



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO TEÓRICO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS EM DADOS SÍSMICOS DE REFLEXÃO

ADSON ROQUE ARAÚJO DOS SANTOS MENESES

SALVADOR – BAHIA

Agosto – 2010



Estudo Teórico de Atributos Sísmicos em Dados Sísmicos de Reflexão

por

ADSON ROQUE ARAÚJO DOS SANTOS MENESES

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

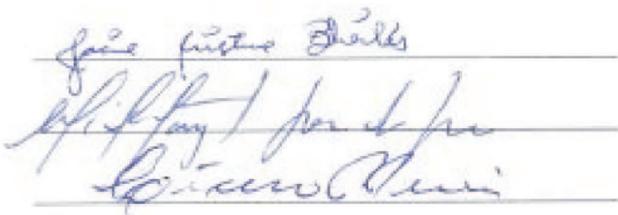
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Three handwritten signatures in blue ink are written over three horizontal lines. The signatures are: 'Jacira Cristina Batista de Freitas', 'Michelângelo Gomes da Silva', and 'Cicero da Paixão Pereira'.

Dra. Jacira Cristina Batista de Freitas - Orientadora

MC. Michelângelo Gomes da Silva

GEO. Cicero da Paixão Pereira

Data da aprovação: 11/08/2010

*Dedico esse trabalho a minha mãe
Célia
e aos meus irmãos Anderson e
Alysson.*

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo teórico dos atributos básicos de um traço sísmico complexo, do atributo tecVA (técnica Volume de Amplitudes) e aplicação dos mesmos nas linhas sísmicas 2D das bacias do Recôncavo e da Nova Scotia. Realizou-se um estudo prévio da geologia dessas bacias. Nesse sentido, foi indispensável a análise do traço sísmico complexo, pois é uma importante ferramenta para extração de informações a partir dos dados sísmicos. Ele é construído tomando o traço de registro como sua parte real e o traço de quadratura como a parte imaginária. Os principais atributos do traço complexo são amplitude, fase e frequência instantânea, os quais tem diversas aplicações, especialmente na interpretação sísmica, assim como o atributo tecVA. Os resultados obtidos mostraram a aplicabilidade dos atributos como ferramenta para análise quantitativa/qualitativa da interpretação sísmica.

ABSTRACT

The main goal of this work is to develop a theoretical study of the basic attributes of a complex seismic trace of the attribute TecVa (Expands of Amplitudes Technique) and its application in 2D seismic lines present in the Reconcavo Basins area and in the New Scotia. A prior study of the geology of these basins was implemented. In this sense, the analysis of the seismic complex trace aspect played a fundamental role towards collecting the information embedded in the seismic data. It is built by taking the trace of the record as its real part and the trace of the quadrature as its imaginary part. The main attributes of the complex trace are the amplitude, the phase and the instant frequency which have several applications, especially in the seismic interpretation, as well as the attribute TecVa. The obtained results showed the applicability of the attributes as tools for quantitative/qualitative analysis of the seismic interpretation.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Geologia geral das bacias estudadas	2
1.1 Aspectos Geológicos da Bacia do Recôncavo	2
1.1.1 Geologia Regional	2
1.1.2 Localização e Arcabouço Estrutural	3
1.1.3 Carta Estratigráfica	5
1.1.3.1 Supersequência Paleózoica	5
1.1.3.2 Supersequência Pré-Rifte	5
1.1.3.3 Supersequência Rifte	6
1.1.3.4 Supersequência Pós-Rifte	6
1.1.3.5 Sequência Neógeno	7
1.2 Aspecto Geológico da Bacia de Nova Scotia - Canadá	9
1.2.1 Geologia Regional	9
1.2.2 Localização e Arcabouço Estrutural	11
1.2.3 Carta Estratigráfica	14
1.2.3.1 Fase Sin-Rifte	14
1.2.3.2 Fase Pós-Rifte inicial	14
1.2.3.3 Fase Pós-Rifte final	14
CAPÍTULO 2 Análise do traço complexo e atributo sísmico	15
2.1 Transformada de Hilbert	15
2.2 Traço sísmico complexo	17
2.3 Atributos sísmicos	20
2.3.1 Amplitude instantânea (envelope)	23
2.3.2 Fase instantânea	25
2.3.3 Cosseno de fase	27
2.3.4 Frequência instantânea	28

2.3.5	Técnica Volume de Amplitudes - tecVA	29
CAPÍTULO 3	Resultados e discussões	33
3.1	Amplitude instantânea	35
3.2	Fase e cosseno de fase instantânea	42
3.3	Frequência instantânea	50
3.4	Atributo tecVA	56
CAPÍTULO 4	Conclusões	72
	Agradecimentos	73
	Referências Bibliográficas	74
ANEXO I	Classificação de atributos	76

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Localização e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo (Fonte: Phoenix).	4
1.2	Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (Fonte: ANP).	8
1.3	Seção geológica da Bacia do Recôncavo (Fonte: Petrobras).	9
1.4	Localização da Bacia de Nova Scotia (Fonte: <i>Geological Service of Canada</i>).	12
1.5	Elementos tectônicos e estruturais da Bacia de Nova Scotia (Fonte: <i>Geological Service of Canada</i>).	12
1.6	Carta estratigráfica da Bacia de Nova Scotia (Fonte: <i>Geological Service of Canada</i>).	13
2.1	A amplitude instantânea $a(t)$ e a fase instantânea $\theta(t)$ derivadas do traço sísmico $x(t)$ e o traço de quadratura $y(t)$.	18
2.2	Parte real linha contínua (traço real) e parte imaginária linha tracejada (traço de quadratura).	19
2.3	Classificação dos atributos segundo Chen e Sidbey (1997).	21
2.4	Cálculo do atributo sísmico utilizando valores de um traço sísmico em torno de uma superfície de interesse.	22
2.5	Tipos de janelas usadas para a obtenção do atributo sísmico baseados em eventos.	23
2.6	Ilustração em duas dimensões da amplitude instantânea vetor \mathbf{g} com as componentes g_x e g_z . O campo sólido é o envelope ou amplitude instantânea do traço.	24
2.7	Amplitude instantânea.	25
2.8	Amplitude do traço: lado esquerdo e fase instantânea do traço: lado direito.	26
2.9	Amplitude sísmica e fase instantânea de um traço sísmico real.	26
2.10	Frequência instantânea.	29
2.11	Comprimento da janela móvel para o calculo do atributo tecVA.	30
2.12	Janela móvel da SCE.	30
2.13	Traço com valor absoluto e amplitude RMS.	32
2.14	Traço com amplitude RMS e atributo tecVA.	32
3.1	localização da linha sísmica terrestre (BDP).	34
3.2	localização das linhas sísmicas marinhas (GSC).	34
3.3	Janela do aplicativo <i>Poststack Family</i> do <i>OpenWorks</i> .	35
3.4	Linha 0026-1190 - original (migrada).	36
3.5	Linha 0026-1190 - com atributo envelope com escala de cor.	36

3.6	Linha 11 - original (migrada).	37
3.7	Linha 11 - com atributo envelope.	38
3.8	Linha 19 - original (migrada).	39
3.9	Linha 19 - com atributo envelope.	40
3.10	Linha 19 - ampliação da região que tem o canal.	41
3.11	Linha 0026-1190 - original (migrada).	42
3.12	Linha 0026-1190 - com atributo fase instantânea.	43
3.13	Linha 0026-1190 - com atributo cosseno de fase instantânea.	43
3.14	Linha 11 - original (migrada).	44
3.15	Linha 11 - com atributo fase instantânea.	45
3.16	Linha 11 - com atributo cosseno de fase instantânea.	46
3.17	Linha 19 - original (migrada).	47
3.18	Linha 19 - com atributo fase instantânea.	48
3.19	Linha 19 - com atributo cosseno de fase instantânea.	49
3.20	Linha 0026-1190 - original (migrada).	51
3.21	Linha 0026-1190 - com atributo frequência instantânea com escala de cor.	51
3.22	Linha 11 - original (migrada).	52
3.23	Linha 11 - com atributo frequência instantânea com escala de cor.	53
3.24	Linha 19- original (migrada).	54
3.25	Linha 19 - com atributo frequência instantânea com escala de cor.	55
3.26	Linha 0026-1190 - original (migrada).	56
3.27	Linha 0026-1190 - com atributo tecVA.	57
3.28	Linha 0026-1190 - com atributo tecVA e algumas falhas mapeadas.	57
3.29	Linha 11 - original (migrada).	58
3.30	Linha 11 - com atributo tecVA.	59
3.31	Linha 11 - com atributo tecVA: mostrando as áreas onde foi aplicado um zoom.	60
3.32	Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona.	61
3.33	Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona com o domo de sal e falhas mapeadas.	62
3.34	Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona.	63
3.35	Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona com falhas mapeadas.	64
3.36	Linha 19 - original (Migrada).	65
3.37	Linha 19 - com atributo tecVA.	66
3.38	Linha 19 - com atributo tecVA: mostrando a área onde foi aplicado um zoom.	67
3.39	Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona.	68
3.40	Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona com o domo de sal e falhas mapeadas.	69
3.41	Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona.	70
3.42	Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona com falhas mapeadas.	71

I.1	Classificação de atributos segundo Chen e Sidbey (1997)	76
-----	---	----

INTRODUÇÃO

O estudo dos atributos sísmicos a partir da análise de traço sísmico complexo foi introduzido na década de 1970 (Santos, 2009). 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. 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.

Devido às melhorias nas técnicas de processamento de dados sísmicos, os dados migrados, juntamente com os atributos aplicados nos mesmos, vem sendo cada vez mais fidedignos à geologia da subsuperfície.

No capítulo 1 foi realizado o estudo da geologia das bacias do Recôncavo e da Nova Scotia (Canadá), já que o estudo da geofísica não é apenas fundamentado em métodos matemáticos e físicos, mas também em informações geológicas que possam complementar medidas físicas tomadas normalmente na superfície da terra.

Os conceitos matemáticos básicos da análise do traço sísmico complexo mencionados no capítulo 2, foram baseados nos trabalhos de Santos (2009) e Barnes (2007) que apresentam o tema de forma bastante simples e compreensível.

No capítulo 3, são discutidos os resultados obtidos, sob o ponto de vista dos atributos do traço complexo. Para aplicação desses atributos foi usado o software comercial *Openworks* da Landmark, disponibilizado para o LAGEP - CPGG - UFBA.

Vale salientar que o processamento da linha sísmica terrestre (0026-1190) foi realizado pela **PETROBRAS** e das linhas sísmicas marinhas (11 e 19) foi realizado pela empresa canadense **ARCIS**.

CAPÍTULO 1

Geologia geral das bacias estudadas

Antes de qualquer estudo sísmico em uma área, faz-se necessário o conhecimento geológico desta. Seguindo esse raciocínio, foi colocado neste capítulo a geologia geral da área onde estão dispostas as linhas sísmicas utilizadas. O conhecimento prévio da geologia facilita perceber o quanto os resultados obtidos estão confiáveis e condizentes com a realidade.

1.1 Aspectos Geológicos da Bacia do Recôncavo

1.1.1 Geologia Regional

A Bacia do Recôncavo constitui um segmento do *rifte* do Recôncavo-Tucano-Jatobá que se desenvolveu acompanhando os estágios iniciais de ruptura do continente Gondwana e a individualização das placas sul-americana e africana, no Eocretácio. No Aptiano, esse *rifte* intracontinental tornou-se uma bacia abortada. A arquitetura básica da bacia reflete as heterogeneidades do embasamento pré-cambriano (Cráton de São Francisco) sobre o qual atuaram esforços distensionais, resultando em um meio-grabén com orientação NE-SW e falha de borda a leste (sistemas de falha de Salvador), com rejeito eventualmente superior a 6000 metros segundo Milhomem et al. (2003).

Na evolução da bacia tectônica ocorreu primeiramente uma fase de sinéclise representada pela formação Afligidos (Permiano) com sedimentos Paleozóicos, depositados sob condições de bacia intracratônica. As associações faciológicas testemunham um clima árido e tendência geral regressiva, com transição de uma sedimentação rasa, marginal, e sistemas lacustres.

A segunda fase é caracterizada pela sedimentação *pré-rifte* e reúne depósitos relacionados ao estágio inicial de flexura da crosta, em resposta aos esforços distensionais que originaram o sistema de riftes do Eocretácio. Esta sedimentação *pré-rifte* é representada por ciclos fluvio-eólico (Membro Boipeba da Formação Aliança, Formação Sergi e Água Grande), aos quais se intercalam sistemas lacustres transgressivos (Membro Capianga da Formação Aliança e Formação Itaparica).

Na terceira fase, representada pela sedimentação *rifte*, houve um estágio inicial de lago profundo com folhelhos calcilutitos e arenitos turbidíticos do Membro Gomo da Formação Candeias. Nessa época, como ao longo do Rio da Serra, oscilações climáticas causarão a exposição e erosão das áreas plataformais, e nas áreas mais estáveis e rasas foram encontrados registros de calcarenitos oolíticos/oncolíticos. O início do rifteamento ocorreu com uma transgressão regional que sobrepõe os pelitos lacustres do Membro Tauá à fácies eólicas presentes no topo da Formação Água Grande, tendo como limete da fase *pré-rifte* e *rifte* a base do Membro Tauá (Da Silva et al., 2007).

Alguns conglomerados sintectônicos relacionáveis a leques aluvio-deltaicos da Formação Salvador tem início apenas no Mesório da Serra inicial (Berriasiano), estendendo-se até o Jiquiá (Neobarremiano/Eoptiano), estando relacionados a atuação do sistemas de falhas de Salvador durante toda fase *rifte*, (Milhomem et al., 2003).

Depois desse grande aporte sedimentar que ocorreu na fase *rifte*, foi evidenciada uma quarta fase que está relacionada a uma *subsidência-termal*, sendo representada pela Formação Marizal, que é caracterizada por clásticos grosseiros (conglomerados e arenitos), folhelhos e calcários. Posteriormente, há deposições de sedimentos terciários da Formação Barreiras (leques aluviais) e da Formação Sabiá (folhelhos cinza-esverdeados e calcário), que são registros de incursões marinhas pós-aptinas na Bacia do Recôncavo, apesar de não ter evoluído para uma bacia de Margem Passiva.

1.1.2 Localização e Arcabouço Estrutural

A Bacia do Recôncavo localiza-se no Estado da Bahia no Nordeste do Brasil, com uma área de aproximadamente 11.500 km². Seus limites são dados pelo Alto de Aporá e Dom João (separando-se a norte e noroeste da Bacia do Tucano), pelo sistemas de falhas da Barra (separando-se da Bacia de Camamu) que corta a Ilha de Itaparica na sua porção mediana, pela falha de Maragogipe, a oeste, e pelo sistema de falhas de Salvador, a leste. A Figura 1.1 mostra a localização e os limites estruturais da Bacia.

Em seu arcabouço geral a bacia adquire a forma de um meio-grabén, com mergulho regional das camadas para SE, em direção aos grandes depocentros que se situam junto à borda oriental. Os esforços distensivos geraram falhamentos normais, cujos planos apresentam mergulhos elevados (em torno de 70⁰) e com direção preferencial N30⁰E. Os falhamentos são, predominantemente, sintéticos, isto é, mergulham em direção aos grandes depocentros.

