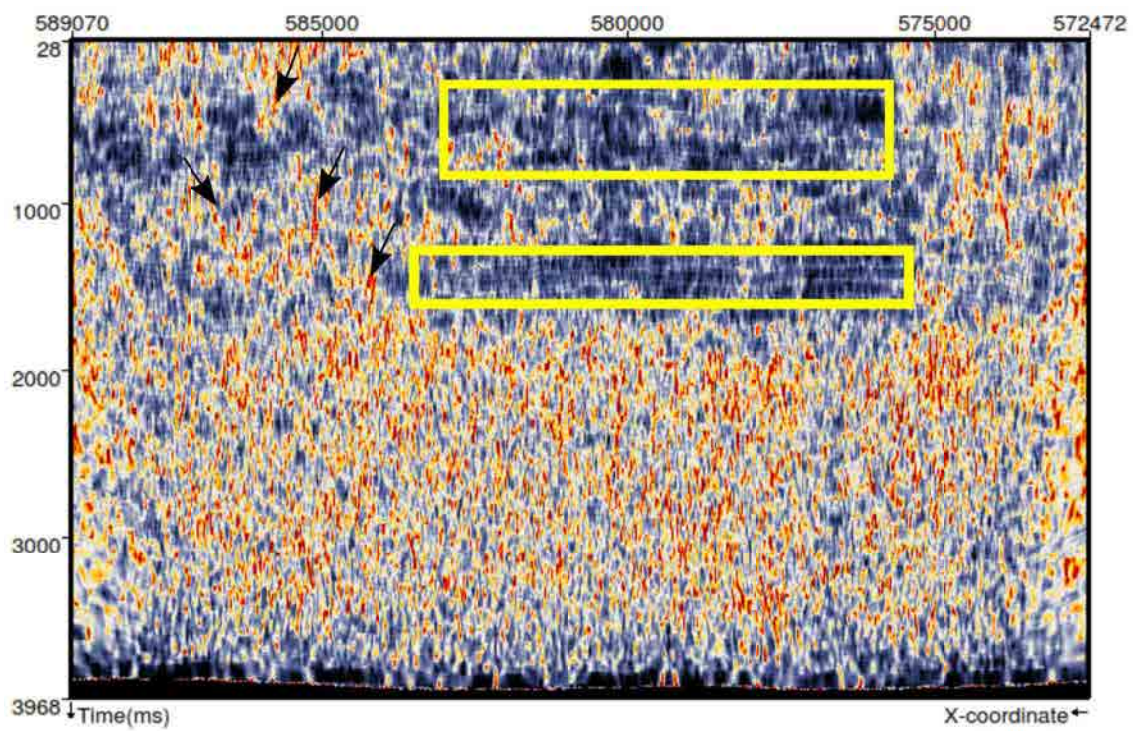


Figura 4.12: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0227-0007.

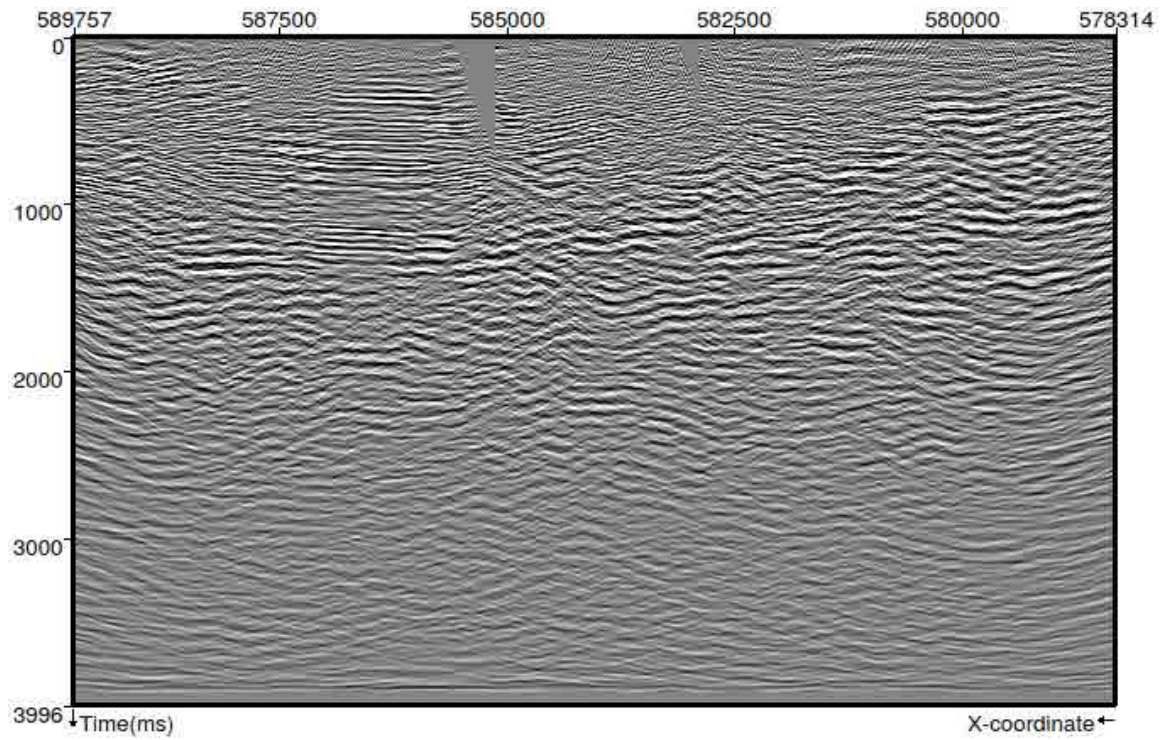


Figura 4.13: Seção sísmica da linha 0026-1172.

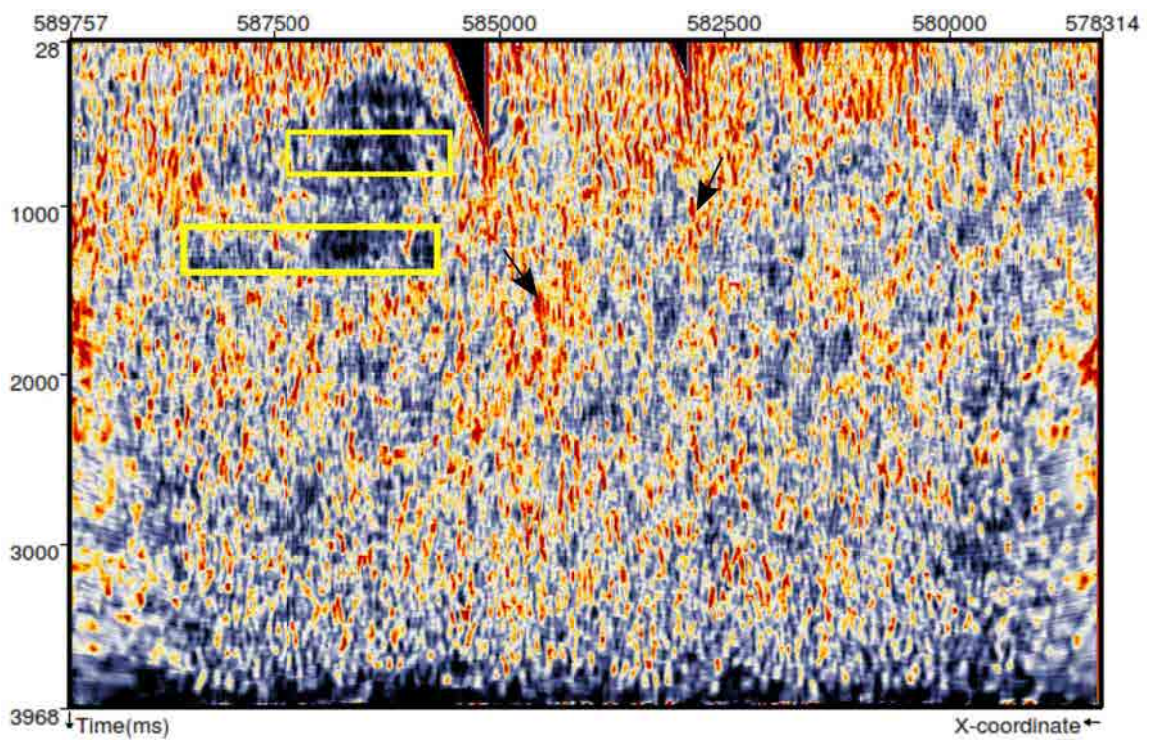


Figura 4.14: Atributo similaridade da seção sísmica da linha 0026-1172.

4.2 Amplitude instantânea

Com esse atributo, os refletores ficaram bem valorizados, implicando em um alto contraste de impedância acústico.

Nas seções sísmicas, essa anomalia de alta amplitude combinada com baixa frequência, sugere uma possível região com acumulação de óleo e gás.

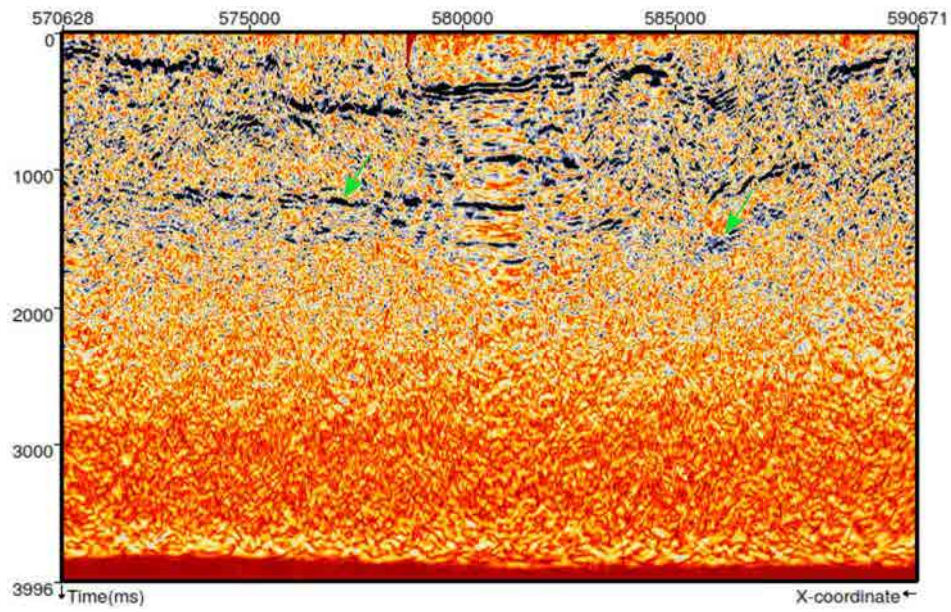


Figura 4.15: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1414.

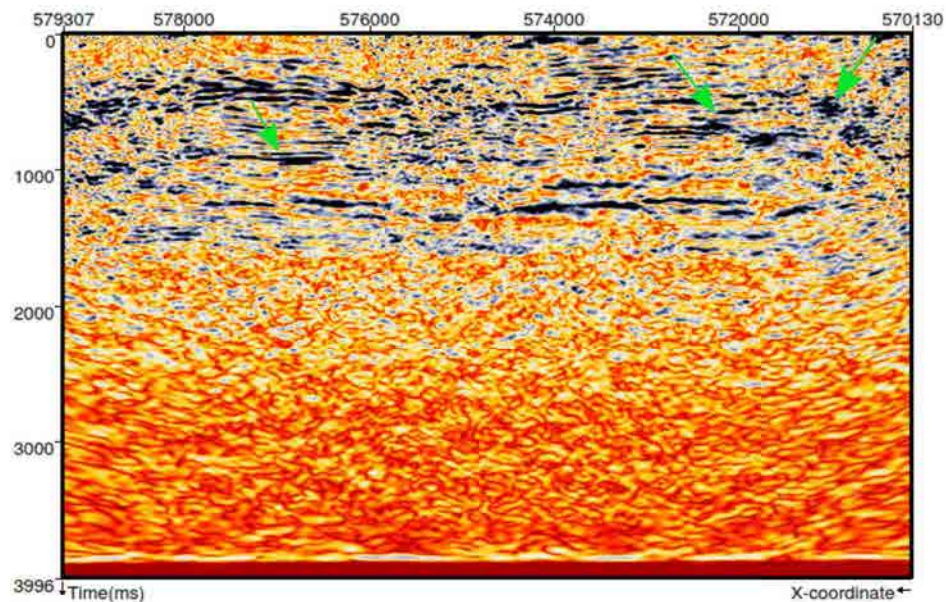


Figura 4.16: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0227-0016.

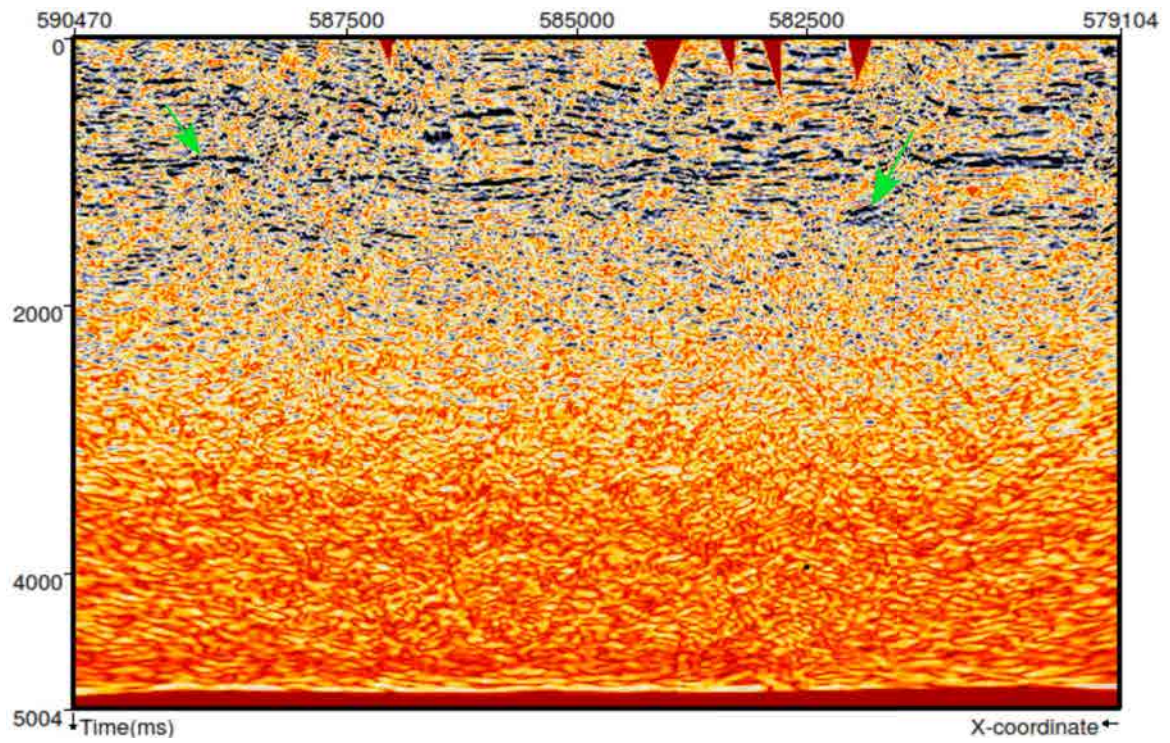


Figura 4.17: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1463.