Essa configuração de falhas permite dividir a bacia em áreas que foram relativamente estáveis, denominadas de Patamares e em áreas com taxas de subsidência maiores, que configuram os grandes baixos regionais. Destacam-se as falhas de Patioba, Pedra do Salgado,



Figura 1.1: Localização e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo (Fonte: Phoenix).

Biritiba-Araças, Paranaguá, Nova América e o sistema de Falhas de Salvador. Outro sistema de falhamento é aquele de direção $N40^{\circ}O$, representadas pelas Falhas de Mata-Catu e Itanagra-Araças. Com base nessas duas Falhas, a bacia foi dividida em três compartimentos: Nordeste, Central e Sul.

Nesse sentido, destaca-se: O Baixo de Camaçari, no compartimento Sul, mantendo-se como uma área subsidente desde o Andar da Rio Serra até o Andar Jiquiá; O Baixo de Miranga, no Compartimento Central, que ao final do Andar Rio da Serra teve a sua taxa de subsidência atenuada.

O Baixo de Alagoinhas desenvolveu-se a leste do Alto de Aporá, como uma área negativa nos Andares Buracica-Jiquiá. Entre os depocentros de Miranga e Alagoinhas, situa-se a plataforma de Quiricó. No Compartimento Nordeste temos uma feição única da bacia que é a Falha de Pedras, cujo mergulho difere dos demais sistemas de falhas do Recôncavo por ser de baixo ângulo (30°). Uma das principais características dos Compartimentos da Bacia do Recôncavo é o grande volume de massas de folhelhos diapirizados encontrados no

Baixo de Miranga, no Compartimento Central, e que são menos expressivos nos outros dois Compartimentos, e o *Canyon* de Taquipe, no Compartimento Sul (Pederneiras et al., 1990).

1.1.3 Carta Estratigráfica

Será abordado neste item, de forma sucinta, a descrição das supersequências (Paleozóica (sinécilse), Pré-rifte, Rifte, e Pós-rifte) e da sequência Neogénea que compõem a carta estratigráfica (ver figura 1.2) e a seção geológica (ver figura 1.3) da Bacia do Recôncavo.

1.1.3.1 Supersequência Paleózoica

É representada pelos Membros Pedrão e Cazumba da Formação Afligidos. Dados Paleontológicos atribuem uma idade Permiana ao Membro Pedrão, que se correlaciona com o Membro Ingá da formação Santa Brígida (sub-bacia do Tucano Norte) e com as Formações Aracaré (Bacia de Sergipe-Alagoas).

Foi perfurado um poço que visava testar a feição dômica alongada na direção NE-SW, mapeada pela sísmica ao nível da Formação Sergi. Os objetivos principais eram os reservatórios das Formações Água Grande e Sergi e, secundariamente, os reservatórios das Formações Pojuca e Marfim, segundo Petróleo (2000) e Ferreira (2009).

- Sequência Permiana (Sinéclise) - Arenitos com feições de retrabalhamentos por onda, lamitos e evaporitos, principalmente halita, caracterizando o Membro Pedrão. No Membro Cazumba, predominam pelitos e lamitos vermelhos lacustres, com nódulos de anidrita na base da seção.

1.1.3.2 Supersequência Pré-Rifte

As Formações Aliança e Sergi testemunham um amplo sistema fluvio-eólico, desenvolvido provavelmente durante o Neojurássico (Andar Dom João), sob clima árido e em fase inicial de flexuramento crustal. Dados paleontológicos indicam que a deposição das Formação Água Grande teria ocorrido no Eocretáceo. Ao tempo de deposição destas unidades, particularmente da Formação Água Grande, já se esboçava a configuração atual da Bacia do Recôncavo, sugerindo um incipiente controle tectônico.

- Sequência J20-K05 - Sedimentação predominantemente pelítica que caracteriza o Membro Capianga (Formação Aliança) e a Formação Itaparica. Uma parte do registro, correspondente às Formações Aliança e Sergi (Andar Dom João), tem sido relacionada ao Neojurássico. As Formações Itaparica e Água Grande (Andar Rio da Serra Inferior) São de idade Eocretácea (Eoberriasiano).

1.1.3.3 Supersequência Rifte

As seções rifte abrangem três sequências. As discordâncias que as limitam estão bem definidas a oeste, no segmento flexural da bacia, naturalmente mais sujeito aos efeitos de variações do nível de base relacionadas à atividade tectônica e/ou controle climático. Nos depocentros, seus limites são dados por concordâncias relativas, expressando a continuidade da sedimentação nesses sítios. As associações de fácies que as caracterizam reproduzem um padrão de empilhamento estratigráfico semelhante ao proposto por Da Silva et al. (2007) para bacias rifte progressivamente assoreados a partir de um estágio inicial de lago profundo.

- Sequências K10 e K20 - As sequências K10 e K20 abrangem grande parte do Andar Rio da Serra, compreendendo rochas sedimentares relacionáveis às Formações Candeias (Membros Tauá e Gomo) e Maracangalha. Os Folhelhos, calcilutitos e arenitos turbidíticos do Membro Gomo representam esta fase inicial de aprofundamento, de idade Mesório da Serra (Eoberriasiano/Eovalanginiano), quando a Bacia do Recôncavo desenvolveu uma fisiografia caracterizada por áreas plataformais relativamente estáveis e depocentros com elevadas taxas de subsidência segundo Da Silva et al. (2007).
- Sequência K30 - A porção inferior da sequência K30 registra a expansão dos sistemas deltaicos ao longo da bacia, com progressivo recuo, para sul, dos sítios deposicionais eminentemente lacustres, representados pela Formação Maracangalha. 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. A esta época, e ao longo do Neo-aratu, ainda prevalecem os sistemas deltaicos relacionados a Formação Pojuca. Para o topo predomina fácies fluviais (Formação São Sebastião) que marca a fase final do rifte.

1.1.3.4 Supersequência Pós-Rifte

Sua deposição relaciona-se a sistemas aluviais desenvolvidos já no contexto de uma subsidência termal, pós-rifte, como indicado pela subhorizontalidade dos estratos, que se sobrepõem discordantemente a seções estruturais relacionados a fase rifte.

- Sequência K50 - A Sequência K50 é representada pelos clásticos grossos (conglomerados e arenitos), folhelhos e calcários pertencente à Formação Marizal, de idade Neo-alagoas (Neo-aptiano).

1.1.3.5 Sequência Neógeno

Não há registros de depósitos neocretáceos na Bacia do Recôncavo. O Neógeno ocorre subordinadamente, estando representado pela Formação Sabiá e pelo Grupo Barreiras.

- Sequência N20 e N50 - A Formação Sabiá caracteriza-se por folhelhos cinza esverdeados e calcários impuros relacionados a transgressão marinha de idade Miocênica. Sistemas de leques aluviais pliocênicos caracterizam o Grupo Barreiras.
- Sequência N60 - Engloba sedimentos pleistocênicos holocênicos de praias e aluviões.

Carta Estratigráfica da Bacia do Recôncavo

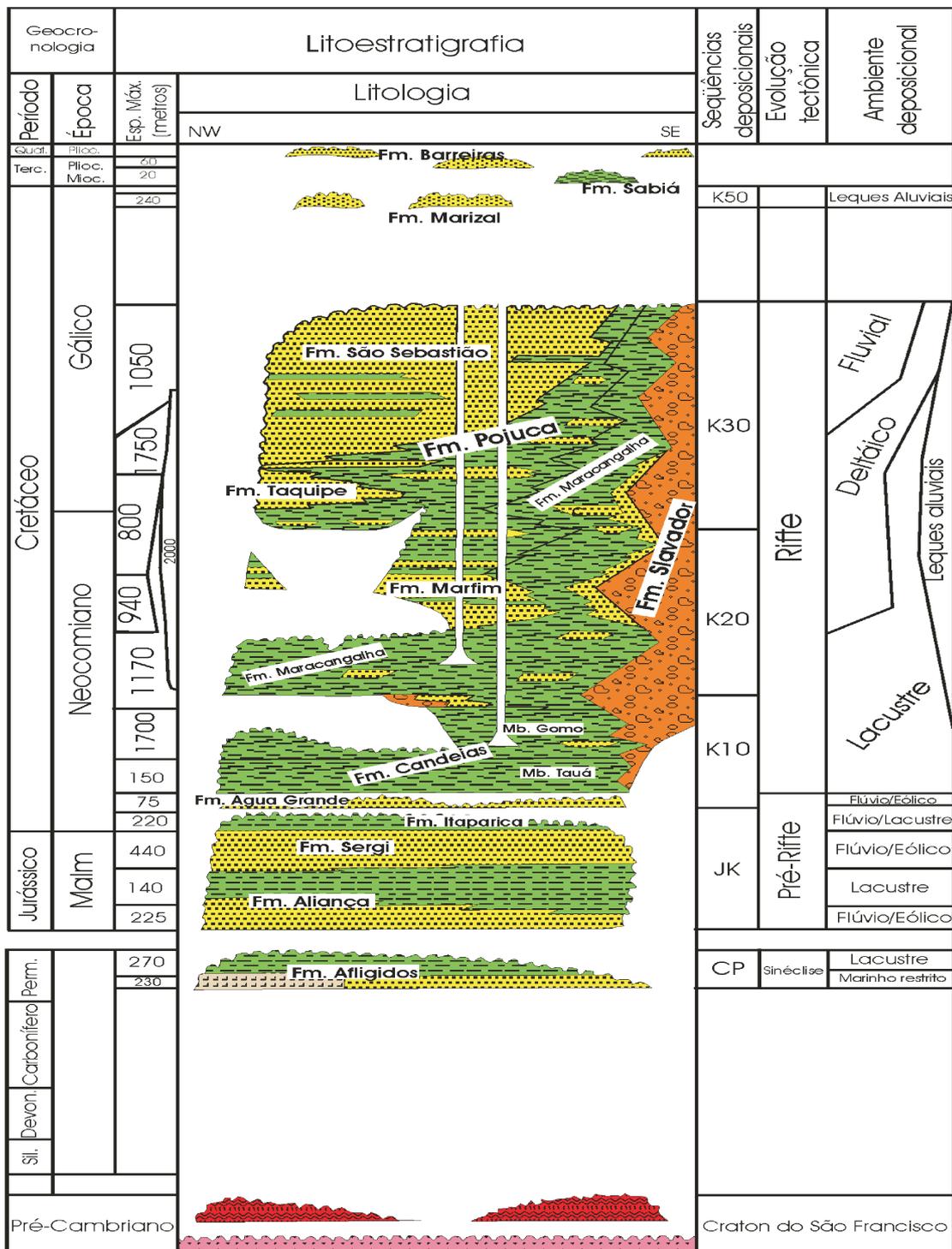


Figura 1.2: Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (Fonte: ANP).

Atlântico.

A transgressão marinha sobre a discordância de ruptura cobriu a bacia com um mar raso e restrito, dentro do qual finas sequências de carbonatos e sedimentos clásticos foram acumuladas. Uma espessa sucessão de sedimentos clásticos de granulação grossa e folhelhos de origem fluvial foram depositadas em simultaneidade nas margens da bacia. A sucessão era proveniente de terrenos mais elevados adjacente à bacia. Eventualmente esses sedimentos progravam ao longo da margem, fazendo com que aos poucos os grabéns fossem preenchidos e o embasamento fosse coberto. Os sedimentos pelíticos dessa sucessão foram transportados por processos marinhos para águas profundas, onde lentamente foram depositados, chegando a cobrir a crosta oceânica.

A combinação do espalhamento do assoalho oceânico, a subsidência térmica da bacia e o aumento global do nível do mar causaram aumento de área e profundidade do oceano Atlântico durante Jurássico Médio. Durante esse período, um banco de carbonatos se desenvolveu na parte ocidental da bacia, persistindo até o Jurássico Superior. O Membro Scatarie da Formação Abenaki foi formado por uma paleo-plataforma carbonática que foi estabelecida ao longo da zona de charneira da bacia. Com a continuação do processo de subsidência da bacia e aumento global do nível do mar, os carbonatos e sedimentos de plataforma foram cobertos por folhelho de ambiente marinho profundo. A partir do meio para o final do Jurássico, recifes carbonáticos, bancos e ambiente de plataforma foram formados e desenvolvidos ao longo da linha de charneira da bacia. Mais ao norte, na Plataforma Banquereau foi depositada uma rasa sucessão mista de sedimentos clásticos e carbonáticos enquanto que em águas mais profundas, finas camadas de folhelho e calcários.

Simultaneamente a deposição dos carbonatos, ocorreu um soerguimento regional que resultou em um aporte de sedimentos clásticos e estabelecimento de um delta dominado por rios e maré na sub-bacia Laurentian e posteriormente na sub-bacia Sable. No sudoeste, uma progradação similar ocorreu em uma enseada nas proximidades da fronteira dos Estados Unidos com Canadá, conhecido como o Delta Shelburne. Esses sedimentos possuem sua fonte primária oriunda de camadas adjacentes com aproximadamente 14 *km* de espessura, que foi depositada entre o final do Permiano a início do Devoniano. O Paleo-rio Saint Lawrence foi estabelecido no início do Cretáceo, aumentando o aporte sedimentar para dentro as bacias da Nova Scotia. Esses sedimentos clásticos foram continuamente transportados para dentro da bacia, ocultando os recifes e bancos de carbonatos na Plataforma LaHave e posteriormente na Plataforma Banquereau. Uma série de areias grossas deltaicas, sedimentos carbonáticos de ambiente marinho raso e Plataforma marinha rasa, estiveram presentes durante todo o Cretáceo Inferior.

O Delta Sable progradou rapidamente nas sub-bacias Sable e Laurantian e sobre a Plataforma Baquereau enquanto que na Sub-bacia Shelburn, o Delta Shelburn desaparece, devido ao esgotamento de sedimentos fornecidos pelo rio. Sedimentos de Plataforma levados

para a zona de Charneira no Jurássico Médio a Cretáceo, criaram um excesso de peso, iniciando a subsidência e desenvolvendo de falhas de crescimento com mergulho em direção ao oceano. Esse fluxo de sedimentos também mobilizou os evaporitos de idade Jurássica (Wade e Brown, 1996). A continuação da sedimentação acentuou a mobilidade do sal, sendo que em áreas onde a sedimentação foi alta, como o Delta de Sable, o sal mudou de posição tanto na vertical como na horizontal tendendo mais em direção ao oceano, formando diápiros, almofadas e dorsais. Durante os períodos de baixa do nível do mar, os rios erodem sedimentos da Plataforma continental e formam deltas nas bordas da mesma. Esses deltas forneciam correntes de turbidez e outros depósitos de fluxo de massa para o talude desde o jurássico Médio e através do Cretáceo.

Seguindo o Cretáceo Inferior, a sedimentação deltaica cessou ao longo da margem da Nova Scotia devido a uma grande transgressão marinha, quando então, a Plataforma foi coberta por lama. Essa deposição transgressiva foi periodicamente interrompida devido a um fluxo de sedimentos clásticos grosseiros. O fim do período Cretáceo na Bacia de Nova Scotia, registrou um aumento no nível do mar, subsidência da bacia e deposição de margas. Esses estratos foram finalmente encobertos por lama de Plataforma marinha no Terciário e mais tarde por areia e conglomerados da Formação Banquereau. Ao longo do Terciário, várias discordância relacionadas quedas do nível do mar ocorreram. Durante o Paleoceno, Oligoceno e Mioceno, processos de corrente fluviais e de mar profundo retrabalharam e erodiram esse sedimentos transportando-os para fora do talude e planície abissal. Durante o período Quartenário, nos últimos dois milhões de anos, várias centenas de metros de sedimentos marinhos e glaciais foram depositados na Plataforma e Talude Superior.

1.2.2 Localização e Arcabouço Estrutural

A Bacia de Nova Scotia é flanqueada no Sudoeste pelo Arco de Yarmouth/Estados Unidos e no nordeste pelo Alto Avalon (uma elevação da crosta que se deu com a distensão do fundo oceânico entre o Grand Banks e o oeste da Europa), é formada por uma série de altos e baixos (horsts e grabéns), ou Plataformas e depocentros. A partir do sudoeste para o nordeste eles são chamados de Sub-bacia Shelburne, Plataforma da La Have, Sub-bacias Sable e Abenaki, Plataforma Banquereau, Grabén Orpheus e Sub-bacia laurentian (ver Figuras 1.4 e 1.5).

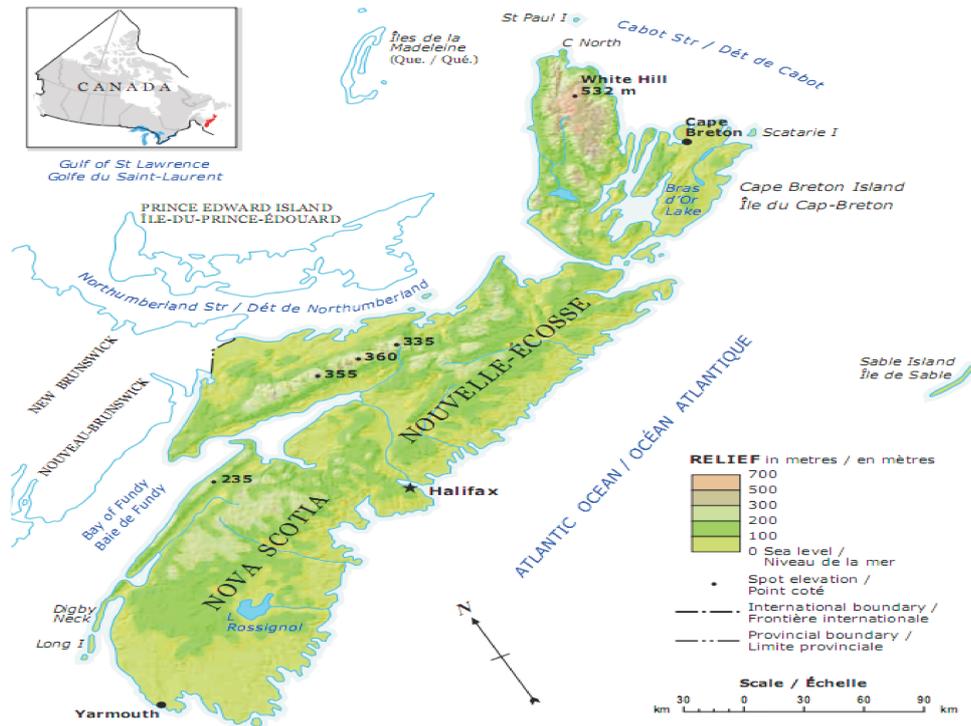


Figura 1.4: Localização da Bacia de Nova Scotia (Fonte: *Geological Service of Canada*).

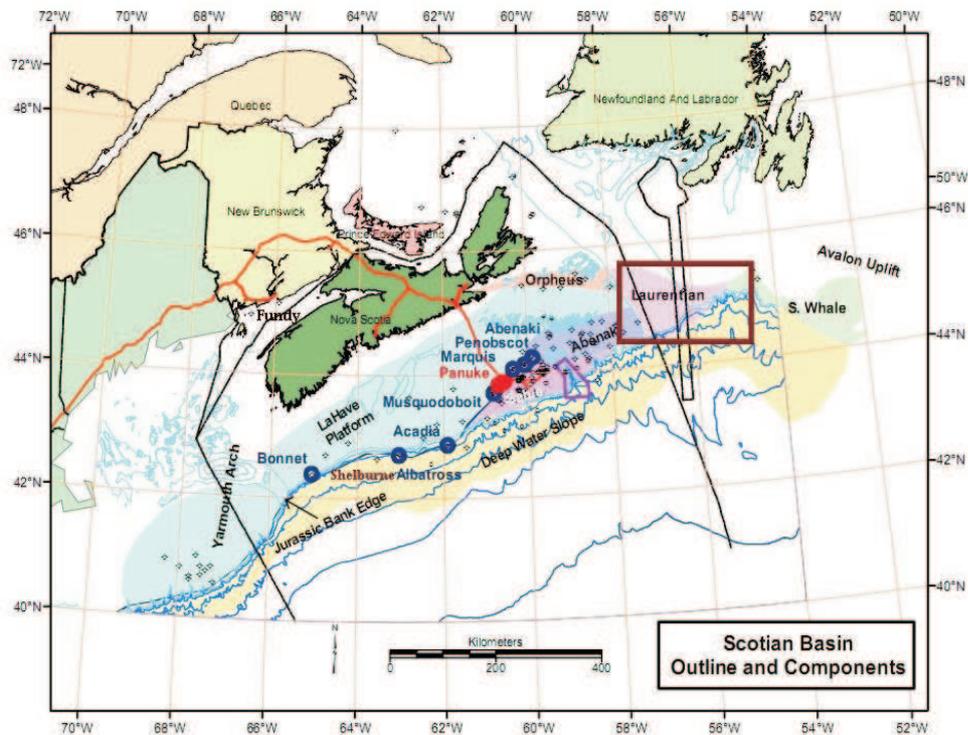


Figura 1.5: Elementos tectônicos e estruturais da Bacia de Nova Scotia (Fonte: *Geological Service of Canada*).

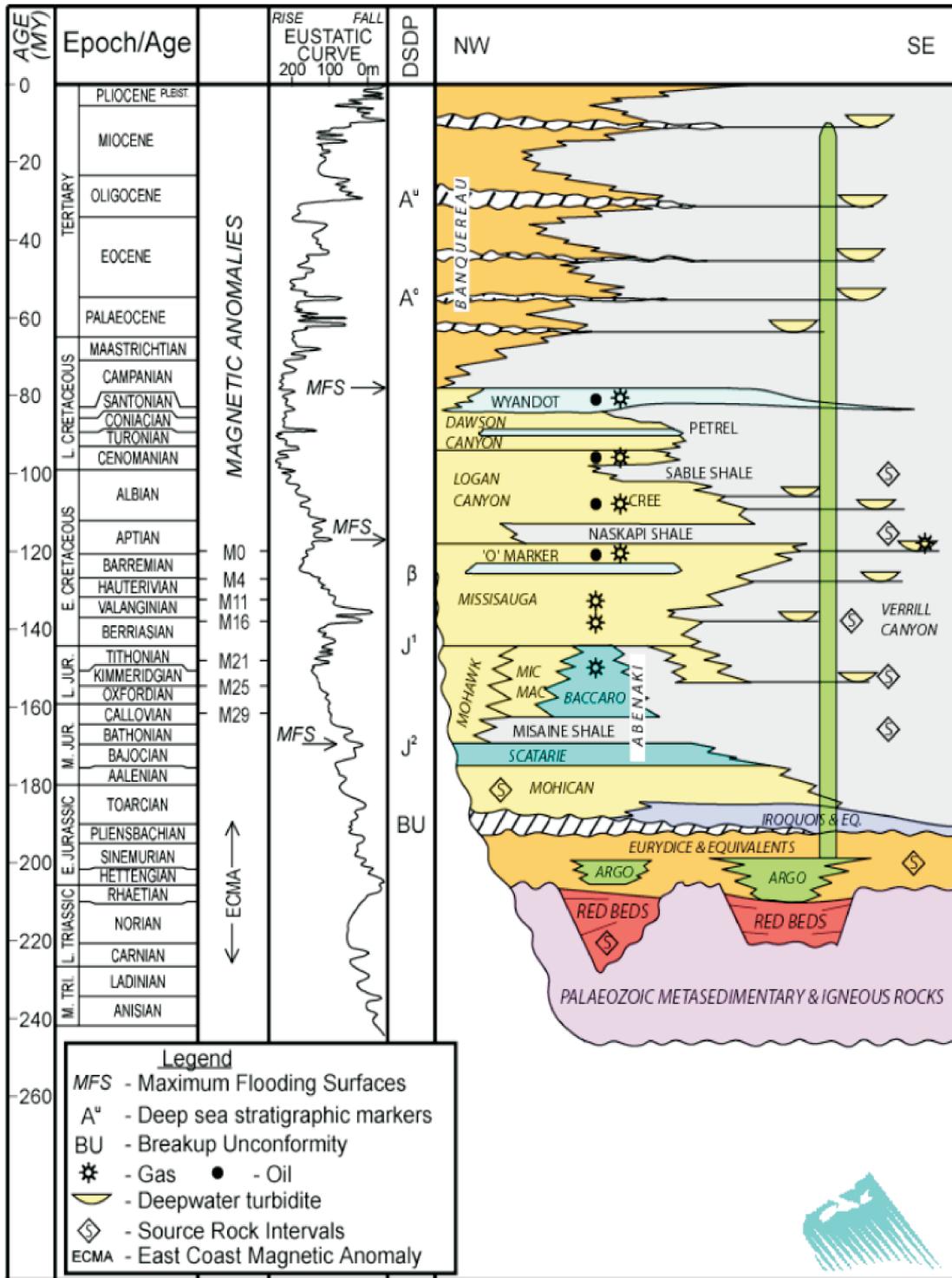


Figura 1.6: Carta estratigráfica da Bacia de Nova Scotia (Fonte: Geological Service of Canada).

A sedimentação ocorreu durante os últimos 225 milhões de anos, representando dessa forma toda a história geológica da região, desde a abertura do atlântico, até a deposição glacial no quaternário. A bacia apresenta uma variedade de sedimentos, típicos de margem passiva, como fluvio-lacustre, evaporitos, deltaicos, carbonáticos e de mar profundo, onde a espessura do pacote de rocha sedimentar pode chegar a 19 *km* (ver Figura 1.5).

1.2.3 Carta Estratigráfica

Neste item, procuramos mostrar as principais litologias presentes na Bacia da Nova Scotia que podem ser vistas na Figura 1.6. No Mapa da Figura 1.5 pode ser vista a localização das linhas estudadas da Bacia (polígono vermelho).

1.2.3.1 Fase Sin-Rifte

Preenchimento de sedimentos fluviais e lacustres do tipo *red bed*, bem como rochas vulcânicas do grupo Fundy. Condições de ambiente marinho restrito e clima quente e seco com mares rasos submetidos a intensos períodos de evaporação resultou na precipitação de extensos depósitos de sal (Formação Argo).

1.2.3.2 Fase Pós-Rifte inicial

Carbonatos e sedimentos Clásticos da Formação Iroquois, sedimentos clásticos de granulação grossa e folhelhos de origem fluvial (Formação Mohican). Carbonatos da Formação Abenaki (Membro Scatarie) e Folhelhos de ambiente profundo da Formação Abenaki (Membro Mi-saine).

1.2.3.3 Fase Pós-Rifte final

Progradação de Deltas representadas por areais fluviais de frente deltaica, Formação Mic-Mac, interdigitada com lama do prodelta e plataforma marinha, ambos da Formação Verryl Canyon. Folhelho da Formação Logan Canyon, sedimentos clásticos grosseiros no Aptiano-Cenomaniano da Formação Logan Canyon (Membro Cree), deposição de margas da Formação Wyandot e areias da Formação Banquereau.

CAPÍTULO 2

Análise do traço complexo e atributo sísmico

A análise de traço sísmico complexo, e a análise de atributos sísmicos em geral, foi estimulada em um momento decisivo na descoberta de zona de gás (*bright Spots*) entre 1960 e 1970. A exploração de gás abriu caminhos para o estudo de traços sísmicos complexos. A análise de traços sísmicos complexos é o método mais popular para o cálculo de atributo sísmico em dados pós-empilhados. Introduzido em 1976, o mesmo vem crescendo com grandes e variadas descobertas de atributos sísmicos, segundo Barnes (2007).

Taner e Koehler continuaram as pesquisas sobre atributos sísmicos iniciada por Anstey, inspirados pela descrição do sinal analítico, segundo Bracewell, eles descobriram que o traço complexo fornece uma medida do envelope do traço, da fase e frequências instantâneas. Esse novo método de cálculo de atributos eles denominaram como *Análise de Traço Sísmico Complexo* e publicaram dois artigos: Taner et al. (1979), Sheriff e Taner (1977).

Considerar o traço sísmico registrado como parte real de um traço analítico torna possível extrair informações de amplitude, fase e frequência, tal como faz a Transformada de Fourier, mas com a vantagem de manter sua localização temporal. A parte imaginária do traço complexo é a Transformada de Hilbert do traço registrado. Os dois atributos fundamentais do traço complexo são a amplitude e a fase instantânea.

Neste Capítulo serão discutidos a teoria do traço sísmico complexo e os atributos usados nas linhas sísmicas 0026-1190 (Bacia do Recôncavo), 11 e 19 (Bacia da Nova Scotia).

2.1 Transformada de Hilbert

Antes de tratarmos do traço complexo e dos atributos, será necessário estudar a Transformada de Hilbert que nada mais é que aplicar uma rotação de $-\pi/2$ ao dado sísmico.

O filtro de quadratura é um operador que atua na fase do traço de quadratura, também conhecido como transformada de Hilbert do traço de entrada. Alguns autores definem o ângulo de rotação como $\pi/2$, o que implica em trocar o sinal do traço de quadratura resultante. Esta definição é objeto de convenção. O importante é escolher o ângulo de rotação e mantê-lo durante os cálculos.

No domínio da frequência, o operador que provoca uma rotação de fase constante ϕ em um sinal, mas não modifica seu espectro de amplitude, pode ser representado por

$$R(\omega, \phi) = \begin{cases} e^{i\phi}, & \omega > 0 \\ e^{-i\phi}, & \omega < 0, \\ \cos \phi, & \omega = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

onde i é a unidade imaginária.

O operador de Hilbert, no domínio da frequência, é obtido substituindo o valor do ângulo de rotação na equação acima.

$$H(\omega) = -i \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i, & \omega > 0 \\ e^{i\frac{\pi}{2}} = i, & \omega < 0, \\ 0, & \omega = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

onde

$$\operatorname{sign}(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega > 0 \\ -1, & \omega < 0 \\ 0, & \omega = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Fazendo a transformada de Fourier inversa, este operador é expresso, no domínio do tempo, como

$$h(t) = \frac{1}{\pi t}, \quad (2.4)$$

Logo, o traço sísmico $x(t)$ e seu traço de quadratura $y(t)$ estão relacionados por

$$y(t) = h(t) * x(t). \quad (2.5)$$

Pode-se expressar um operador que subtrai um ângulo ϕ da fase de um sinal em termos de filtro de quadratura. No domínio da frequência, ele é dado por

$$R(\omega, \phi) = \begin{cases} e^{-i\phi} = \cos \phi - i \sin \phi, & \omega > 0 \\ e^{i\phi} = \cos \phi + i \sin \phi, & \omega < 0 \\ \cos \phi, & \omega = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Comparando as equações 2.6 com 2.2, podemos escrever a seguinte expressão

$$R(\omega, \phi) = \cos \phi + H(\omega) \sin \phi, \quad (2.7)$$

sendo que a transformada inversa de Fourier é

$$r(t, \phi) = \delta(t) \cos \phi + h(t) \sin \phi, \quad (2.8)$$

sendo $\delta(t)$ o delta de Dirac.