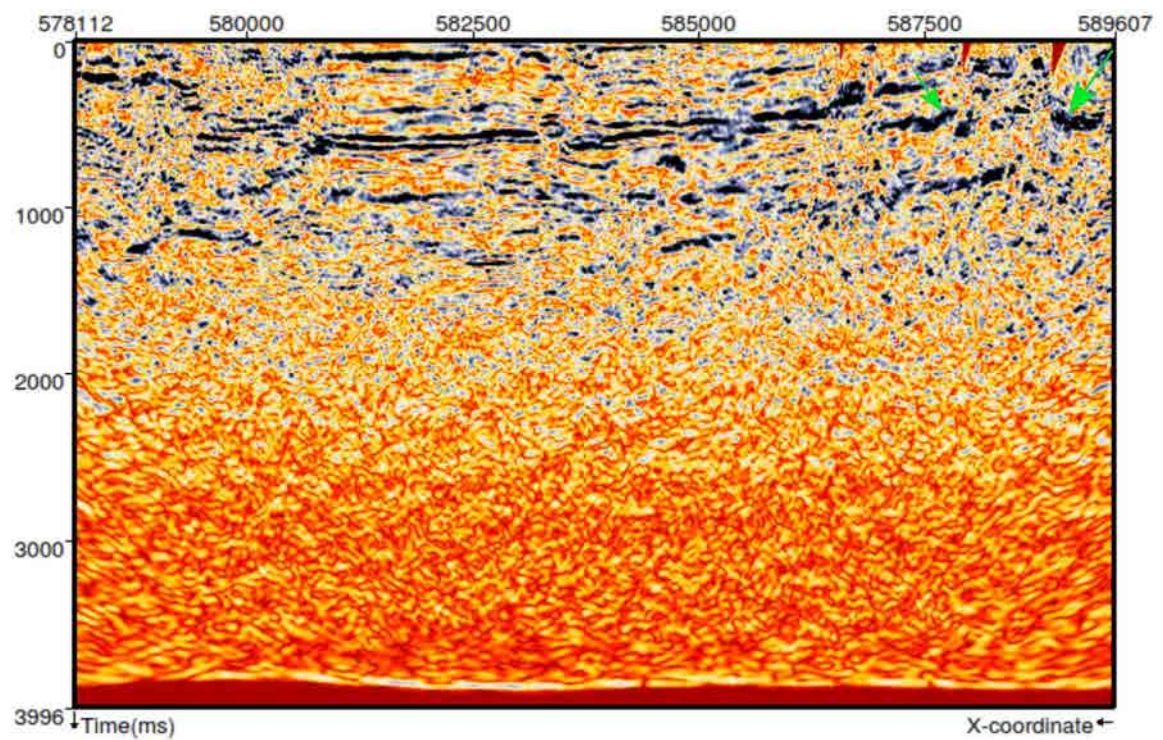


Figura 4.18: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1407.

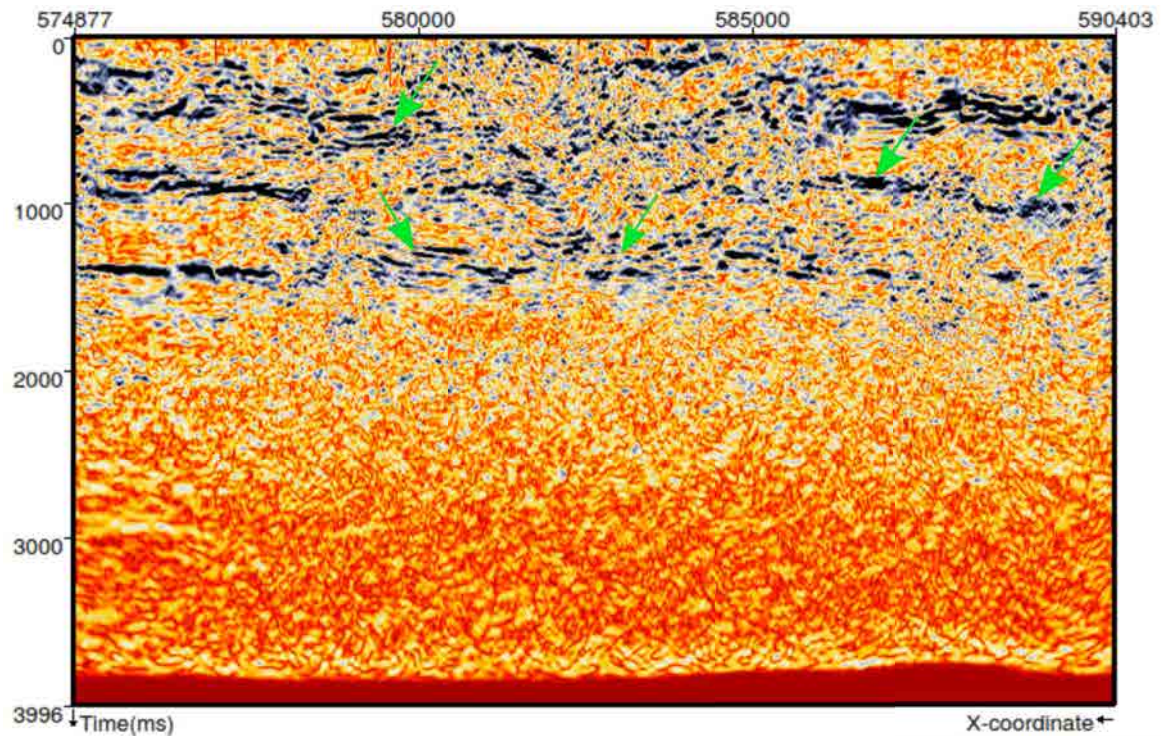


Figura 4.19: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0227-0006.

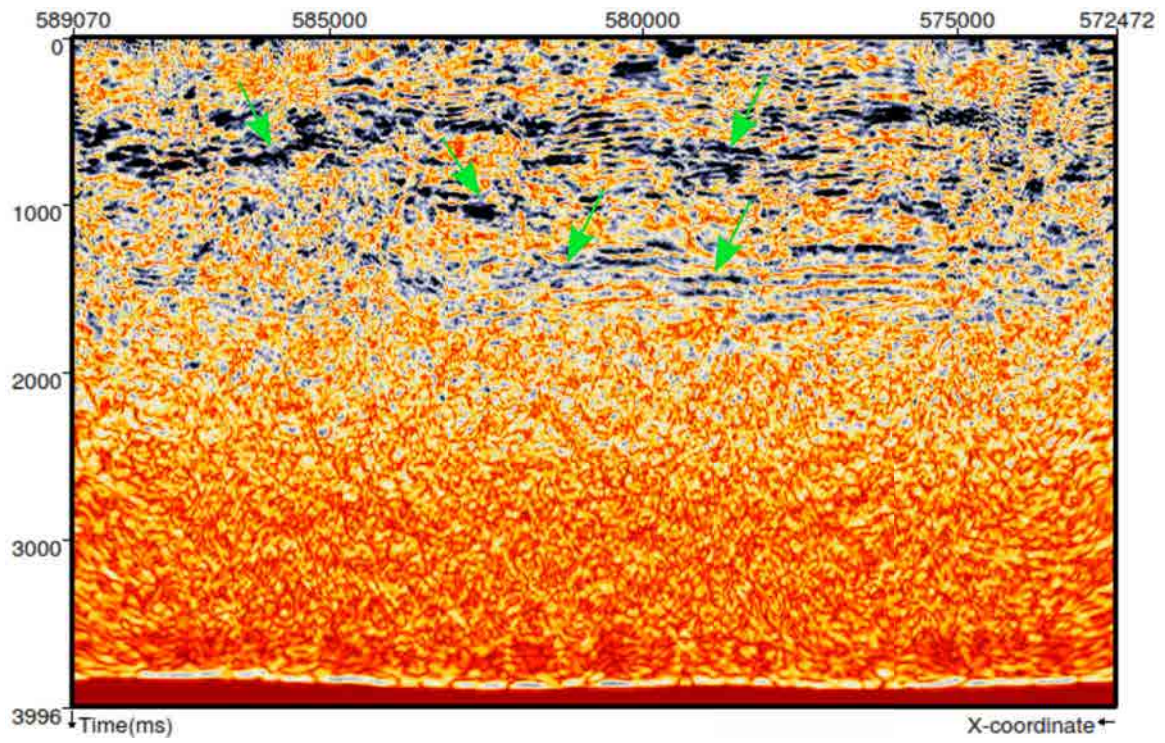


Figura 4.20: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0227-0007.

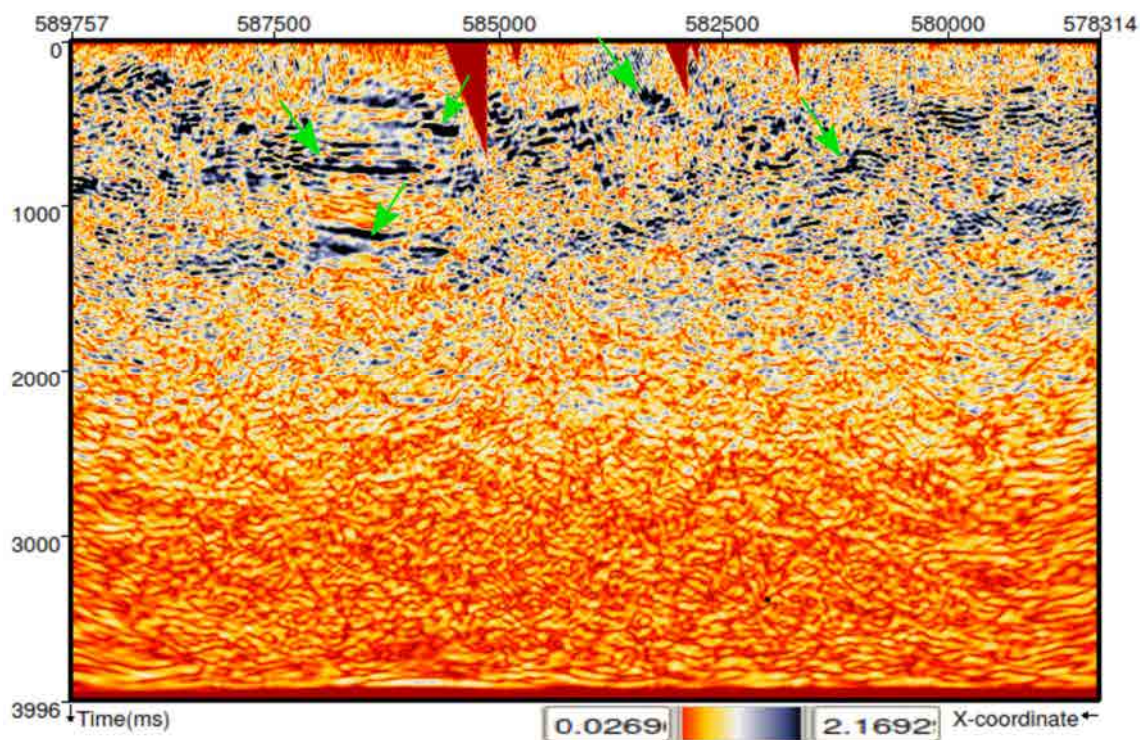


Figura 4.21: Atributo amplitude instantânea da seção sísmica da linha 0026-1172.

4.3 Frequência instantânea

Após a aplicação deste atributo, pôde-se correlacionar nas linhas as regiões de baixa frequência e alta amplitude, afim de mapear uma possível presença de óleo e gás no local (círculos amarelos).

Para a seção da Figura 4.23, a frequência varia de 4-10 Hz com máxima amplitude de 2,6-2,9.

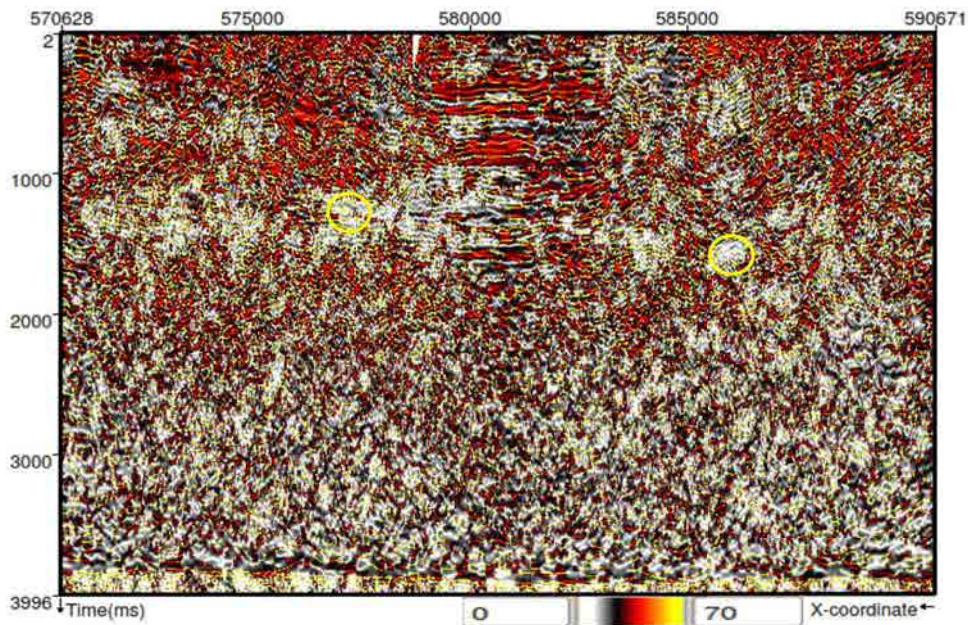


Figura 4.22: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1414.

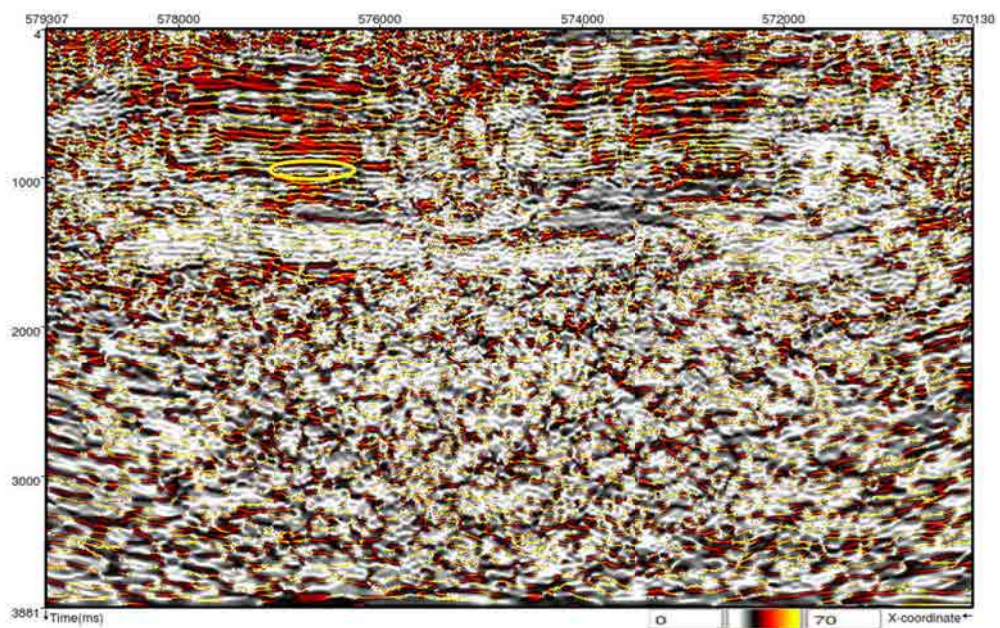


Figura 4.23: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0227-0016.

Com relação à Figura 4.24, a frequência varia de 10-12Hz e máxima amplitude de 2,6-2,8.

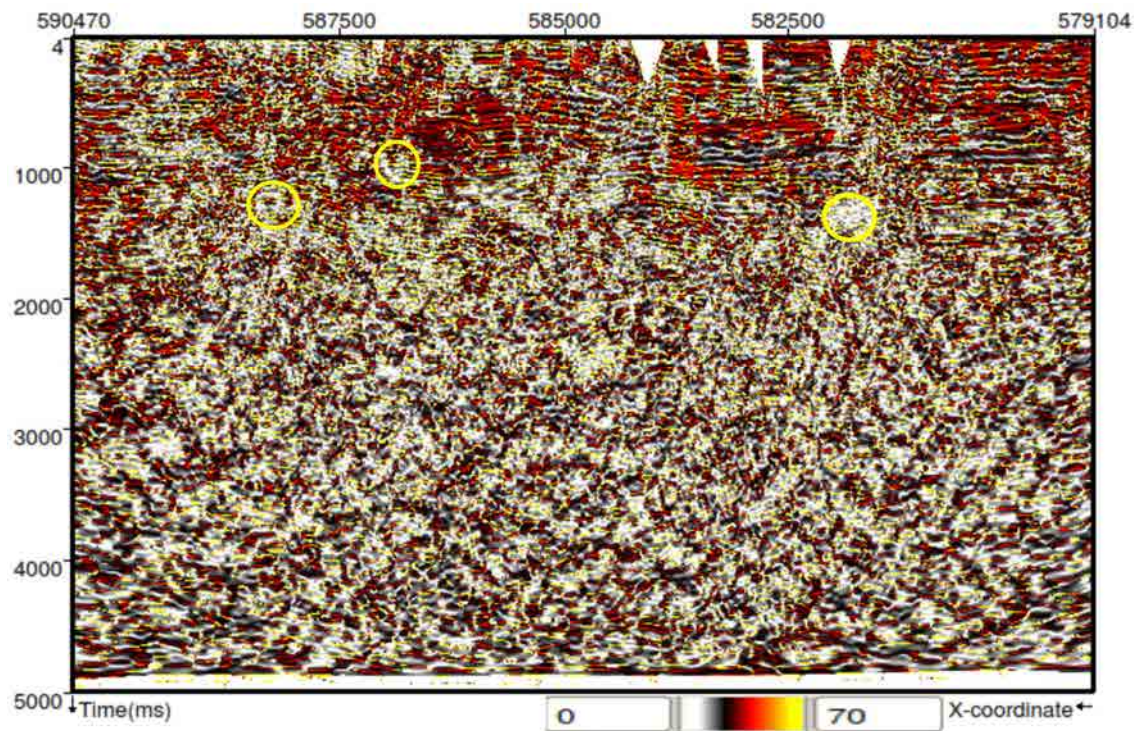


Figura 4.24: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1463.

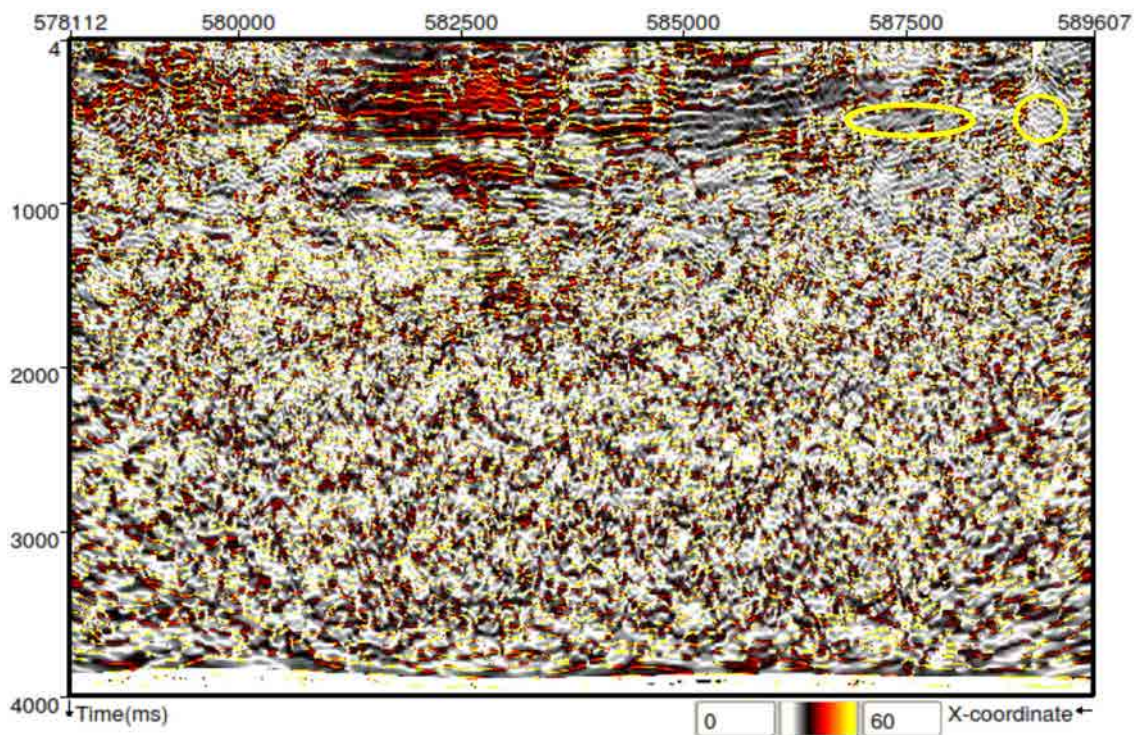


Figura 4.25: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1407.

Para a seção da Figura 4.26, a frequência varia de 15-20 Hz e máxima amplitude de 2,7-2,9 e a Figura 4.27 apresenta baixa frequência variando de 5-10 Hz e máxima amplitude de 2,8.

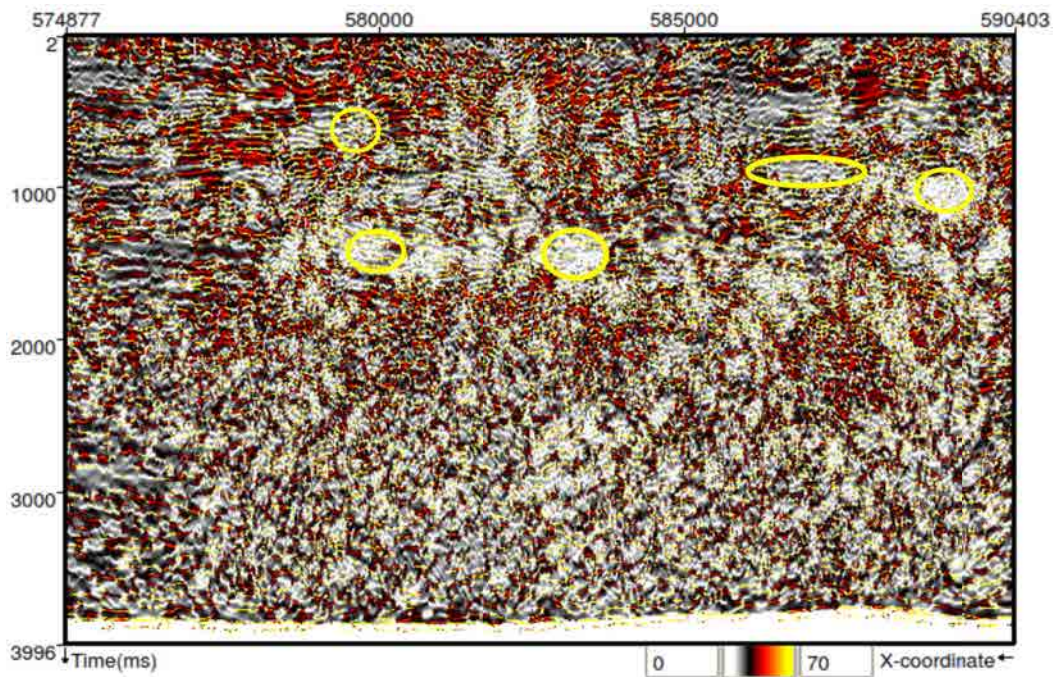


Figura 4.26: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0227-0006.

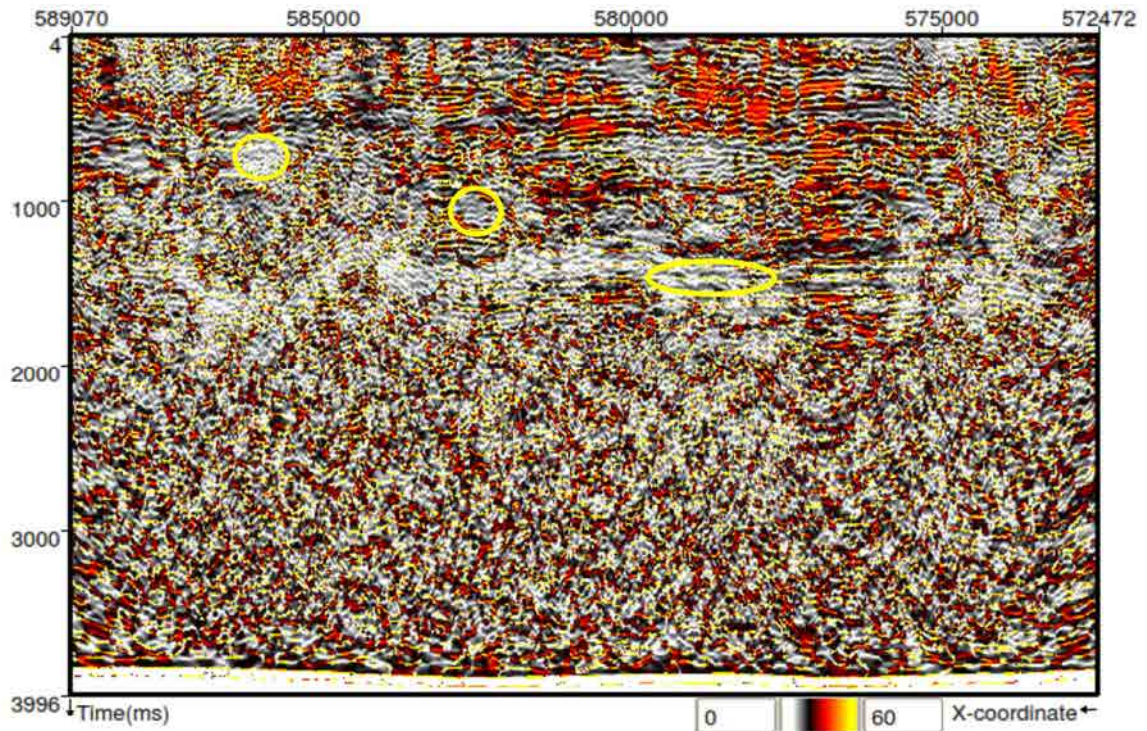


Figura 4.27: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0227-0007.