2.2 Traço sísmico complexo

A análise de traço sísmico complexo (ou analítico) permite separar as informações de amplitude e fase, sem perder de vista as variações locais (Taner et al., 1979). Então, um traço sísmico $x(t)$ pode ser decomposto segundo a equação

$$x(t) = a(t) \cos \theta(t), \quad (2.9)$$

onde $a(t)$ representa a amplitude instantânea e $\theta(t)$ a fase instantânea, ambas funções que variam com o tempo (ver Figura 2.1).

O traço complexo $z(t)$ é formado considerando o traço sísmico de entrada $x(t)$ como sua parte real e o traço de quadratura $y(t)$ como sua parte imaginária. Desse modo

$$z(t) = x(t) + iy(t). \quad (2.10)$$

No domínio do tempo, o operador que faz estas rotações pode ser expresso pela equação 2.8. Fazendo a convolução de $h(t)$ com o traço sísmico $x(t)$ teremos o traço de quadratura $y(t)$, aplicando o operador $r(t, \phi)$ em $x(t)$ resulta em um traço rotacionado

$$\tilde{x} = r(t, \phi) * x(t) = x(t) \cos \phi + y(t) \sin \phi, \quad (2.11)$$

Sendo $\theta(t)$ o ângulo de rotação que, em um tempo t , maximiza \tilde{x} . Por definição, o conjunto desses máximos valores é a envoltória do traço. Assim,

$$a(t) = x(t) \cos \theta(t) + y(t) \sin \theta(t), \quad (2.12)$$

em que a derivada parcial em relação ao ângulo de rotação é igual a zero:

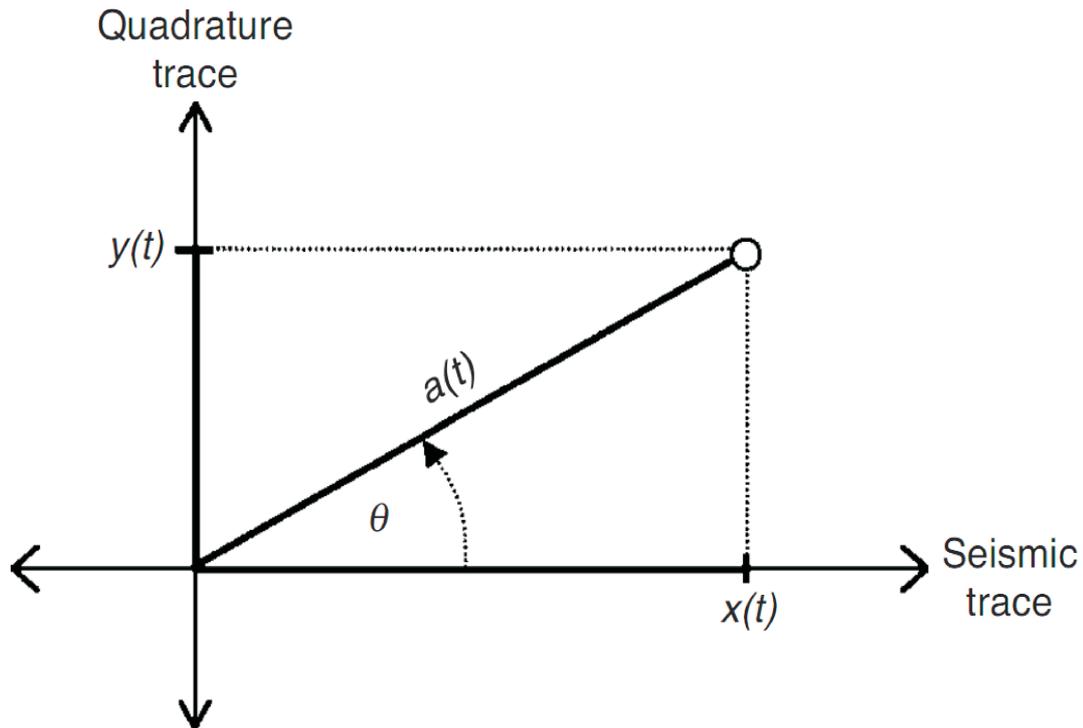


Figura 2.1: A amplitude instantânea $a(t)$ e a fase instantânea $\theta(t)$ derivadas do traço sísmico $x(t)$ e o traço de quadratura $y(t)$.

$$\frac{\partial a(t)}{\partial \theta(t)} = -x(t) \sin \theta(t) + y(t) \cos \theta(t) = 0, \quad (2.13)$$

O que nos fornece

$$x(t) \sin \theta(t) = y(t) \cos \theta(t). \quad (2.14)$$

Pegando os quadrados das equações 2.12 e 2.14, e somando-os membro a membro, chegamos na expressão para a envoltória do traço $x(t)$ em termos dos traços real e de quadratura

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

A fase, é obtida a partir da equação 2.14:

$$\theta(t) = \arctan[z(t)] = \arctan \left[\frac{y(t)}{x(t)} \right]. \quad (2.16)$$

A amplitude instantânea pode ser escrita em termos do traço complexo $z(t)$ e seu complexo conjugado $\bar{z}(t)$, como

$$a(t) = \sqrt{z(t)\bar{z}(t)} = |z(t)|. \quad (2.17)$$

Logo, usando a teoria do traço complexo, o par de atributos fundamentais, a amplitude e a fase instantânea, podem ser facilmente calculados na forma trigonométrica:

$$z(t) = a(t) \cos \theta(t) + ia(t) \sin \theta(t). \quad (2.18)$$

Note a correspondência nas equações 2.9 e 2.18. Na Figura 2.2 estão representadas a parte real e a parte imaginária do traço sísmico complexo. Assim o traço sísmico pode ser representado como funções separáveis e independentes, amplitude e fase instantâneas. Isso é a essência da análise de traço sísmico complexo, separar a informação de amplitude da informação da fase do dado (Santos, 2009).

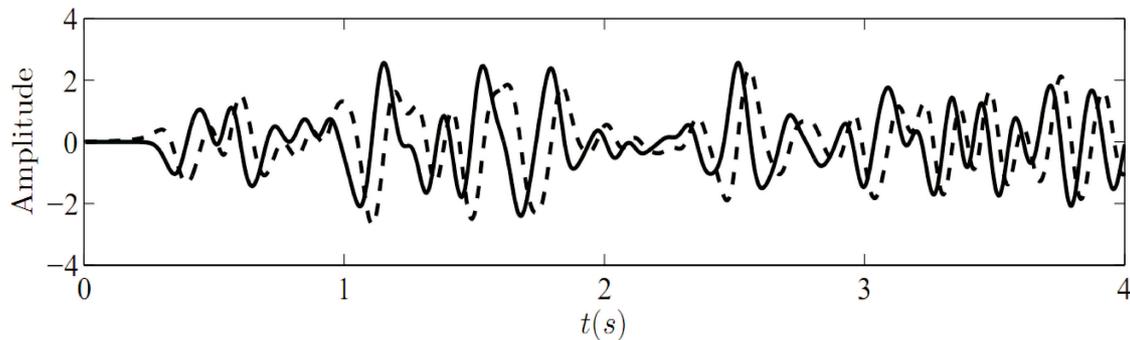


Figura 2.2: Parte real linha contínua (traço real) e parte imaginária linha tracejada (traço de quadratura).

É bom lembrar que o traço complexo $z(t)$ guarda as informações espectrais do traço sísmico real. No domínio da frequência, temos:

$$Z(\omega) = X(\omega) + iY(\omega), \quad (2.19)$$

onde

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega), \quad (2.20)$$

Das equações 2.19 e 2.20 podemos chegar em

$$Z(\omega) = X(\omega) + iH(\omega)X(\omega). \quad (2.21)$$

Substituindo a expressão para $H(\omega)$, dada pela equação 2.2, temos que

$$Z(\omega) = \begin{cases} 2X(\omega), & \omega > 0 \\ 0, & \omega \leq 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

Logo, o sinal analítico é complexo e a sua parte real é idêntica ao sinal original. A Figura 2.2 mostra o traço sísmico complexo.

2.3 Atributos sísmicos

Segundo Taner et al. (1979) atributos sísmicos são quaisquer informações obtidas através de dados sísmicos, ou seja através de medições diretas, lógicas ou baseadas na experiência e conhecimentos anteriores. Os atributos sísmicos são gerados para enfatizar a característica desejada, a qual não é diretamente identificada nos dados. Eles podem ser obtidos a partir de dados ainda não empilhados, como é o caso do conhecido atributo variação de amplitude com o afastamento da fonte, *AVO* (*amplitude variation with offset*), ou podem ser obtidos a partir de dados já empilhados, como é o caso dos atributos usados nesse trabalho.

Dentre os vários atributos existentes, alguns podem ser usados como indicadores de hidrocarbonetos, outros como indicadores de falhas geológicas, ou seja, dependendo do tipo de análise em questão, deve-se escolher o tipo adequado de atributo, como veremos no capítulo 3. Existem centenas de opções de atributos, e algumas estão mostrados no Anexo I, motivo pelo qual gera confusão nos geocientistas diante de tantos atributos. Logo o entendimento da geração dos atributos é fundamental para análise correta. Dessa forma, nesse trabalho foram aplicados os atributos básicos do traço sísmico complexo: amplitude instantânea, cosseno de fase, fase instantânea e frequência instantânea. Usamos também o atributo **TecVa** que é uma técnica desenvolvida internamente pela PETROBRAS.

Os atributos sísmicos podem ser gerados de diversas maneiras. Uma das formas de se classificar o modo como são gerados está esquematizada na Figura 2.3, ou seja, dentre várias formas de classificação, os atributos sísmicos gerados após o empilhamento, podem ser classificados:

- baseados na seção sísmica;
- baseados em eventos ou horizontes;
- volumétricos;

Os atributos sísmicos baseados na seção sísmica são resultados de um processamento específico em toda uma seção com o objetivo de realçar alguma característica de interesse. Geralmente, são gerados a partir da análise do traço sísmico complexo (Taner et al., 1979).

Os atributos sísmicos baseados em eventos são extraídos da sísmica usando um horizonte como referência. Podem ser criados da seguinte forma:

- Usando valores instantâneos ao longo do traço;
- Usando valores em torno da superfície de referência usando um único traço sísmico;
- Usando valores em torno da superfície de referência usando vários traços sísmicos.

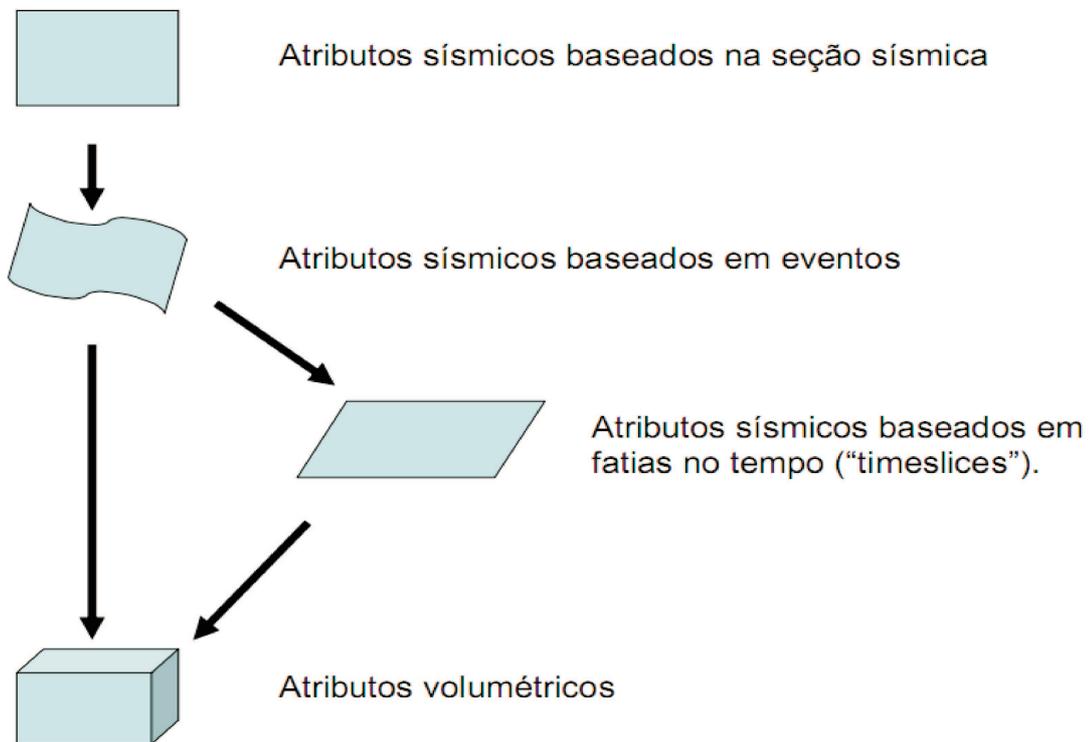


Figura 2.3: Classificação dos atributos segundo Chen e Sidbey (1997).

Logo, a utilização de valores do traço sísmico para o cálculo do atributo, como ilustrado na Figura 2.4, serve para melhorar a relação sinal-ruído e para enfatizar os aspectos relevantes do atributo. O algoritmo para o cálculo dos atributos do traço complexo é designado para fornecer valores exatos para cada amostra no tempo.