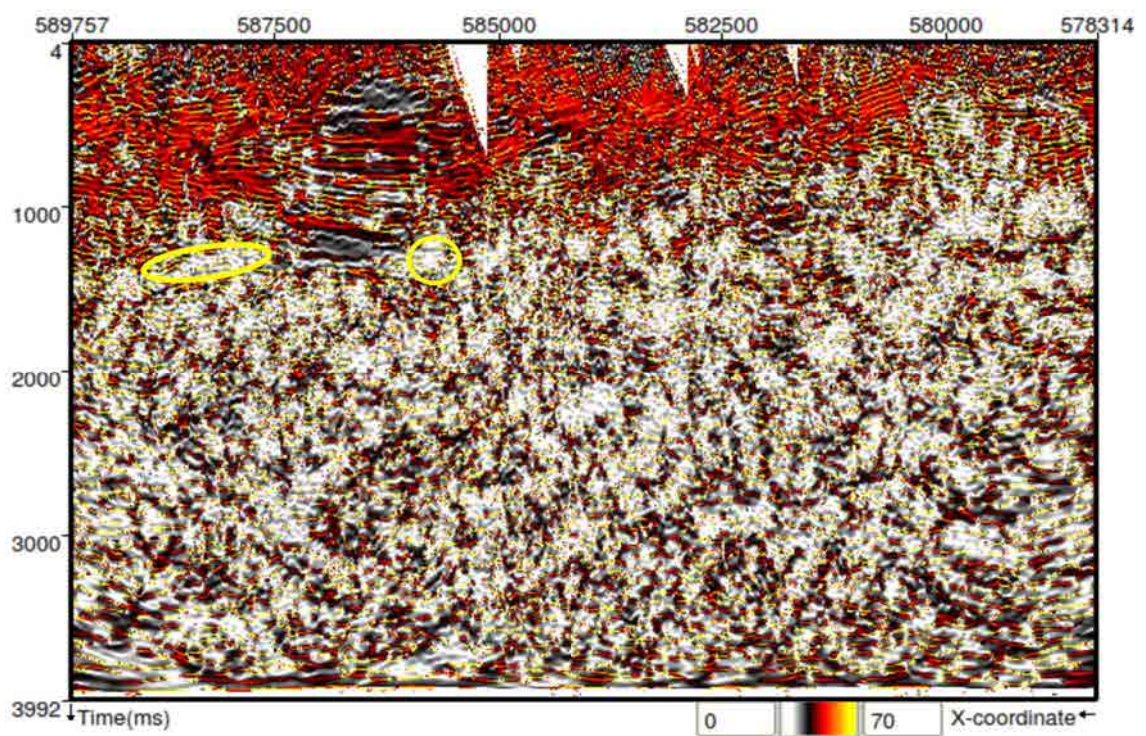


Figura 4.28: Atributo frequência instantânea da seção sísmica da linha 0026-1172.

4.4 Atributo tecVA

O atributo tecVA aplicado deu um aspecto de relevo aos dados, contribuindo com mais detalhes e facilitando o mapeamento das falhas.

Foi possível mapear com este atributo a falha F1 que passa pelas linhas 0026-1414 (Figura 4.29), 0227-0016 (Figura 4.30), 0026-1172 (Figura 4.36), 0026-1463 (Figura 4.31), 0026-1407 (Figura 4.32) e 0227-0006 (Figura 4.33). Essa falha é ilustrada em vermelho nas seções das linhas citadas.

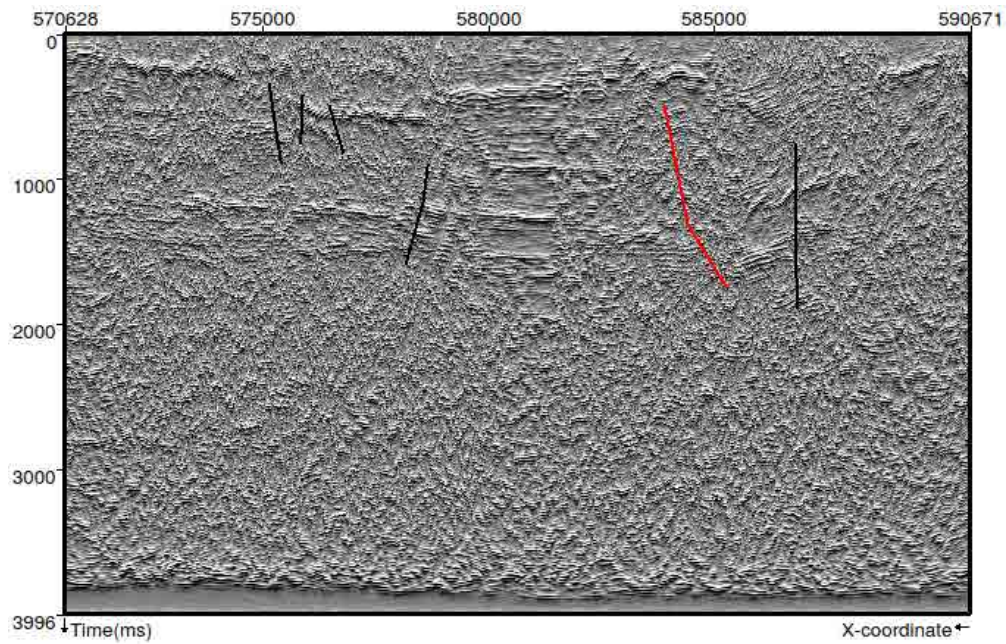


Figura 4.29: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1414.

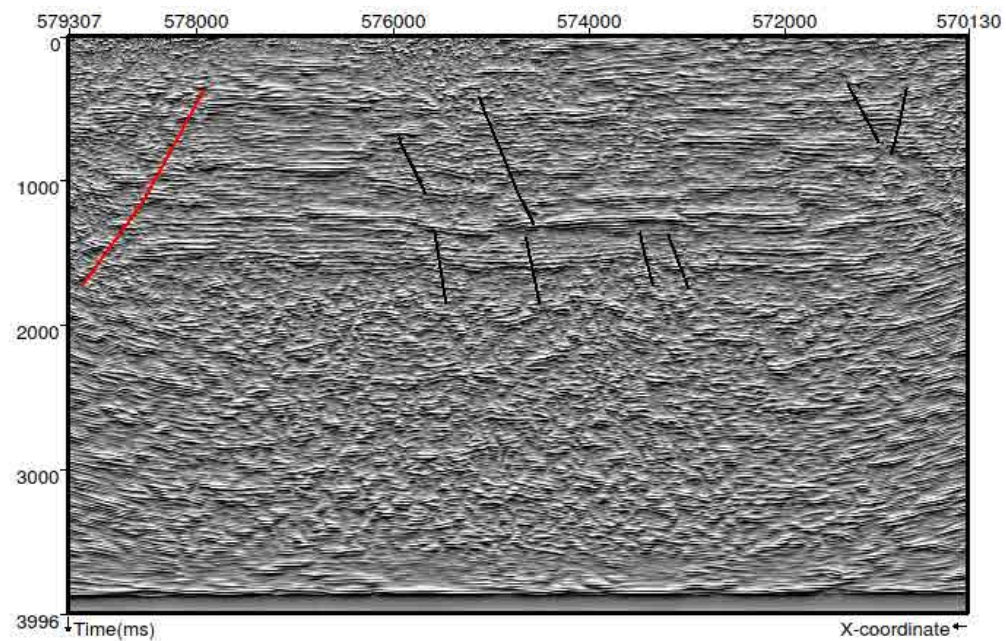


Figura 4.30: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0016.

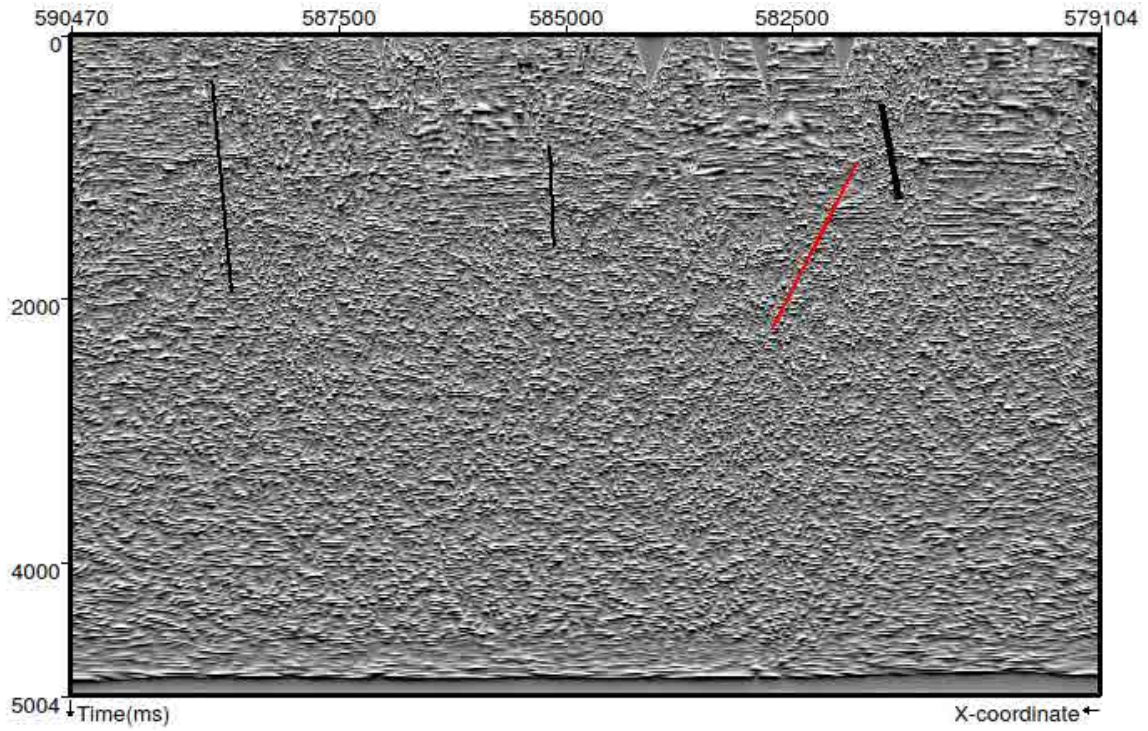


Figura 4.31: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1463.

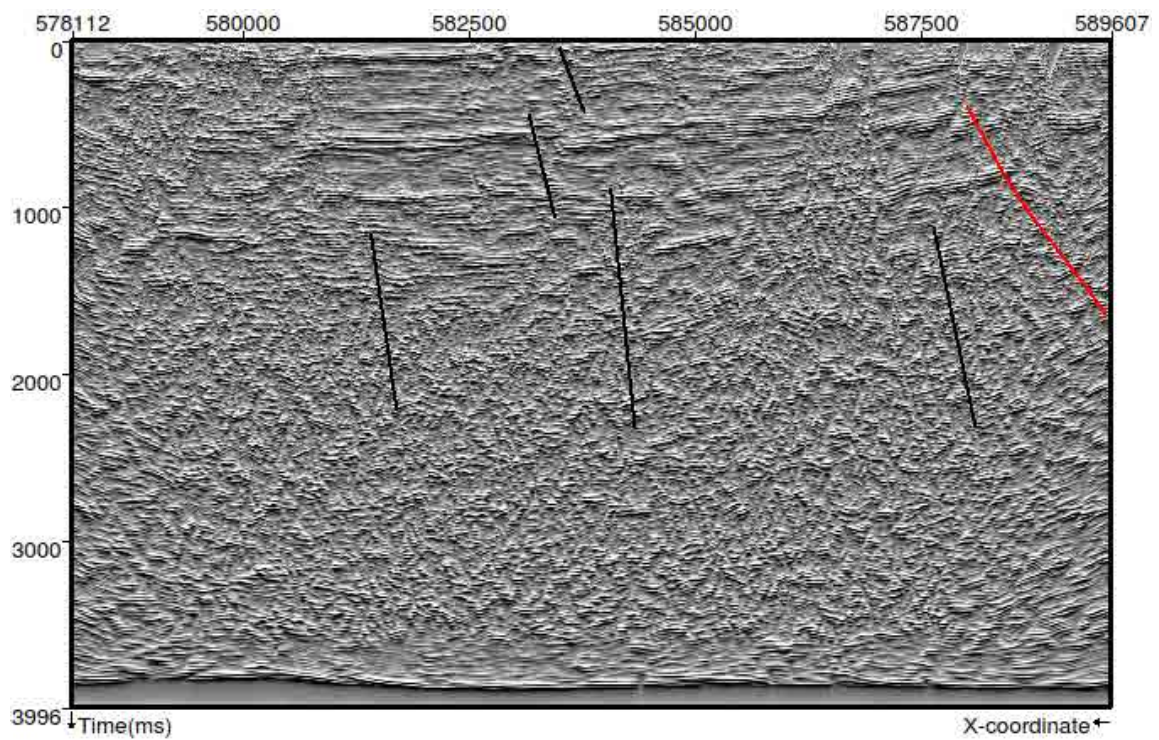


Figura 4.32: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1407.

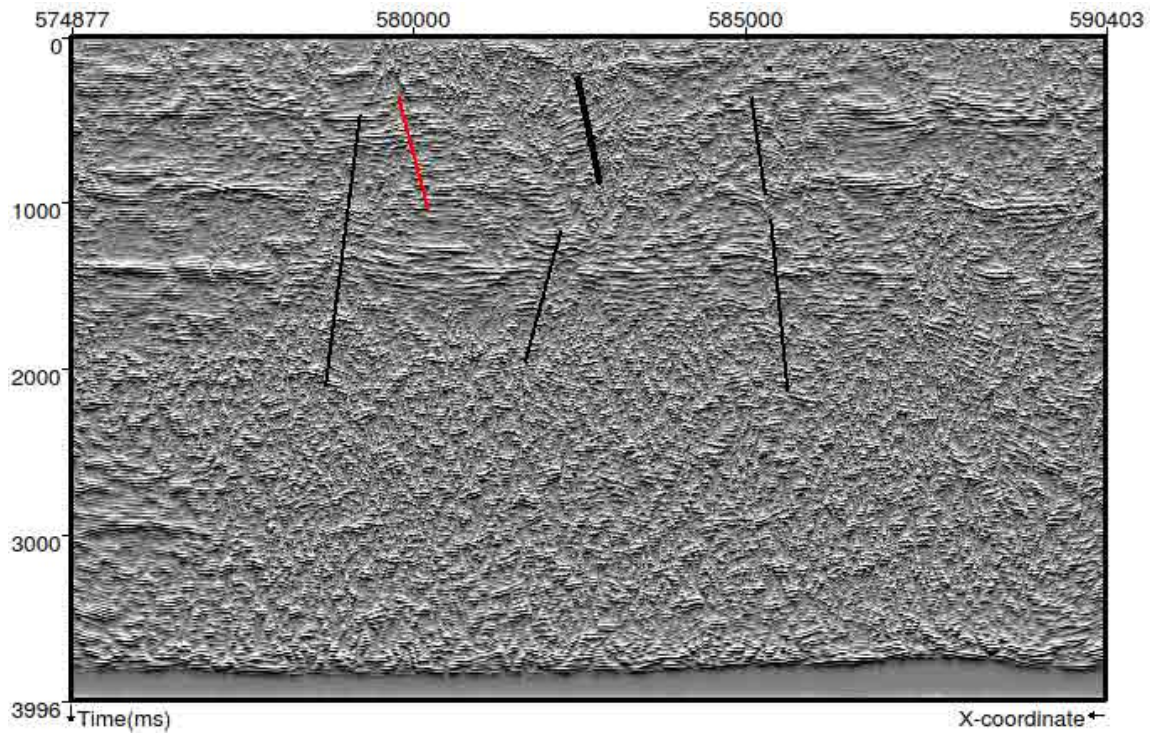


Figura 4.33: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0006.