Existem diferentes maneiras para se definir a janela de onde serão extraídos os dados da sísmica para o cálculo do atributo sísmico. Na Figura 2.5A são ilustradas algumas formas de se definir janelas com comprimento variável, onde o atributo é gerado em função de dois horizontes diferentes, tais como topo e base de uma zona estratigráfica (com janelas variantes no tempo e deslocamento variáveis em relação ao evento). Na Figura 2.5B é ilustrada outra forma de definir a janela quando é tomada em torno de um único evento (com janela fixa em

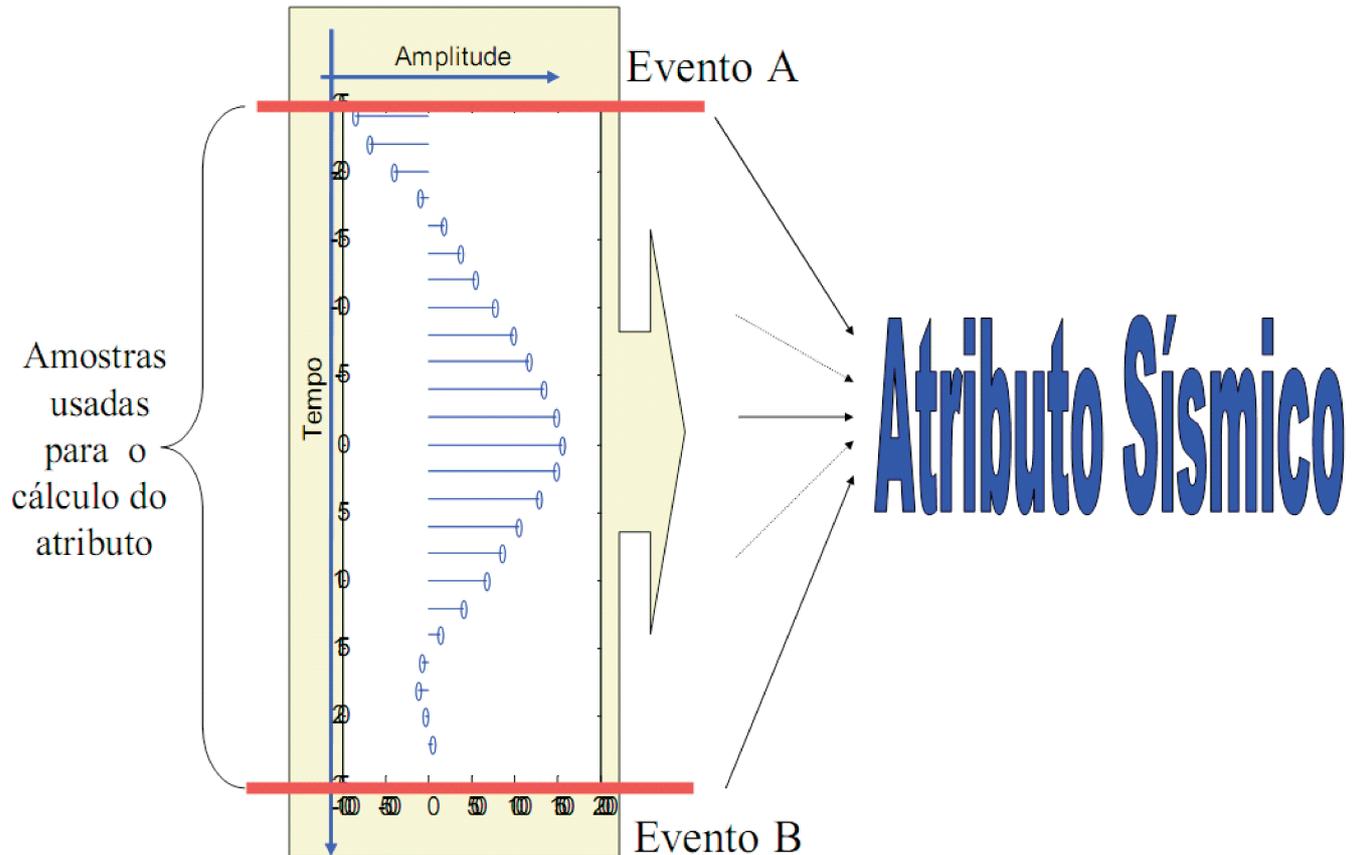


Figura 2.4: Cálculo do atributo sísmico utilizando valores de um traço sísmico em torno de uma superfície de interesse.

torno de um determinado evento, com deslocamento variável em torno do evento), (Chen e Sidbey, 1997). Independentemente do tipo de janela utilizada, verifica-se que o tamanho da janela depende da aplicação e que não existe uma regra pré-definida para sua escolha. Todas as medidas instantâneas são associadas com um instante de tempo em vez de uma média sobre um intervalo de tempo (como veremos no atributo TecVa).

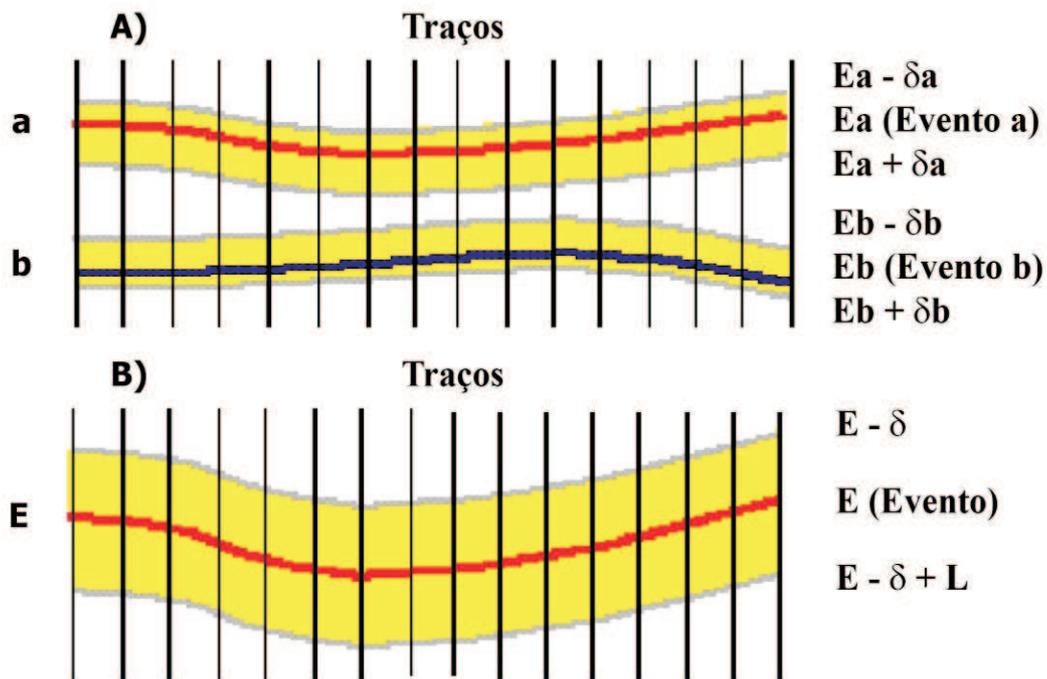


Figura 2.5: Tipos de janelas usadas para a obtenção do atributo sísmico baseados em eventos.

Já os atributos volumétricos são uma extensão dos métodos baseados em eventos a todo cubo sísmico. Independente da forma como os atributos são extraídos, geralmente, eles são direta ou indiretamente calculados utilizando a análise de traço sísmico complexo.

2.3.1 Amplitude instantânea (envelope)

A amplitude instantânea às vezes é chamada de amplitude do envelope. O envelope do traço pode ser descrito como uma função com pequenas variações que conecta os picos de maiores amplitudes da onda (ver Figuras 2.6 e 2.7) ou de intensidade da reflexão (*reflection strength*), sendo definido como a raiz quadrada da energia total do sinal sísmico em um instante de tempo, ou seja, é a amplitude da energia sísmica total do traço sísmico num instante qualquer e descreve o fluxo de energia na subsuperfície. Simplesmente é a amplitude do traço sísmico complexo e é independente do sinal e da fase Taner et al. (1979).

A amplitude do envelope pode ser calculada obtendo a raiz quadrada da soma dos quadrados das componentes reais e imaginárias, e aplicando esse valor para cada amostra do traço em um determinado instante de tempo, sendo definida como:

$$A(t) = \sqrt{r^2(t) + g^2(t)}. \quad (2.23)$$

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 laterais, ou seja, a refletividade.
- Eventos *brigh spots*, que são possíveis acumulações de gás.
- Limites de seqüências sísmicas e mudanças de litologia.
- Discordâncias.
- Identificação de canais.

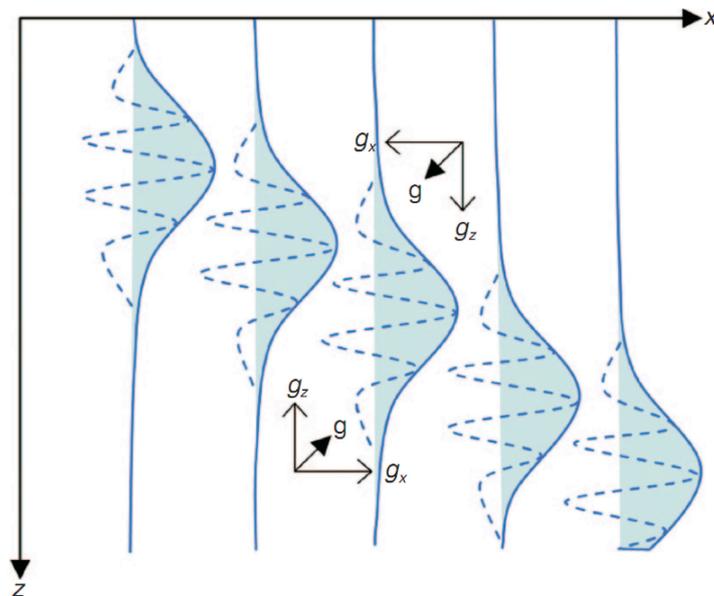


Figura 2.6: Ilustração em duas dimensões da amplitude instantânea vetor \mathbf{g} com as componentes g_x e g_z . O campo sólido é o envelope ou amplitude instantânea do traço.

As fortes reflexões de energia podem ser associadas à 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.

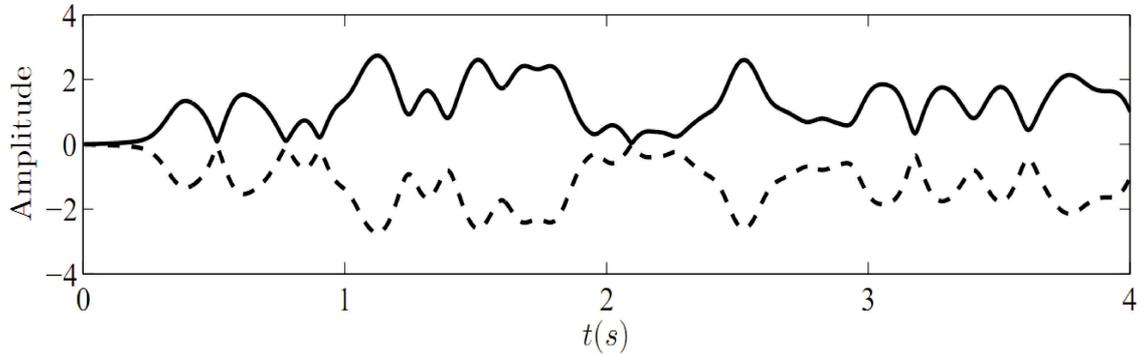


Figura 2.7: Amplitude instantânea.

2.3.2 Fase instantânea

O atributo de fase instantânea é uma medida da continuidade da propagação da onda num meio. Em cada descontinuidade a onda sofre mudanças de fase. A fase instantânea enfatiza a coerência (continuidade/descontinuidade) espacial das reflexões fornecendo um caminho para que eventos fracos e fortes apareçam em equilíbrio. A fase instantânea é uma ferramenta muito efetiva por delinear descontinuidades, falhas, *pinchouts*, angularidades de eventos com atitudes de mergulho diferentes. Isto está relacionado ao fato de que a fase instantânea enfatiza a continuidade dos eventos, pois ignora a informação de amplitude das amostras no tempo, conseqüentemente, descontinuidades que são difíceis de serem observadas em seções sísmicas convencionais, devido a baixas amplitudes, aparecerão mais claramente em exibições de fase. Matematicamente, é definida como:

$$\phi(t) = \arctan \left[\frac{g(t)}{r(t)} \right], \quad (2.24)$$

Onde: $\phi(t)$ é a fase instantânea, $g(t)$ o traço sísmico da quadratura e $r(t)$ o traço sísmico real.

A Figura 2.8 e 2.9 mostram os gráficos das funções de amplitude e fase instantânea de um traço sísmico.

Os valores do atributo sísmico de fase instantânea estão compreendidos no intervalo $[-\pi, \pi]$. Na Figura 2.8 e 2.9 observamos que, onde o gráfico da função de fase instantânea cruza o eixo do tempo, isto é, assume o valor de zero, temos um máximo local com valores positivos na função de amplitude sísmica. Como um máximo local com valores positivos de amplitude dentro de um traço sísmico representa um evento sísmico, concluímos que o atributo de fase instantânea é um bom indicador de eventos sísmicos. As linhas tracejadas no gráfico da função de fase instantânea representam os pontos onde a função salta de π a $-\pi$.

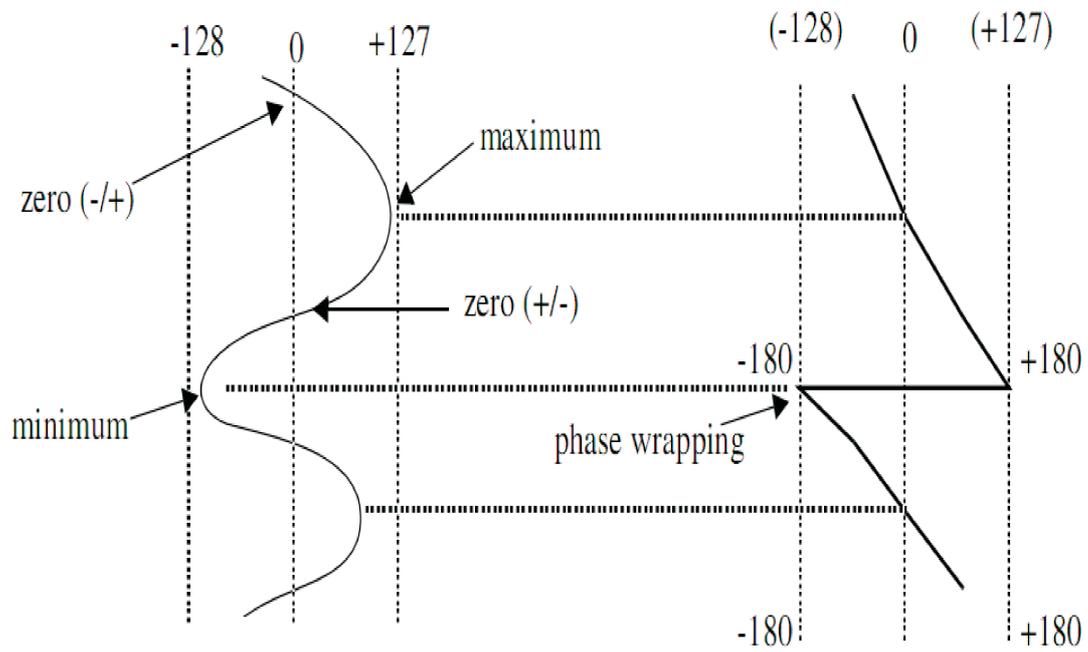


Figura 2.8: Amplitude do traço: lado esquerdo e fase instantânea do traço: lado direito.