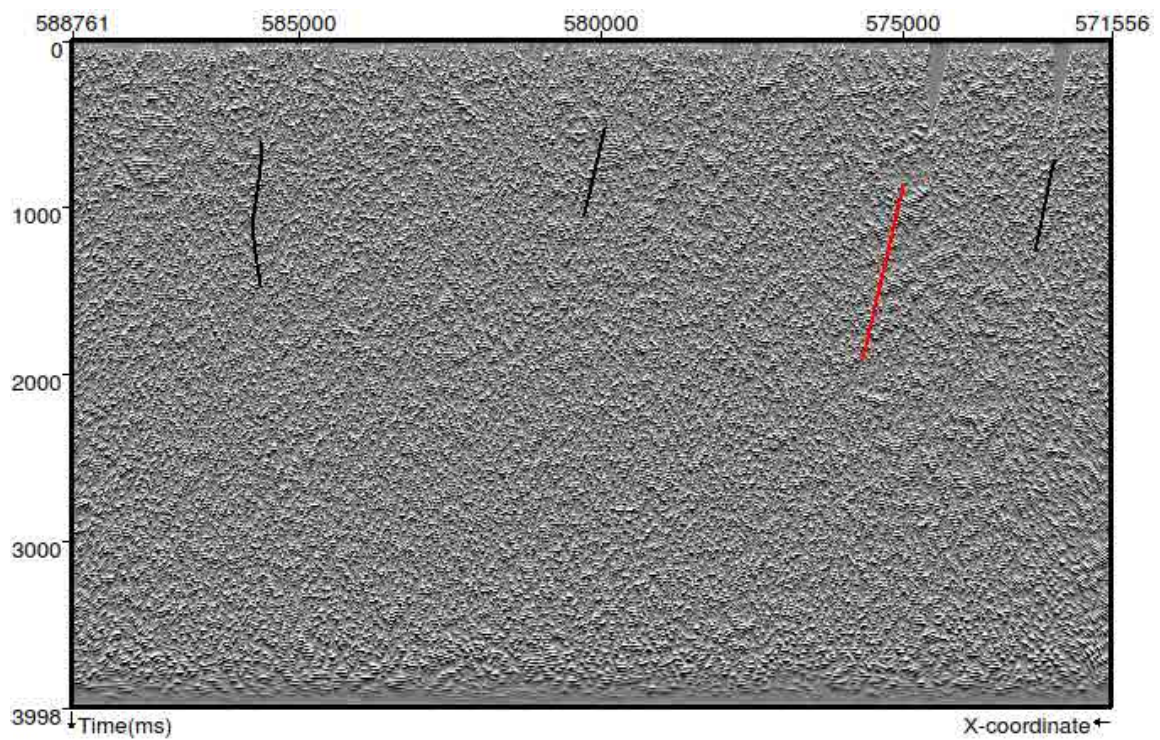


Figura 4.34: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0018 processada.

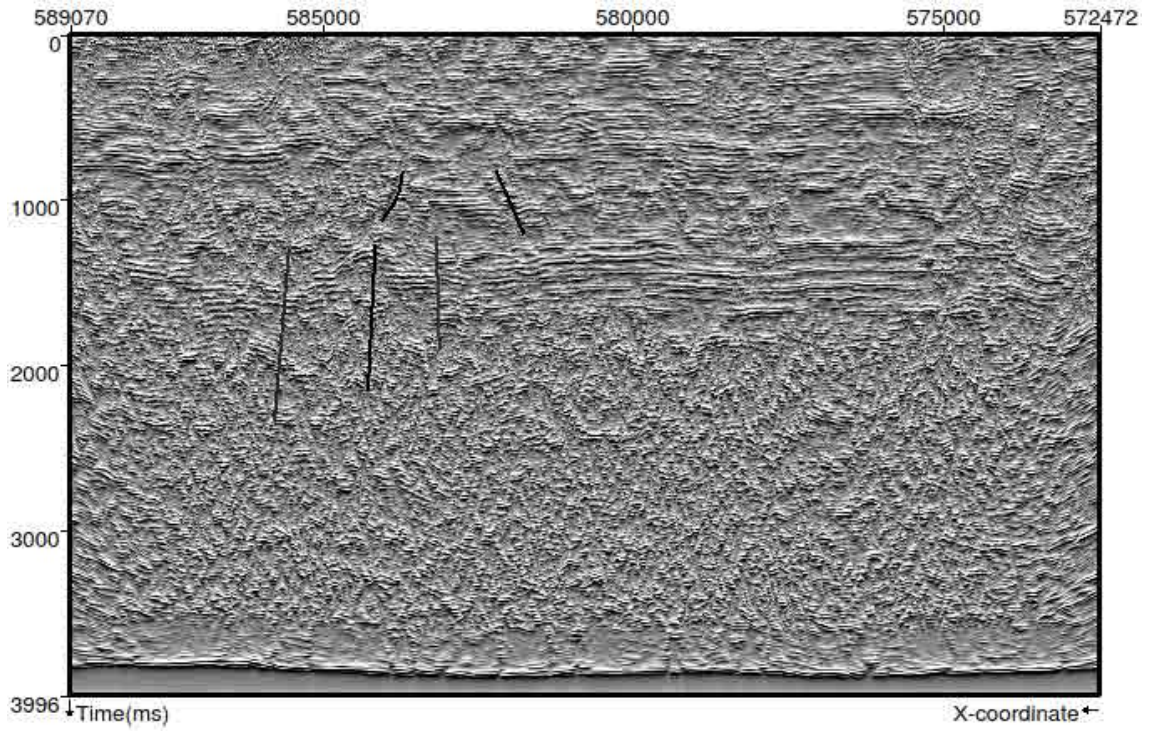


Figura 4.35: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0227-0007.

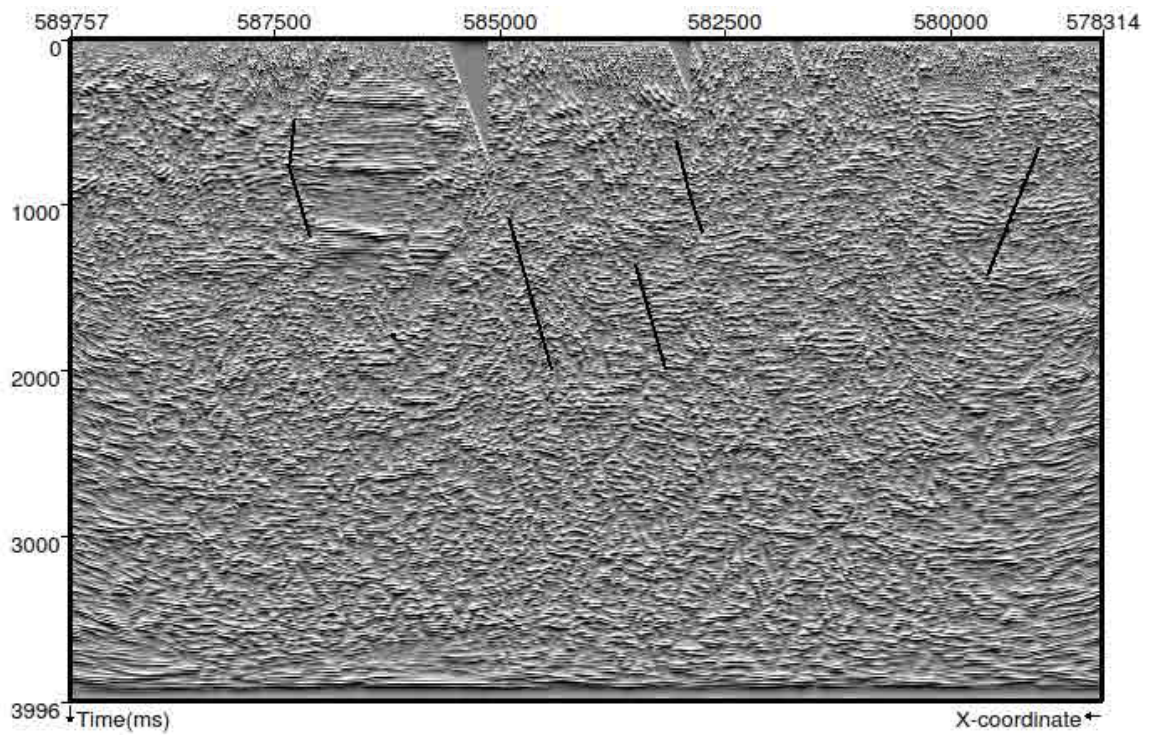


Figura 4.36: Atributo tecVA da seção sísmica da linha 0026-1172.

Após o mapeamento das falhas, foi obtido o plano da falha F1 que passa pelas linhas anteriormente citadas. O *software OpendTect* faz a interpolação dos pontos da falha mapeada em cada linha e, após isso, é projetado o plano de falha (Figura 4.37).

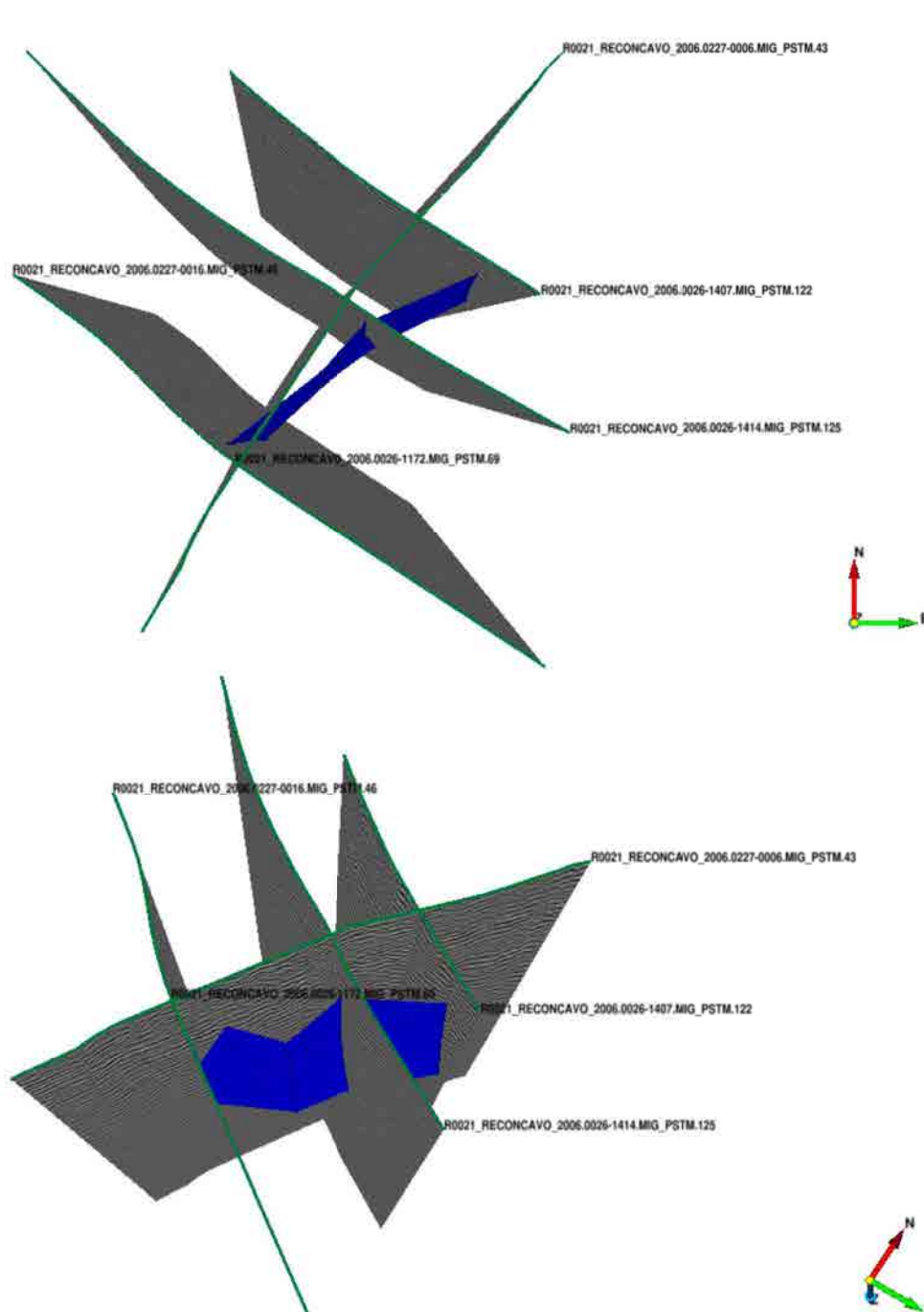


Figura 4.37: Representação geral do plano de falha (acima) e do caimento do plano de falha (abaixo).

Observando a figura acima, nota-se que o caimento do plano é para SE. Ao correlacionar essa região com o mapa estrutural da bacia (ver Figura 1.2 do capítulo 1), conclui-se que coincide com a região mais profunda, referente ao Baixo de Miranga.

4.5 Fase instantânea

Por enfatizar a continuidade dos refletores, uma vez que os contrastes de amplitude foram removidos, o resultado da aplicação deste atributo foi bastante útil para a delimitação dos horizontes referentes aos topos do embasamento (em vermelho) e do pré-rifte (em amarelo). O atributo também foi satisfatório para rastrear as descontinuidades. Nota-se que em todas as seções, ilustradas nas figuras a seguir, os refletores foram ressaltados após o uso do atributo. Isso facilitou principalmente a identificação do horizonte relacionado ao topo do embasamento, uma vez que os refletores abaixo se apresentam de forma irregular, descontínua.