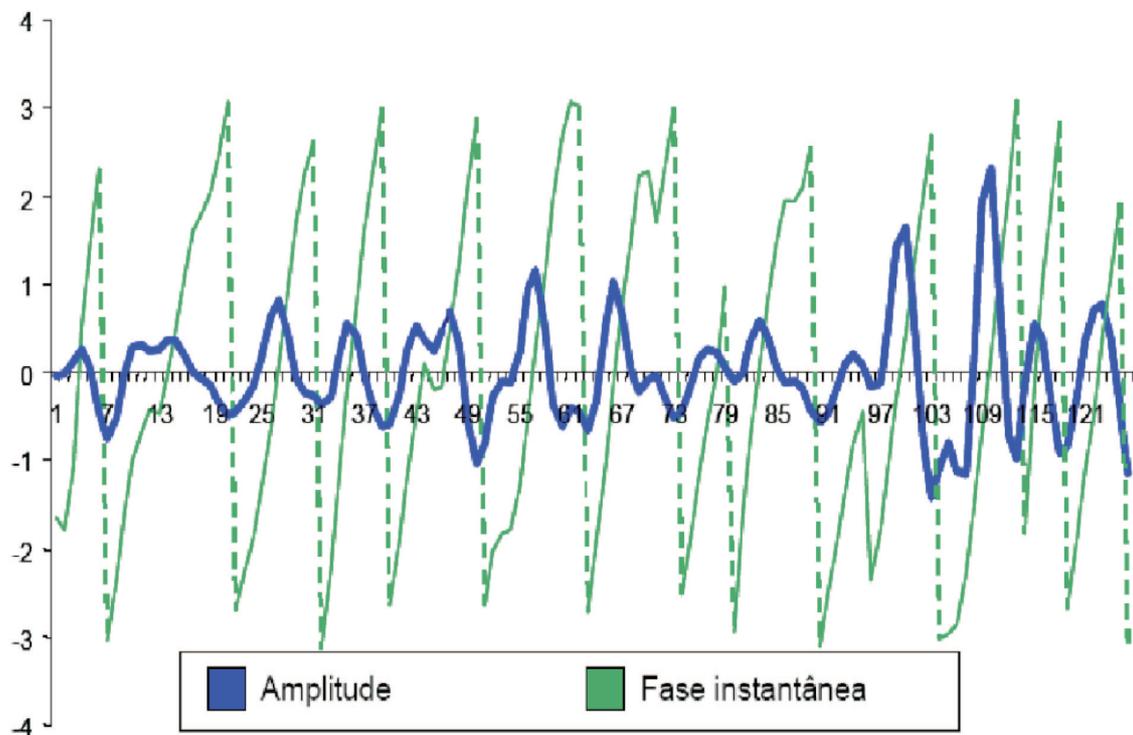


Figura 2.9: Amplitude sísmica e fase instantânea de um traço sísmico real.

Em termos gerais, um dado sísmico registrado move-se do pico máximo para um mínimo, a fase instantânea muda de 0^0 para 180^0 e no mínimo, em torno de 180^0 e -180^0 .

Este atributo é um dos mais úteis no mapeamento de horizontes, já que equaliza o dado e torna os eventos mais fracos fáceis de serem mapeados por um intérprete. Abaixo algumas aplicações do atributo:

- Bom indicador em continuidades laterais;
- Destituído de informações de amplitude, de forma que todos os eventos aparecem representados;
- Visualização detalhada de elementos estratigráficos;
- Em alguns casos contatos de fluidos.

2.3.3 Cosseno de fase

De forma bem simples podemos dizer que o cosseno de fase instantânea pode ser descrito como a normalização do traço. O traço registrado, definido como o produto da amplitude e fase instantânea, equação 2.9. Logo podemos afirmar que o cosseno de fase instantânea é então dado por:

$$\cos \theta(t) = \frac{x(t)}{A(t)}, \quad (2.25)$$

Em outras palavras, o traço registrado, $x(t)$, é dividido pela intensidade de reflexão $A(t)$.

O cosseno de fase instantânea não tem informações de amplitude, já que ele reescala o dado de saída numa faixa de -1.0 a 1.0. Dessa forma esse atributo representa o dado sísmico com todos os contrastes de amplitude removidos, funcionando como se fosse um AGC (*Controle de ganho automático*) perfeito (Barnes, 2007).

O efeito de normalização melhora a continuidade do refletor e otimiza a aparência visual dos cantos, como falhas e bordas estratigráficas. Este atributo é comumente utilizado para guiar a interpretação em área com baixa resolução de amplitude para otimizar a definição e delimitação de amplitudes, revelando detalhes das reflexões.

Esse atributo assemelha-se a um dado processado com uma janela de AGC muito curta (Barnes, 2007), semelhante a fase instantânea, mas com a vantagem de não apresentar discontinuidades nas amplitudes, oscilando suavemente entre valores negativos e positivos. Tanto a fase instantânea como o cosseno de fase trazem as mesmas informações.

2.3.4 Frequência instantânea

Considerando que a frequência instantânea é a derivada da fase instantânea em relação ao tempo e independente da fase e da amplitude, esse atributo é muito sensível ao conteúdo de frequência do dado. Pode indicar continuidade das reflexões, ou em alguns casos de diminuição do conteúdo de frequência, presença de hidrocarboneto ou fraturas.

Embora $\theta(t)$ receba a denominação de fase instantânea, ela também contém as informações de frequência do traço. Matematicamente, a frequência instantânea é definida como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (2.26)$$

onde,

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}. \quad (2.27)$$

Esta definição traz uma dificuldade, que é o fato de $\theta(t)$ não ser contínuo, visto que é, normalmente, computado entre $-\pi$ e π . Há, pelo menos, duas maneiras de contorná-la, a primeira é desdobrar a fase, corrigindo os saltos de 2π , de modo que a função passe a ser contínua, outra alternativa é derivar diretamente a equação 2.16, onde chegamos:

$$\omega(t) = \frac{x(t)y'(t) - y(t)x'(t)}{x^2(t) + y^2(t)}, \quad (2.28)$$

onde $x'(t)$ e $y'(t)$ representa as derivadas temporais de $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente. Scheuer e Oldenburg (1988) sugerem a expressão

$$\omega = \frac{1}{\delta(t)} \left[\frac{z(t_0 + \delta t)}{z(t_0)} \right], \quad (2.29)$$

onde t_0 é o instante em que se deseja calcular a frequência e δt é o intervalo de amostragem do sinal (esta escolha de δt impõe que o limite para a frequência instantânea seja a frequência de Nyquist). A Figura 2.10, mostra a frequência instantânea do traço sísmico. Os *spikes* na frequência instantânea corresponde à valores mínimo no envelope do traço.

Esse atributo pode ser usado como:

- Indicador de hidrocarboneto através de anomalias de baixa frequência. Este efeito às vezes é acentuado por sedimentos não consolidados devido ao conteúdo de óleo em seus poros;

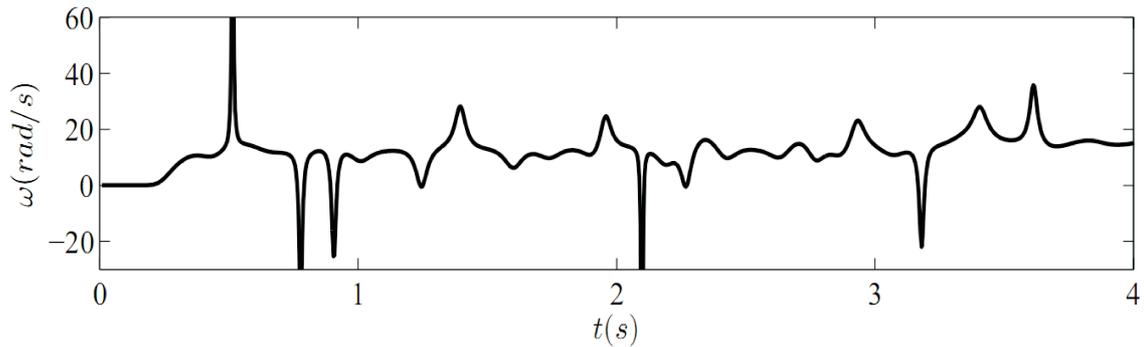


Figura 2.10: Frequência instantânea.

- Indicador de fraturas desde que possa aparecer em zonas de baixa frequência;
- Indicador de espessuras das camadas. Altas frequências indicam interfaces mais finas como lâminas de folhelho, frequências inferiores são indicativas de geometrias de camadas mais espessas como areias.

2.3.5 Técnica Volume de Amplitudes - tecVA

A técnica Volume de Amplitude se baseia no princípio da sismocamada Elementar (SCE) (Santos e Amorim, 2005).

A sismocamada elementar ou camada de rocha de menor espessura que o dado sísmico consegue resolver, é definida como elemento chave de ponderação para o cálculo e obtenção do dado sísmico com a técnica Volume de Amplitudes (tecVA).

Sendo assim, apesar dessa técnica ser robusta, quanto maior for o grau de fidelidade na tomada dos valores dessa SCE para determinado dado sísmico, maior será a resposta geológica, litológica e estrutural, advinda do dado sísmico tratado, ou seja:

- Dado um traço sísmico, em um determinado intervalo de tempo t e período T (Ver Figura 2.11):
- Sendo t_1 topo de uma camada e t_2 representa a base desta camada.

Dessa forma a SCE é a janela em tempo que dará o número de amostras a ser utilizada no cálculo da média móvel ao longo do traço sísmico (ver Figura 2.12).

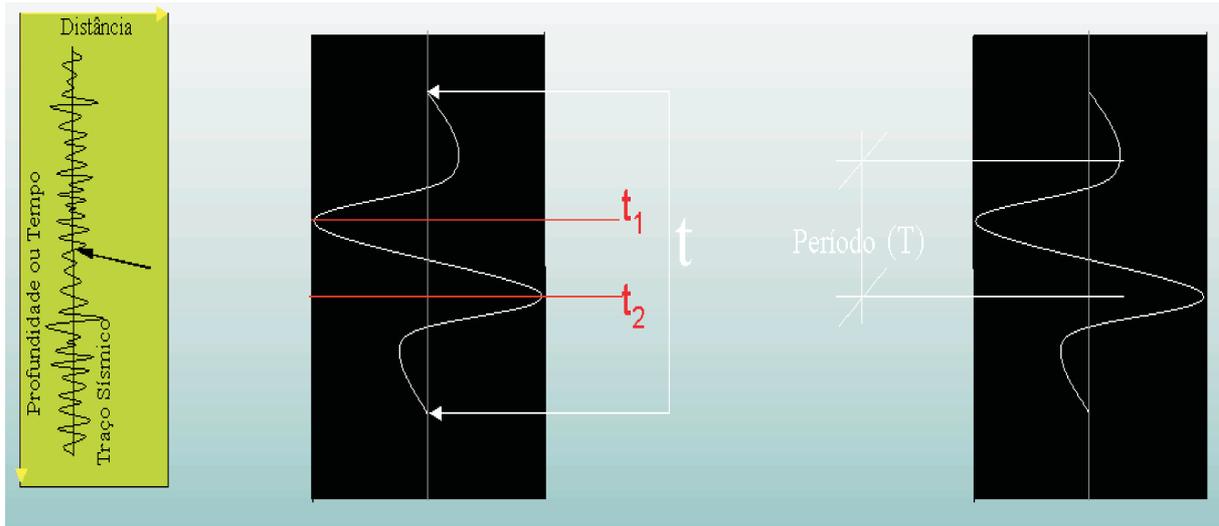


Figura 2.11: Comprimento da janela móvel para o calculo do atributo tecVA.

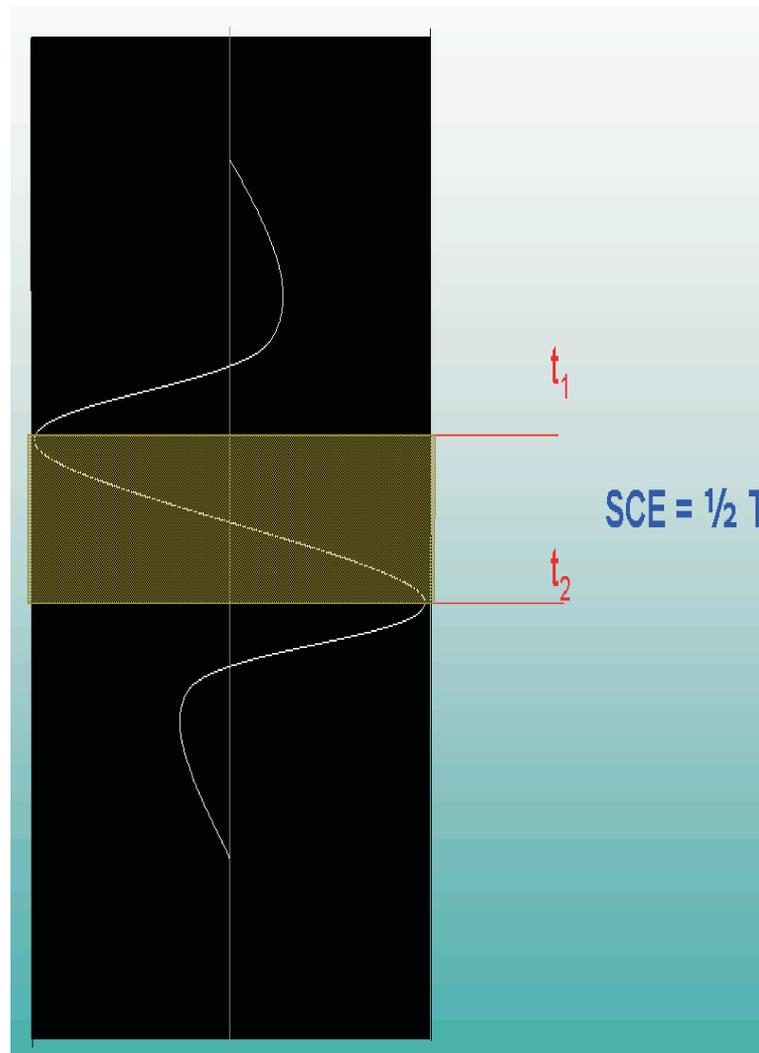


Figura 2.12: Janela móvel da SCE.

Dois passos devem ser feitos para aplicar esse atributo:

1. Calcular a amplitude RMS (semelhante com amplitude instantânea, porém mais suavizada) ou o valor absoluto do traço, promovendo uma estimativa do envelope do traço sísmico, sendo afetados por um fator de escala proporcional a janela definida (SCE). Na Figura 2.13 mostra os traços 3 e 4 com os resultados dos cálculos do valor absoluto e da amplitude RMS, respectivamente. A amplitude RMS e o valor absoluto podem ser calculados pela seguinte fórmula:

$$\bar{X}_{RMS_i} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{j=i+M/2} x_j^2}, \quad (2.30)$$

$$\bar{X}_{ABS_i} = \frac{\sum_{j=i-M/2}^{j=i+M/2} |x_j|}{M}, \quad (2.31)$$

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 .

2. Aplicação da rotação de fase no dado com o resultado da amplitude RMS (transformada de Hilbert).

Lembrando que esse comprimento da janela é dado em milissegundos. Na Figura 2.14 mostra o traço 7 com o atributo.

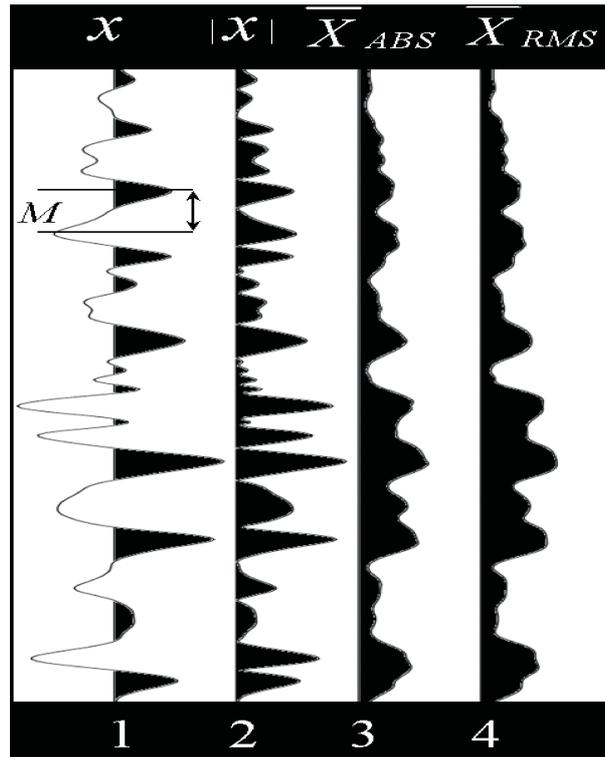


Figura 2.13: Traço com valor absoluto e amplitude RMS.