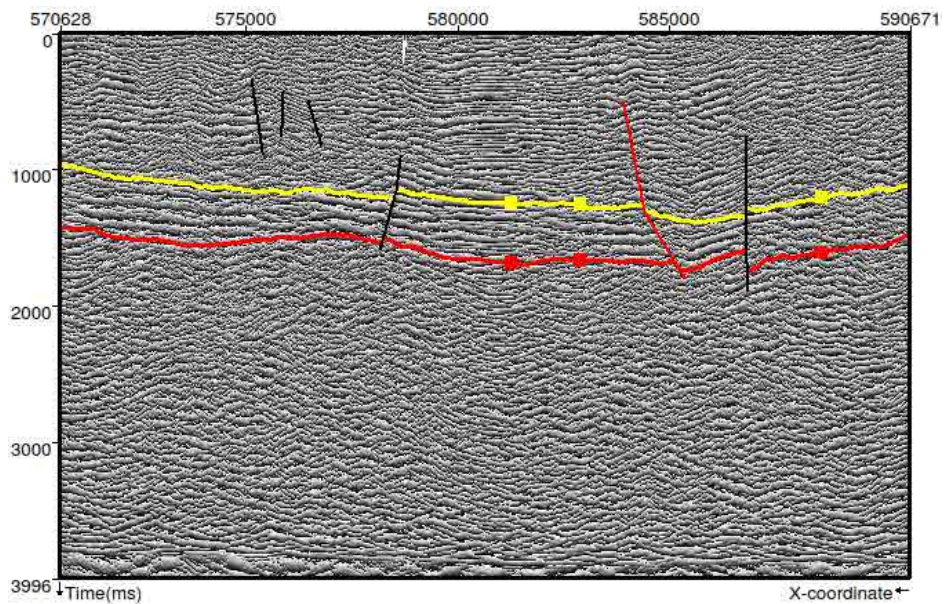


Figura 4.38: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1414.

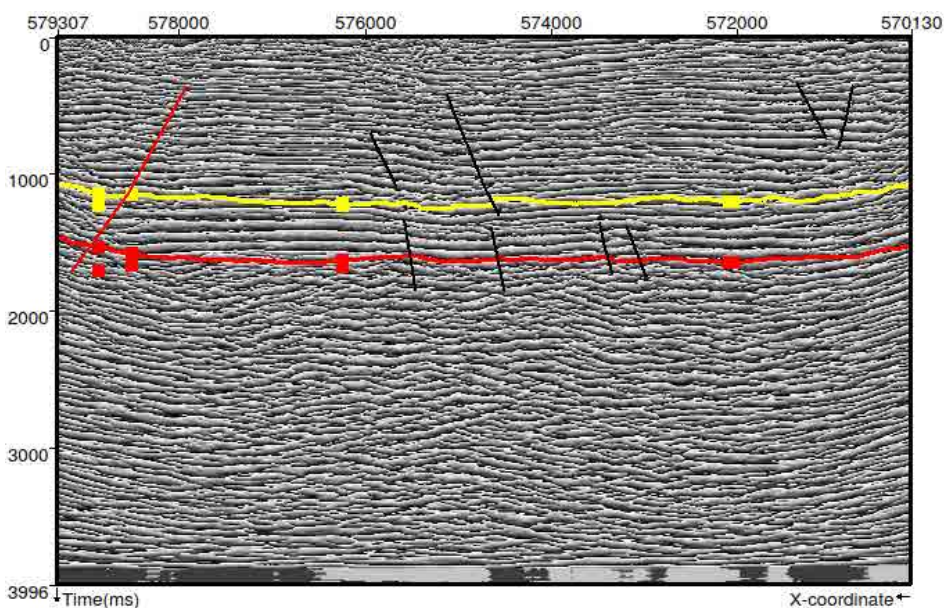


Figura 4.39: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0016.

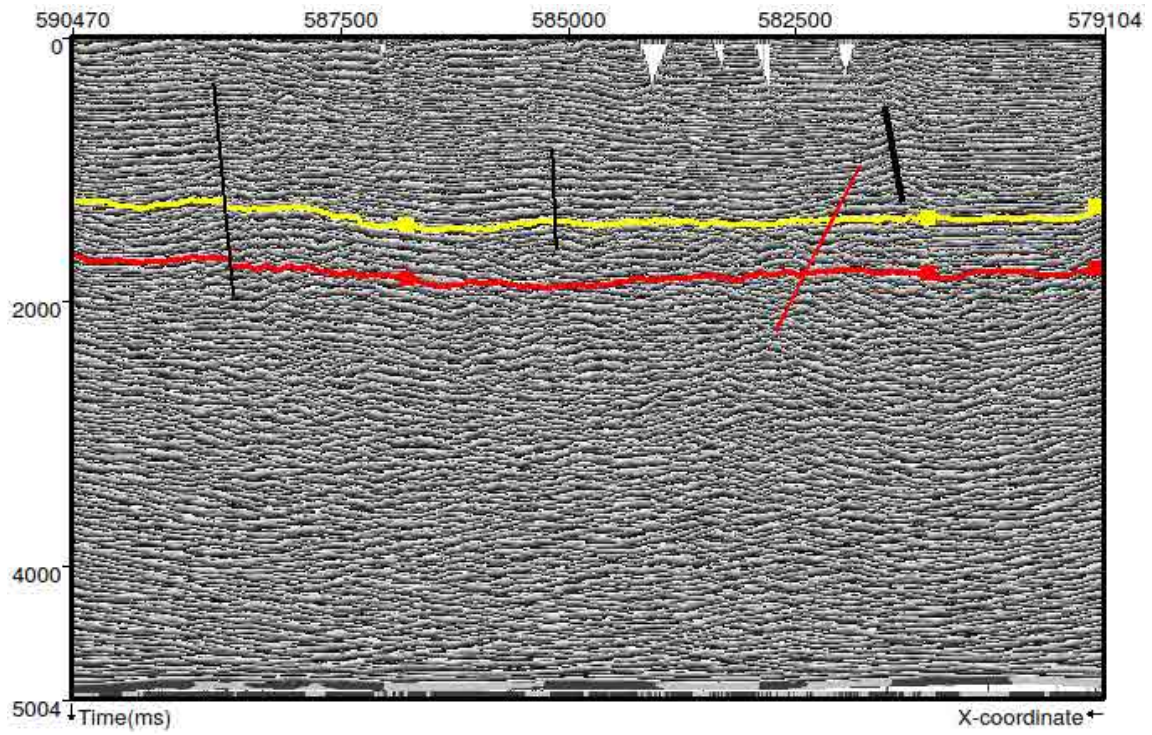


Figura 4.40: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1463.

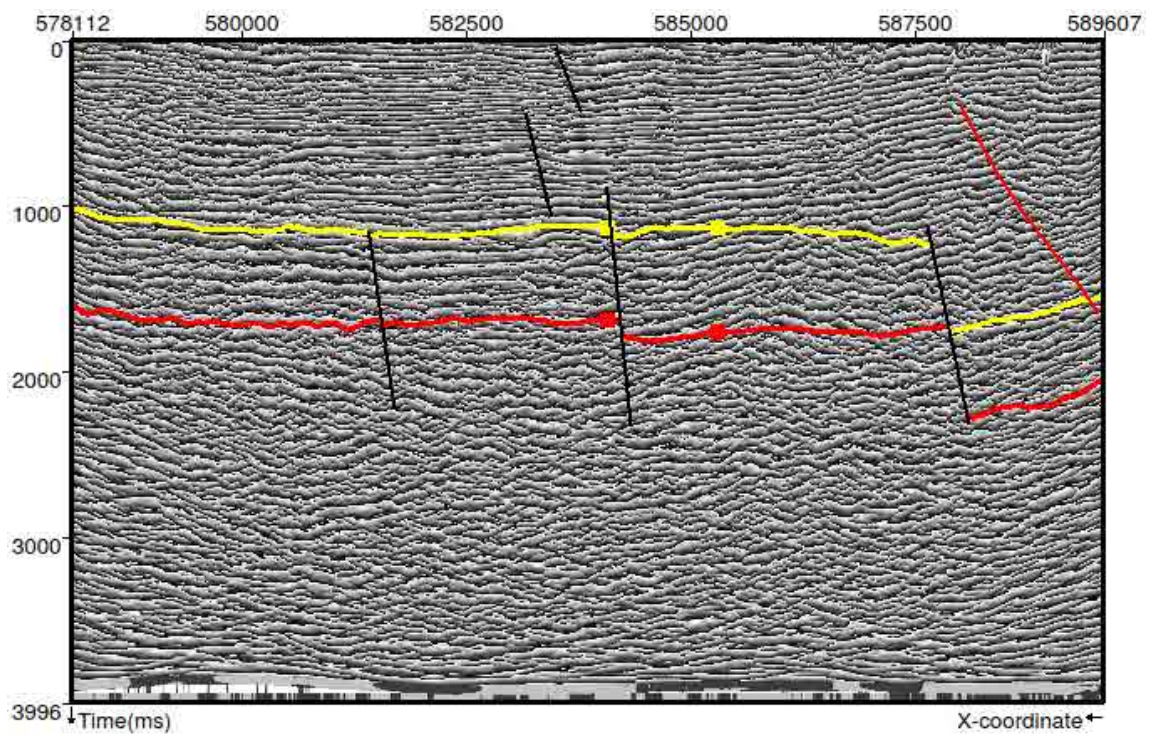


Figura 4.41: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1407.

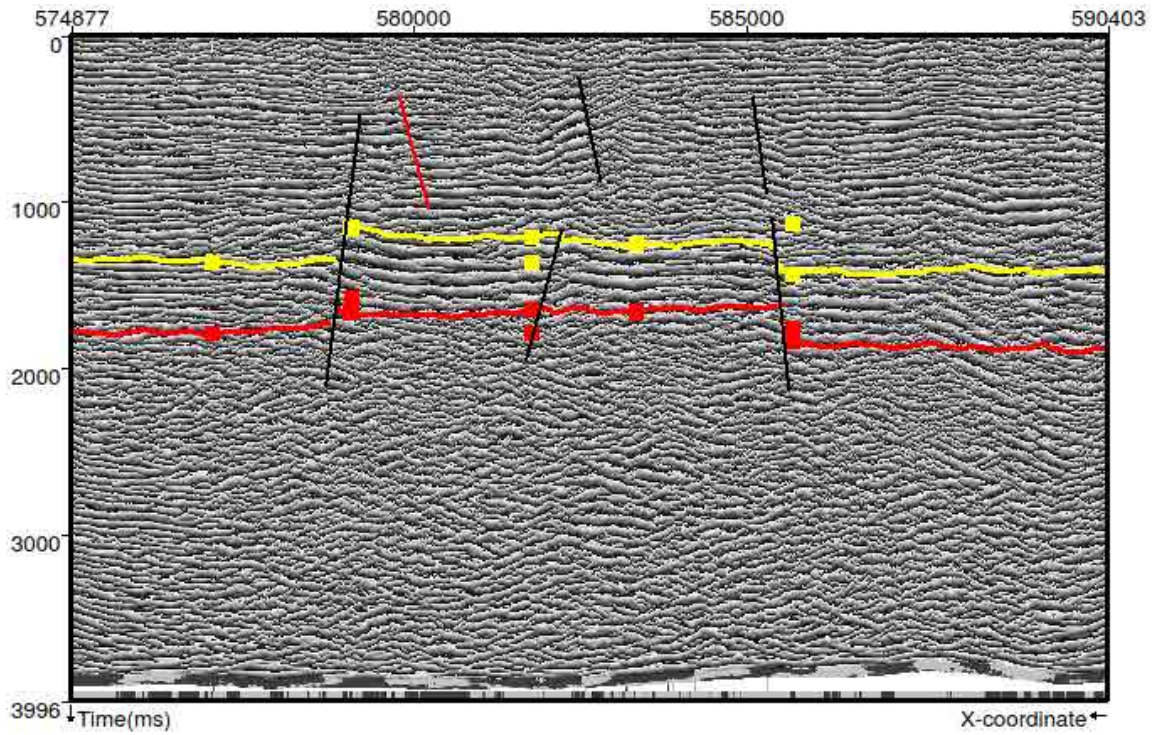


Figura 4.42: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0006.

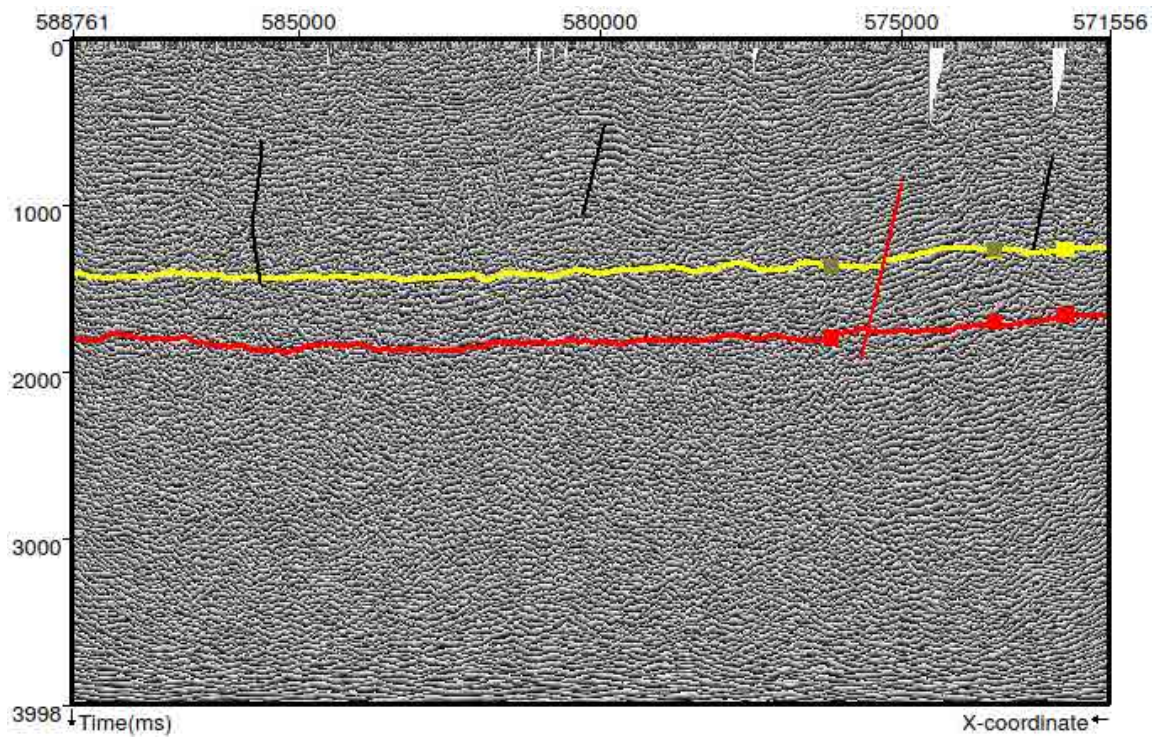


Figura 4.43: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0018 processada.