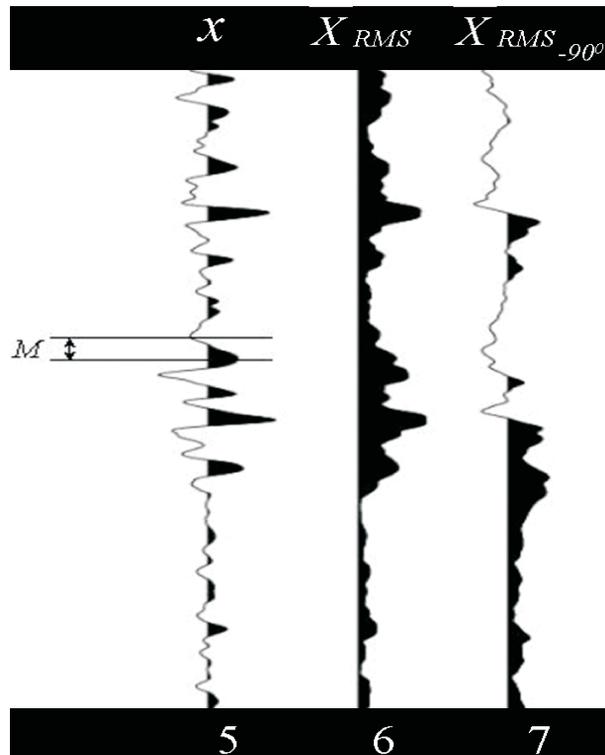


Figura 2.14: Traço com amplitude RMS e atributo tecVA.

CAPÍTULO 3

Resultados e discussões

Neste capítulo serão mostrados os resultados da aplicação dos atributos nos dados sísmicos das Bacias do Recôncavo e da Nova Scotia.

Dessa forma, procuramos sempre comparar o dado sísmico original (sem atributo) com o dado sísmico após aplicação dos atributos, discutindo simultaneamente quais aspectos cada atributo realça nos dados, como até então vinha sendo mencionados na teoria nos capítulos anteriores, e quando possível mostrar alguma feição geológica nos mesmos.

Com o intuito de diversificar o estudo de tais atributos, foram selecionadas três linhas sísmicas 2D pós-empilhadas, uma terrestre (0026-1190) e duas marinhas (11 e 19), cuja localização pode ser vista no mapa das Figuras 3.1 e 3.2.

Os atributos foram aplicados ao conjunto de linhas sísmicas usando o aplicativo *Poststack Family* (ver Figura 3.3) do *software OpenWorks* da empresa Landmark.

Foram colocados primeiramente os resultados da linha sísmica terrestre, já que a mesma tem baixíssima qualidade se compararmos com as linhas sísmicas marinhas. De forma a facilitar a discussão dos resultados, inserimos nas figuras com atributos, polígonos e setas indicativas.

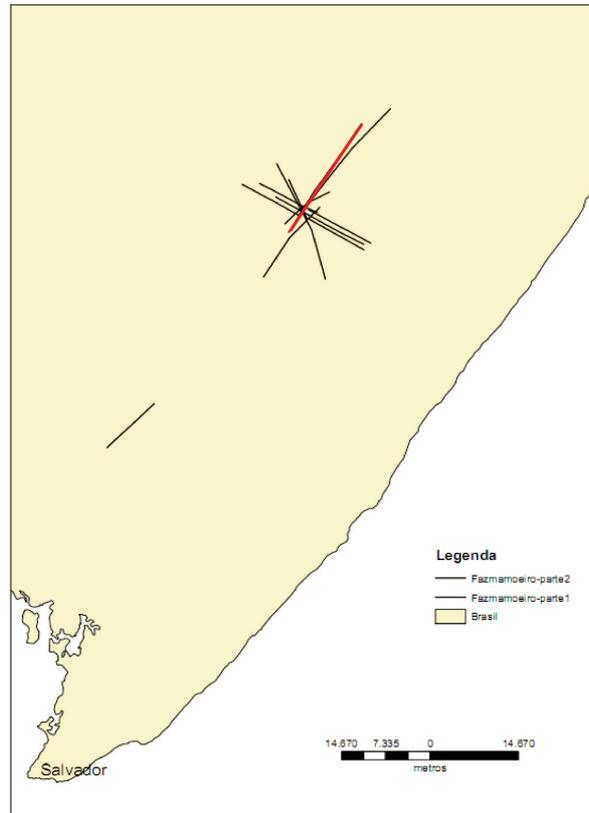


Figura 3.1: localização da linha sísmica terrestre (BDP).

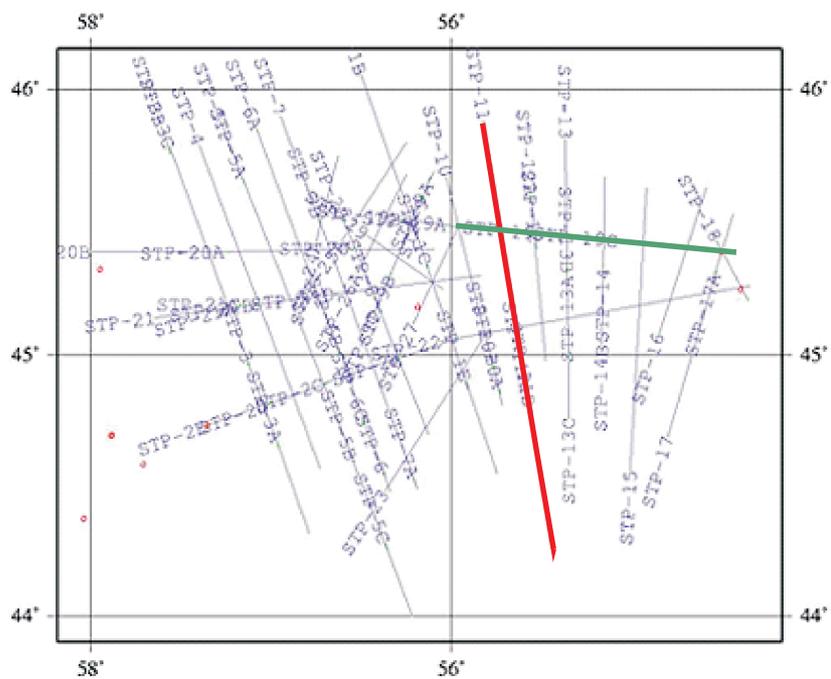


Figura 3.2: localização das linhas sísmicas marinhas (GSC).

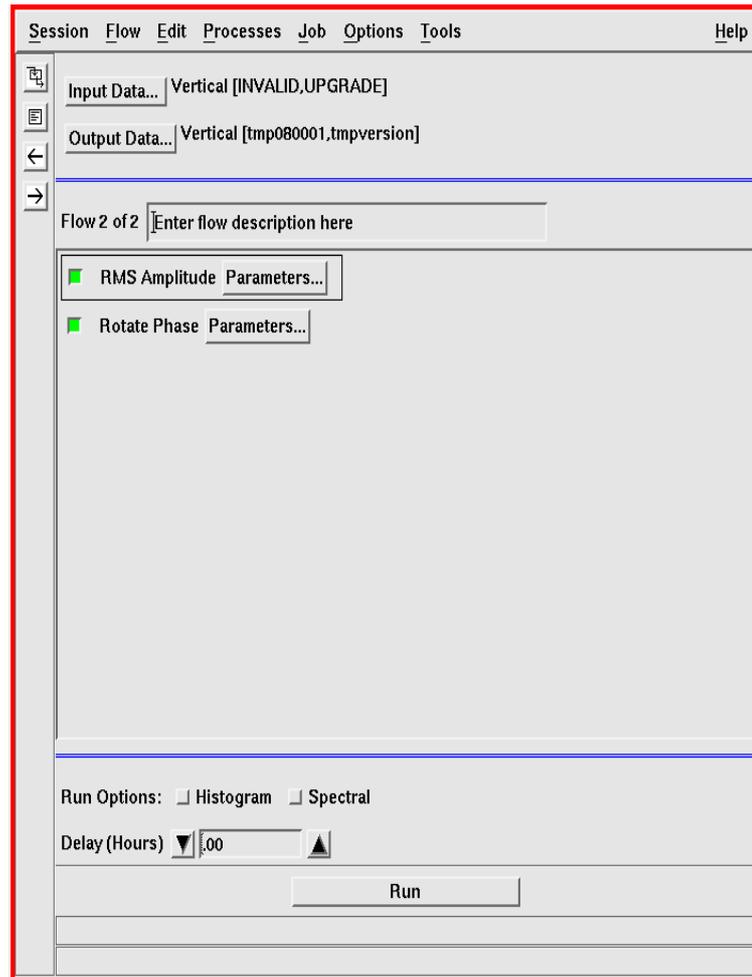


Figura 3.3: Janela do aplicativo *Poststack Family* do *OpenWorks*.

3.1 Amplitude instantânea

Com aplicação desse atributo, foram rastreados algumas regiões (setas azuis) onde os refletores foram bem valorizados, tanto na seção sísmica terrestre como nas seções sísmicas marinhas, como mostram as Figuras de 3.4 à 3.10. Na Figura 3.9 observa-se que o domo de sal (retângulo azul) e o canal (setas amarelas) ficaram mais visíveis. Foi ampliada a região com o canal para melhor visualização (na Figura 3.10).

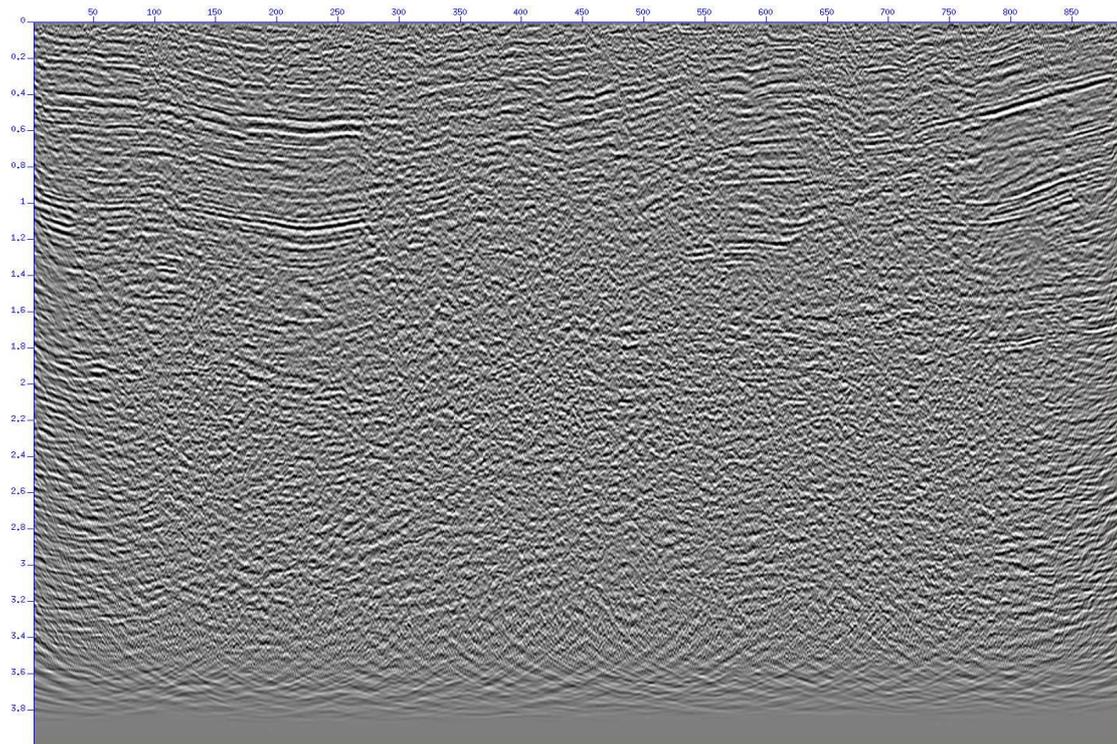


Figura 3.4: Linha 0026-1190 - original (migrada).

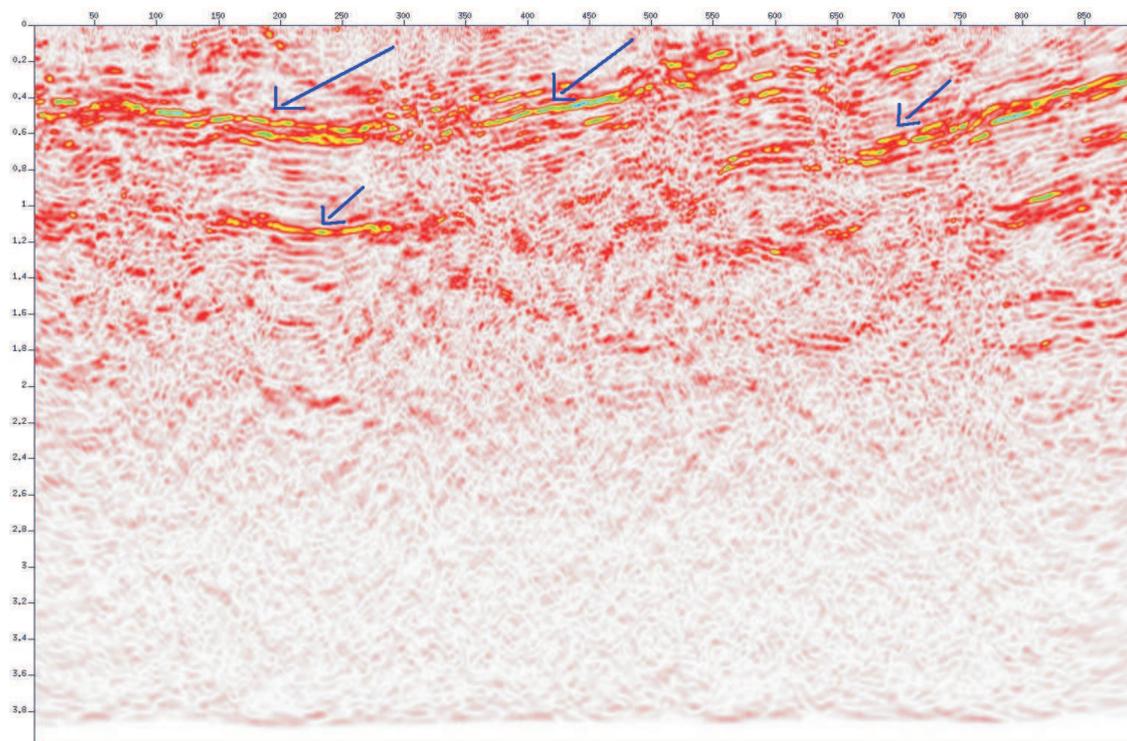


Figura 3.5: Linha 0026-1190 - com atributo envelope com escala de cor.