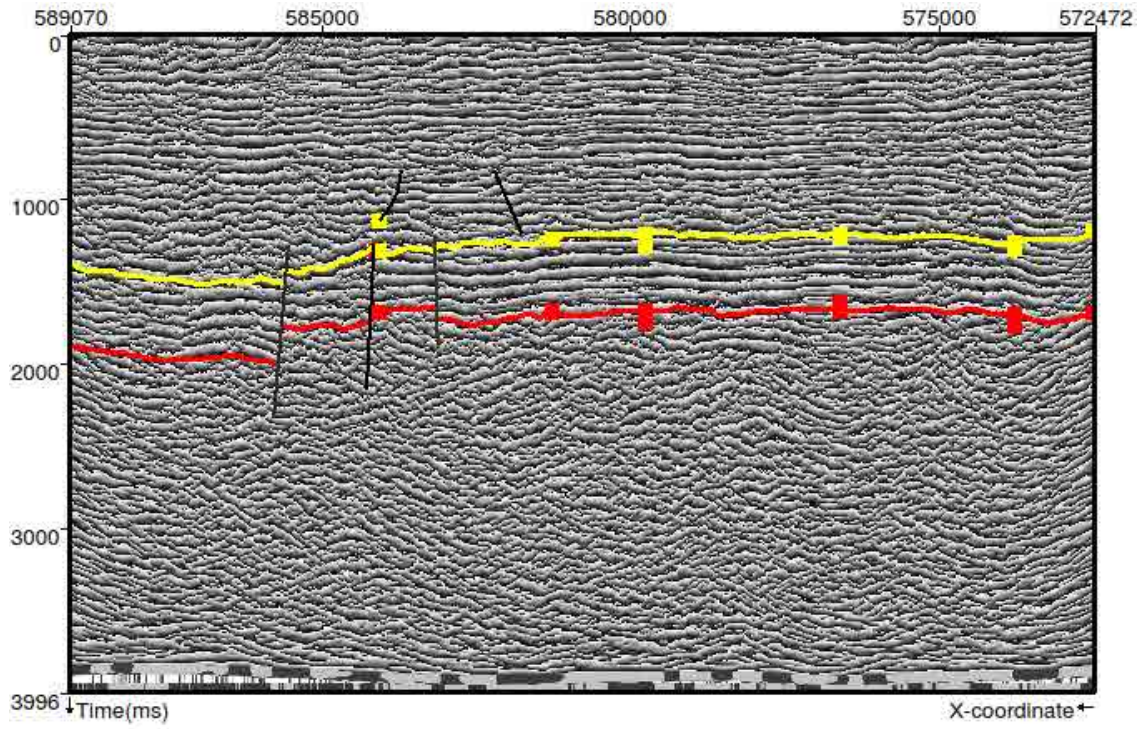


Figura 4.44: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0227-0007.

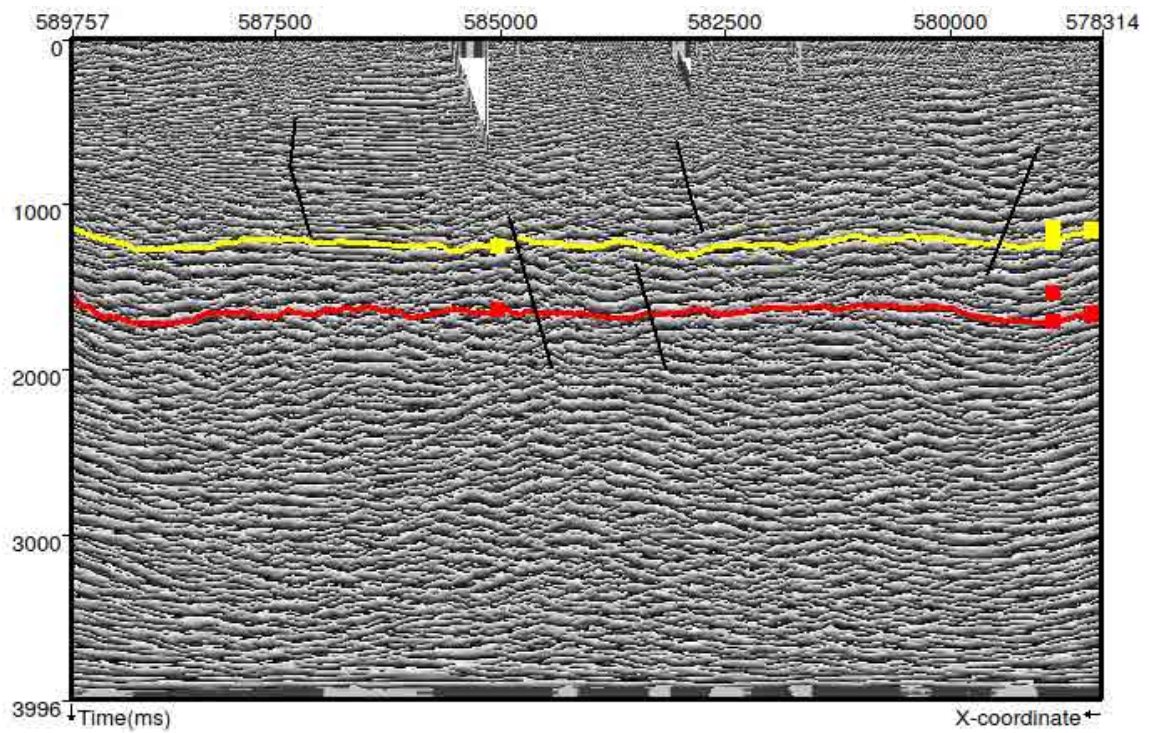


Figura 4.45: Atributo fase instantânea da seção sísmica da linha 0026-1172.

Foram gerados, a partir do mapeamento dos horizontes referentes ao topos do embasamento e do pré-rifte, os mapas em tempo sísmico (em segundos) de superfície de topo estrutural do embasamento e de superfície de topo estrutural do pré-rifte.

A Figura 4.46 mostra a representação dessas duas superfícies e do plano de falha.

Observa-se na Figura 4.47 que o caimento do plano de falha é na direção das regiões mais profundas (em vermelho). Em azul têm-se as regiões mais rasas. A falha corta ambas as superfícies.

Não há grandes variações entre as superfícies do topo do pré-rifte e do embasamento em relação à disposição no mapa das regiões mais rasas e profundas. Em geral, os mapas aprofundam para NE e SE, onde se tem as maiores espessuras. As curvas de valores de Z chegam a 1766 *ms* para a superfície de topo do pré-rifte e a 2287 *ms* para a superfície de topo do embasamento.

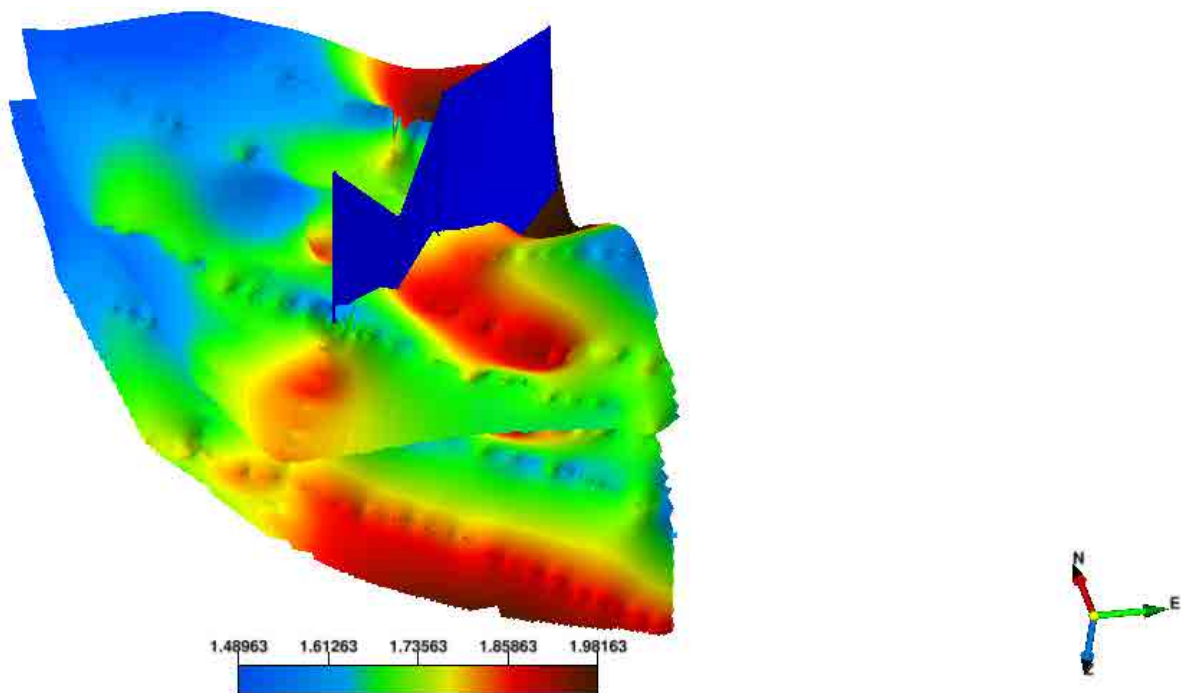


Figura 4.46: Representação das superfícies de topo estrutural do pré-rifte (horizonte superior) e topo do embasamento (horizonte inferior).

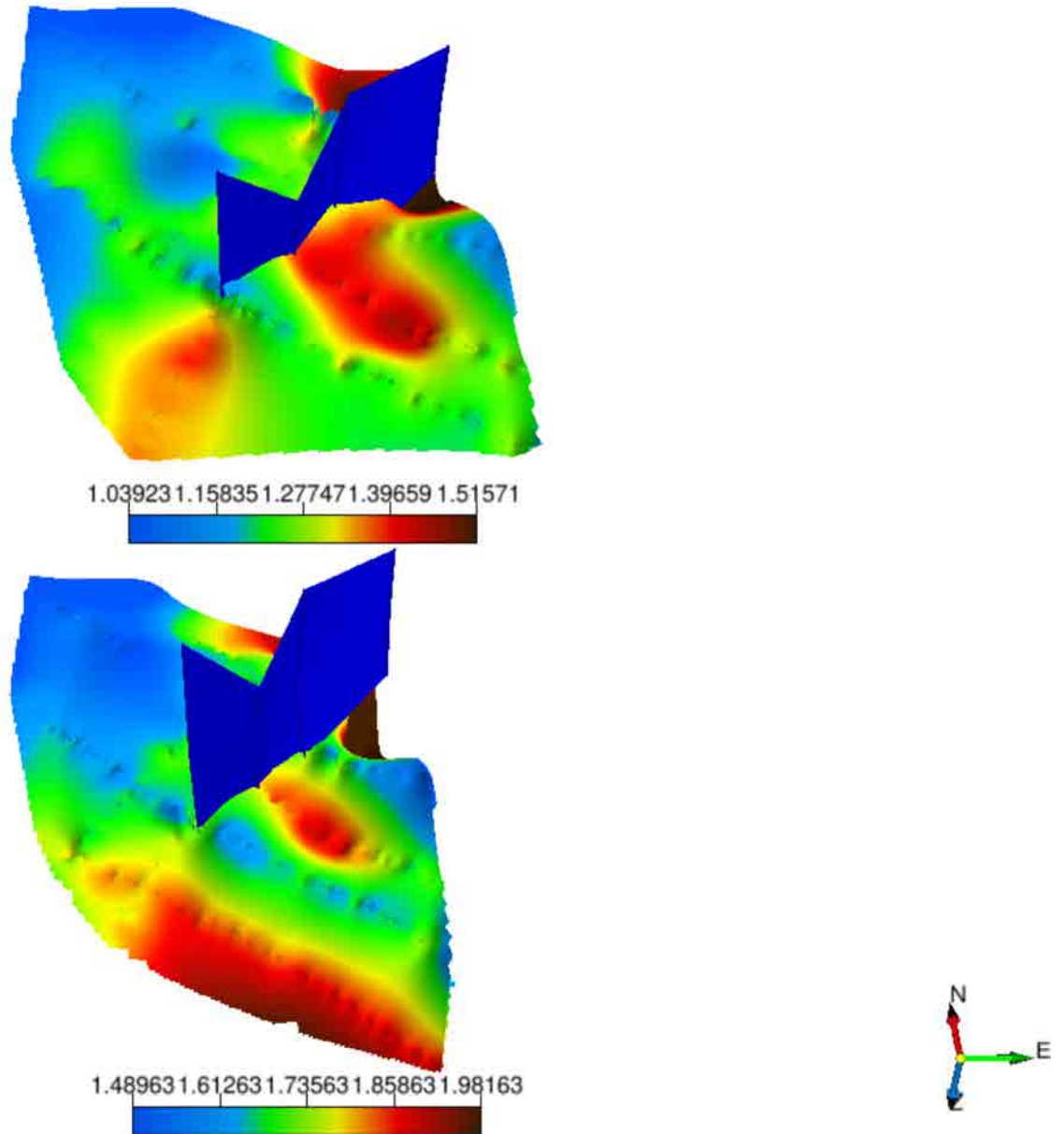


Figura 4.47: Representação da superfície referente ao topo do pré-rife (acima) e da superfície referente ao topo do embasamento (abaixo).

Capítulo 5

Conclusões

Foi realizado o processamento sísmico da linha de reflexão 0227-0018 com a geração da seção empilhada migrada com boa resolução e boa continuidade espacial dos eventos apesar dos dados pré-empilhados dessa linha apresentarem baixíssima razão sinal-ruído, principalmente devido a forte presença do ruído coerente *groundroll*. Esse ruído pode ser atenuado de modo eficaz pelo método ST-SVD empregado na etapa de filtragem do fluxograma de processamento. O método ST-SVD é bastante eficiente computacionalmente pois é aplicado traço-a-traço.

Para futuros trabalhos de processamento sísmico de linhas de reflexão da área estudada é recomendado que seja utilizado o método ST-SVD para atenuação do *groundroll* e que a migração seja feita pré-empilhamento em profundidade para que a seção gerada para interpretação esteja em profundidade.

Apesar da escassez de dados, o uso dos atributos sísmicos extraídos das seções sísmicas (que compreende as sete linhas pós-empilhadas e a linha sísmica processada) para a interpretação das falhas e horizontes relacionados ao embasamento e pré-rifte foi satisfatório.

O atributo de similaridade foi útil para o mapeamento das falhas, uma vez que destacou as regiões de alta correlação espacial. Dessa forma, pôde-se detectar as regiões de mais baixa similaridade, as quais corresponderam às falhas e fraturas mapeadas.

A amplitude instantânea destacou os principais refletores das seções. Além disso, sua análise em conjunto com o atributo de frequência instantânea permitiu identificar alguns contrastes que podem indicar possíveis regiões de acumulação de óleo e/ou gás. Ao correlacionar alta amplitude e baixa frequência nas seções foi possível fazer uma estimativa dessas acumulações, levando em conta que determinadas linhas sísmicas utilizadas estão localizadas próximas aos Campos de Araçás e Miranga (esses campos ainda produtores).

A utilização do atributo de fase instantânea facilitou bastante a marcação dos refletores das seções sísmicas interpretadas, sendo essencial para a delimitação ou rastreamento do

topo do embasamento e do pré-rifte. A delimitação desses refletores foram fundamentais para geração dos mapas em tempo dessas superfícies.

O atributo tecVA das seções sísmicas auxiliou na marcação de falhas, principalmente da falha F1 que passa por seis linhas. A partir da marcação dessa falha, foi obtido o seu plano ao longo da área de estudo. Com isso, observou-se que o sentido do seu caimento corresponde à localização próxima das linhas sísmicas ao Baixo de Miranga.

Um estudo mais aprofundado da geologia da área estudada ainda é bastante importante, principalmente visando o estudo da sismoestratigrafia integrado à combinação de mais atributos e também o uso de informações de dados de poços.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por guiar os meus caminhos e pela fé que nEle tenho.

Agradeço à minha mãe, Edelvira, e ao meu pai, Carlos, por todo amor, carinho e compreensão para a concretização desta etapa. Obrigada por sempre me apoiarem, amo vocês.

À minha irmã Verusca, minha parceira de vida, companheira de todas as horas. Ter a sua presença constante na minha vida, principalmente neste ano que foi bem desafiador para nós, foi essencial. Te amo e estarei sempre ao teu lado! Ao meu irmão Vinícius, embora a vida tenha nos afastado, torço por você da mesma forma que sei que você torce por mim.

Ao meu querido orientador, professor Dr. Michelângelo. Que honra a minha ter sido a sua primeira orientanda (rs)! Mick, obrigada pela confiança e orientação, incentivo, disponibilidade e críticas, por estar sempre presente, acompanhando tudo de perto. Foram quase 2 anos de convivência e de muito aprendizado, de muitas brincadeiras e conversas sérias! Felizes dos alunos que vierem a ter um orientador como o senhor, sempre solícito em ajudar a todos, a fim do melhor desempenho. Mil vezes, obrigada!

Ao meu co-orientador Daniel Vilas Boas, que prontamente aceitou me co-orientar, por todo conhecimento, sugestões e críticas repassados desde o início do trabalho.

À todos do GETA-UFBA (Grupo de Estratigrafia Teórica e Aplicada) com os quais tive contato. Em especial aos geofísicos Vinícius Santana e Paulo Augusto Souza que contribuíram diretamente com o trabalho. Principalmente a Vinícius que disponibilizou muito do seu tempo com esclarecimentos, ideias e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Aos geofísicos Wilker Souza e Misael Possidonio que muito me ajudaram no início do aprendizado do *software SeisSpace*.

Agradecer aos meus amigos Gabriela Caldas, Felipe Guedes, Fernanda Fernandes, Isabela Catão, Beatriz Meneses, Karla Torres, Kelly Torres, Anderson Luíz e Alisson Torres por estarem ao meu lado, pela compreensão, conselhos, momentos de alegria e apoio nos momentos difíceis. À Douglas Magno, mesmo distantes, sei que podemos contar um com o outro; foi bom acompanhar tua evolução, estarei sempre torcendo por você.

À Yan Viegas, grande amigo que indiretamente a Geofísica me apresentou. Anjo, obrigada pelas muitas conversas, por sempre me deixar bem, pelos papos sérios e descontraídos. Sua amizade vale ouro!

Aos amigos da graduação de Geologia: Ziran Nunes, Cristine Pereira, Diana Goes, Elane Barreto, Rafael Daltro, Lizandra Suzart, Artur Oliveira, Luiz Rafael, Guido Acauã, Alef Caetano, Gabriela Carvalho, Rivaldo Vieira, pelos muitos e inesquecíveis campos compartilhados, pela cumplicidade, pelos momentos de tensão que fizeram parte e pelos momentos alegres que tornaram a graduação um pouco mais leve.

Aos amigos da Graduação e da Pós em Geofísica com os quais tive contato nesses dois últimos anos de curso e me fizeram sentir acolhida: Lucas Bittencourt, Lorena Santos, Wilker Souza, Misael Possidonio, Josafat Leal, Rafael Paulo, Leonardo Moreira, Átila Saraiva, Ana Clara, Mariana Sampaio, Maria Mariana e Matheus Nilo. Sou muito grata a todos vocês pelo convívio diário, pelo conhecimento compartilhado e pelos momentos de descontração nessa reta final de curso.

Aos professores de Geologia, por todo empenho e conhecimentos repassados, em especial a Moacyr Marinho, Jailma Santos, Ângela Leal, Reinaldo Brito, César Correa Gomes, Simone Cruz, Roberto Rosa, Carlson Leite, José Ângelo e Henrique Assumpção.

Agradeço também aos professores da Geofísica, em especial a Michelângelo Gomes, Marcos Vasconcelos, Joelson Batista e Suzan Vasconcelos.

Aos funcionários Mércia, Fernanda e Joaquim pela ajuda de sempre.

Agradeço a empresa Landmark/Halliburton pela licença acadêmica fornecida à UFBA do software de processamento sísmico SeisSpace 2D e 3D.

Agradeço a empresa dGB Earth Sciences pela licença acadêmica fornecida à UFBA do software de interpretação sísmica OpendTect.

Ao LAGEP-CPGG-UFBA, por oferecer toda estrutura e conforto durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Brown, A. R. (2001) Understanding seismic attributes, *Geophysics*, **66**(1):47–48.
- Bulhões, E. M. e Amorim, W. N. (2005) Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à técnica volume de amplitudes (tecVA), In: *9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- Chen, Q. e Sidney, S. (1997) Tutorial, seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring, *The Leading Edge*, **16**:445–456.
- Chopra, S. e Marfurt, K. J. (2007) Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization, vol. 11, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Destro, N. (2002) Falhas de alívio e de transferência: o significado tectônico e econômico do rifte Recôncavo–Tucano–Jatobá, NE Brasil., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.
- Destro, N.; Szatmari, P.; Alkmim, F. F. e Magnavita, L. P. (2003) Release faults, associated structures, and their control on petroleum trends in the Reconcavo rift, northeast Brazil, *AAPG bulletin*, **87**(7):1123–1144.
- Freire, S. L. M. (1986) Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos., Tese de Doutorado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Holz, M. (2012) Estratigrafia de Sequências: histórico, princípios e aplicações, Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- Kuchle, J. (2010) Análise tectono-estratigráfica de bacias rifte., Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Magnavita, L. P.; Silva, R. R. e Sanches, C. P. (2005) Roteiros geológicos – guia de campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil, *Boletim de Geociências da Petrobras*, **13**:301–334.
- Meneses, A. R. A. S. (2010) Estudo teórico de atributos sísmicos em dados sísmicos de reflexão, Trabalho de Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

-
- Milhomem, P. S.; Maman, E. J.; Oliveira, F. M.; Sardenberg, M. e Carvalho, S. e Lima, W. S. (2003) Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Recôncavo, Fundação Paleontológica Phoenix, **51**(5).
- Rosa, A. L. R. (2010) Análise do Sinal Sísmico, Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro.
- Rostirolla, S. P. (1997) Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória., Revista Brasileira de Geociências, **27**(4):327–338.
- Silva, D. E. R. (2013) Caracterização sedimentológica e estratigráfica de testemunhos da Formação Itaparica, Campo Fazenda Alvorada, Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil, Trabalho de Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Silva, M. G. (2004) Processamento de Dados Sísmicos da Bacia do Tacutu., Dissert. de Mestrado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Silva, M. G. (2015) Empilhamento automático ao longo do mergulho local e novos métodos para o processamento de dados sísmicos no domínio do tempo., Tese de Doutorado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Silva, O. B.; Caixeta, J. M.; Milhomem, P. S. e Kosin, M. D. (2007) Bacia do Recôncavo, Boletim de Geociências da Petrobras, **15**:423–431.
- Souza, W. E. (2014) Processamento cmp de dados sísmicos levantados no norte da bacia do são francisco utilizando o software seisspace., Trabalho de Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Souza, W. E. (2016) Determinação automática das primeiras quebras e aplicações na correção estática e processamento sísmico da Bacia do Parnaíba., Dissert. de Mestrado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Subrahmanyam, D. e Rao, P. H. (2008) Seismic attributes – a review, In: *7th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad*, p. 398–404.
- Taner, M. T. (2001) Seismics attributes, CSEG recorder, **26**(7):49–56.
- Taner, M. T.; Koehler, F. e Sheriff, R. E. (1979) Complex seismic trace analysis, Geophysics, **44**(6):1041–1063.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) Applied Geophysics, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Troccoli, E. B. (2015) Sismoestratigrafia em bacias rifte e análise de atributos sísmicos e filtros na interpretação de dados 2D e 3D na Bacia do Recôncavo, Dissert. de Mestrado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Vieira, M. Q. (2018) Processamento Sísmico e Interpretação Sismoestratigráfica no Nordeste da Bacia do Recôncavo, Dissert. de Mestrado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Vilas Boas, D. B. (2016) Correlação sismoestratigráfica entre as bacias do Recôncavo e de Camamu, Dissert. de Mestrado em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Anexo I

Carta cronoestratigráfica da Bacia do Recôncavo

A Figura I.1 apresenta a carta cronoestratigráfica proposta por [Silva et al., 2007](#) para a Bacia do Recôncavo.

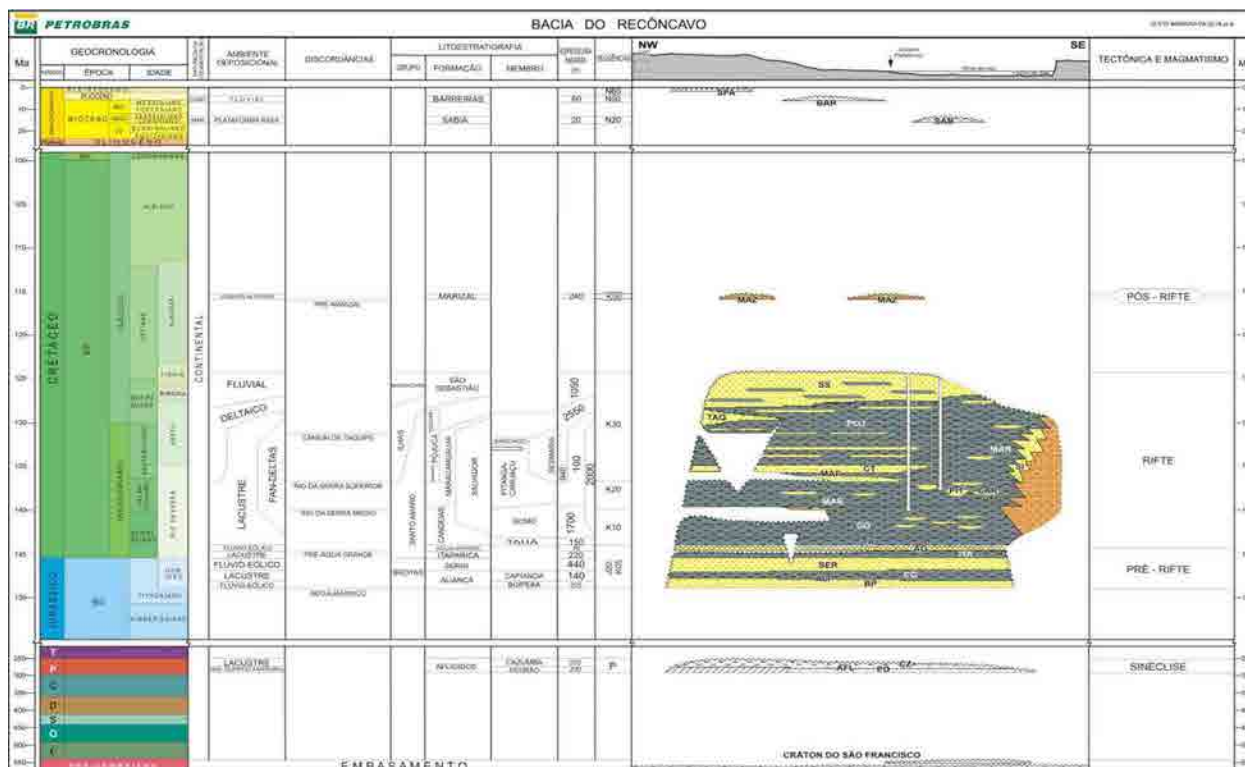


Figura I.1: Carta cronoestratigráfica da Bacia do Recôncavo. Fonte: [Silva et al. \(2007\)](#)