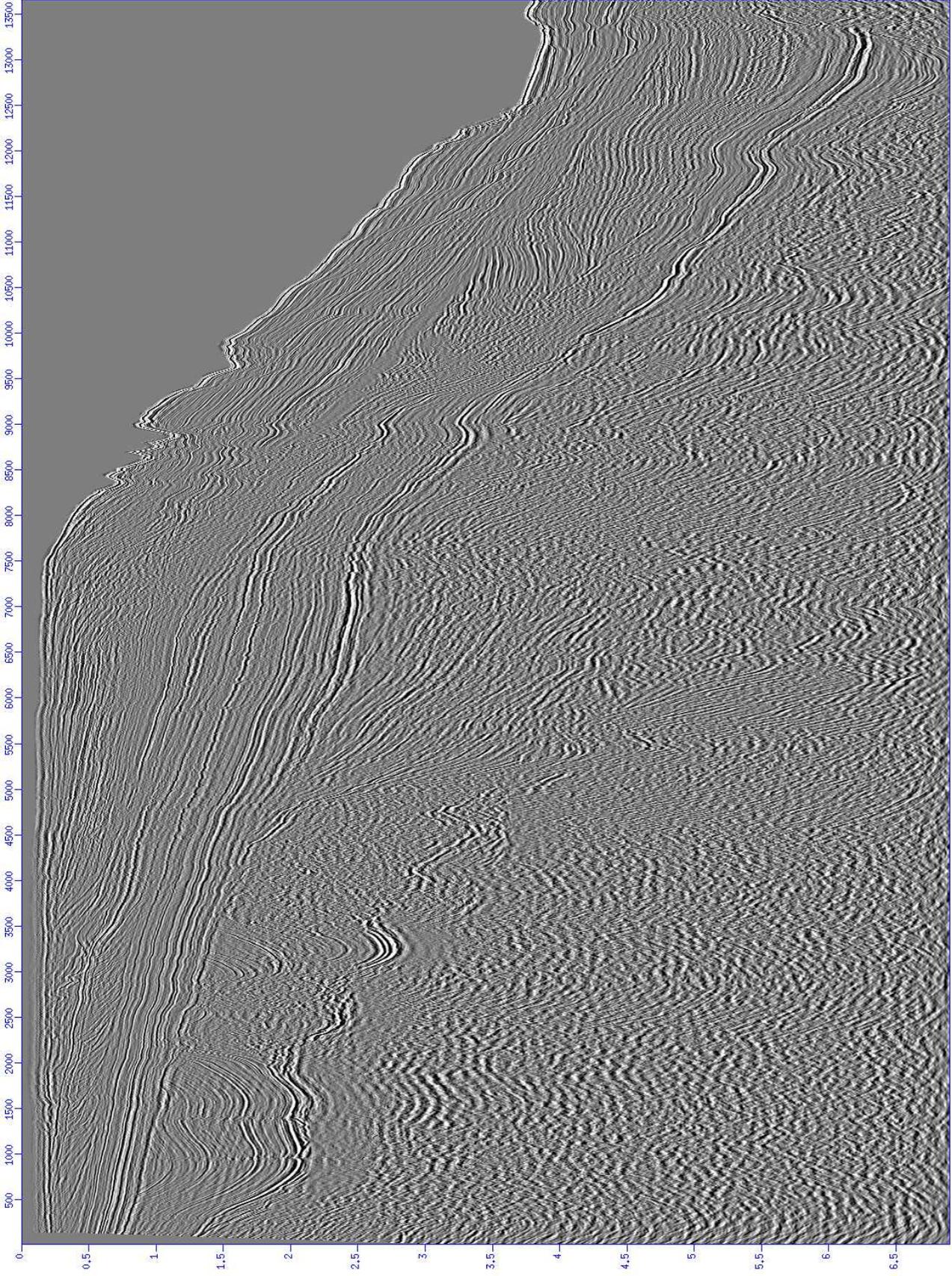


Figura 3.6: Linha 11 - original (migrada).

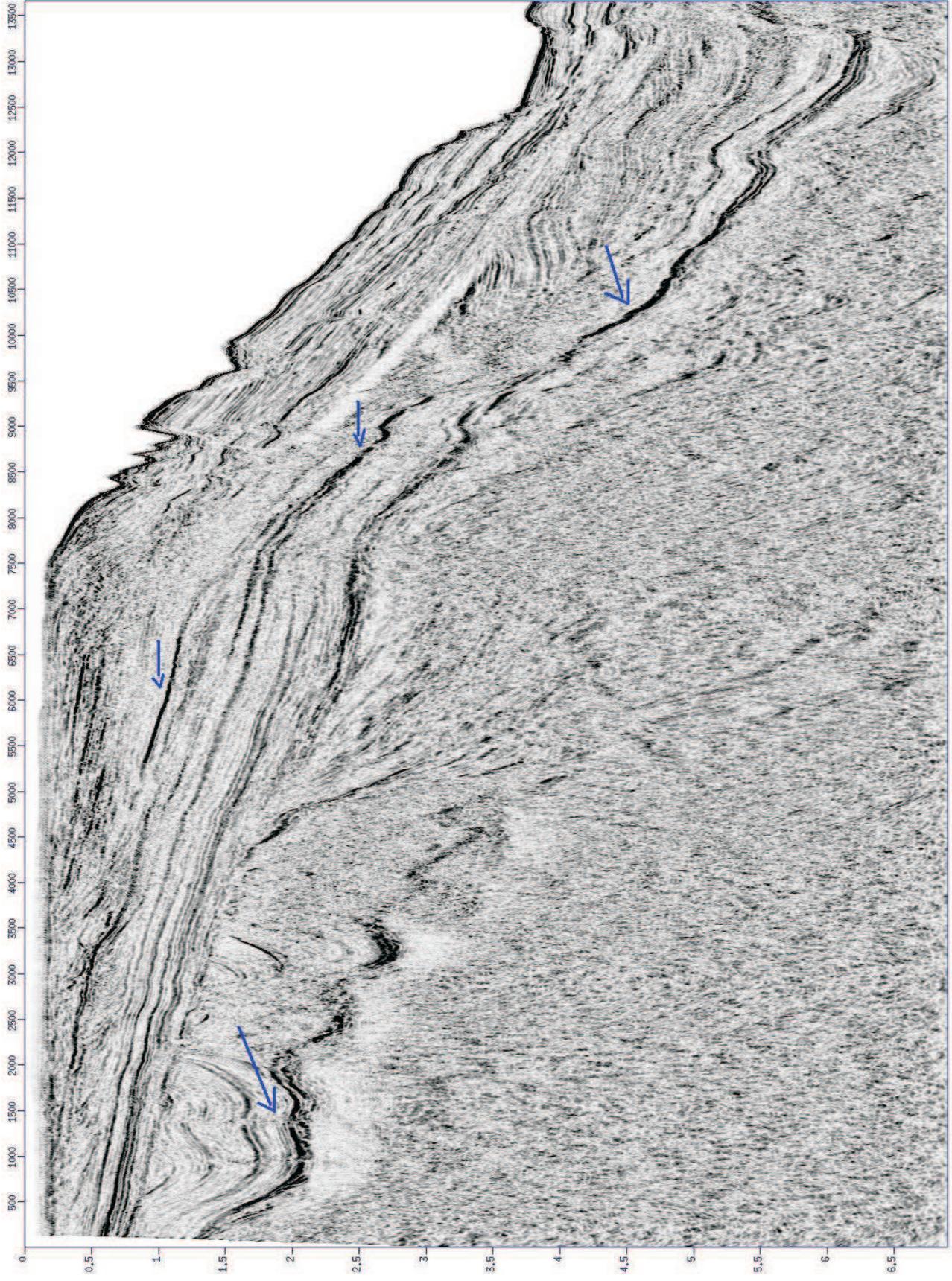


Figura 3.7: Linha 11 - com atributo envelope.

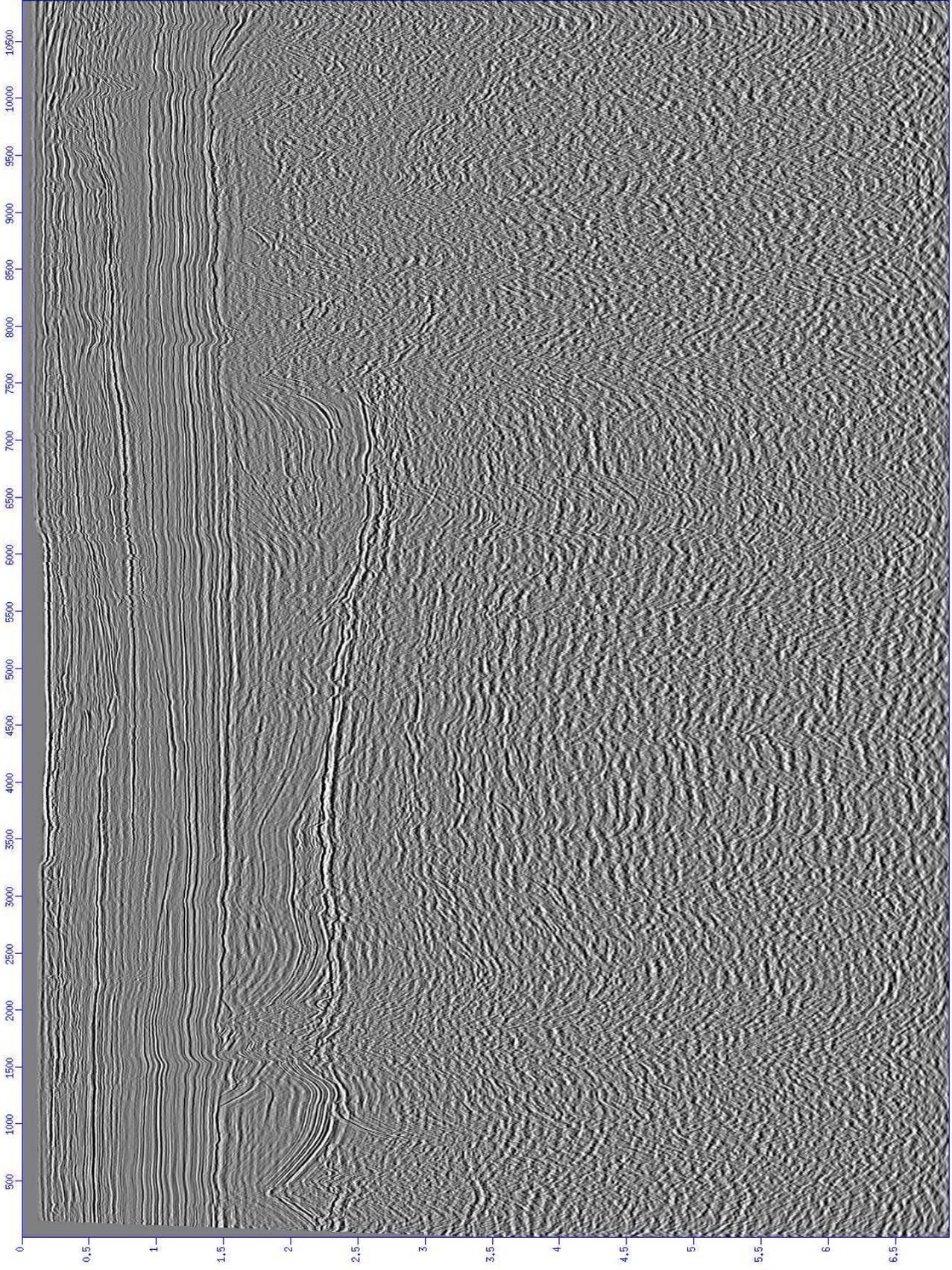


Figura 3.8: Linha 19 - original (migrada).

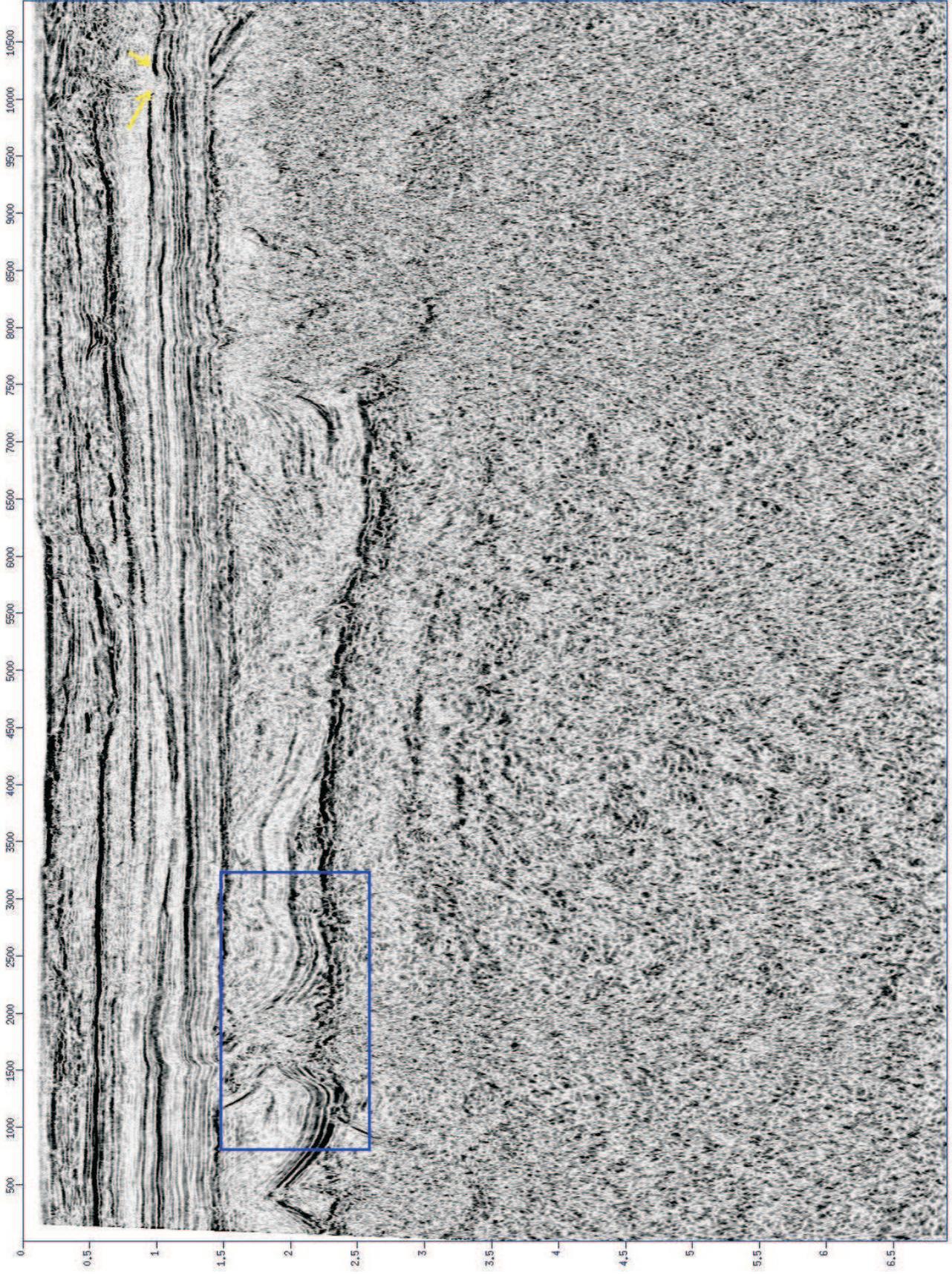


Figura 3.9: Linha 19 - com atributo envelope.

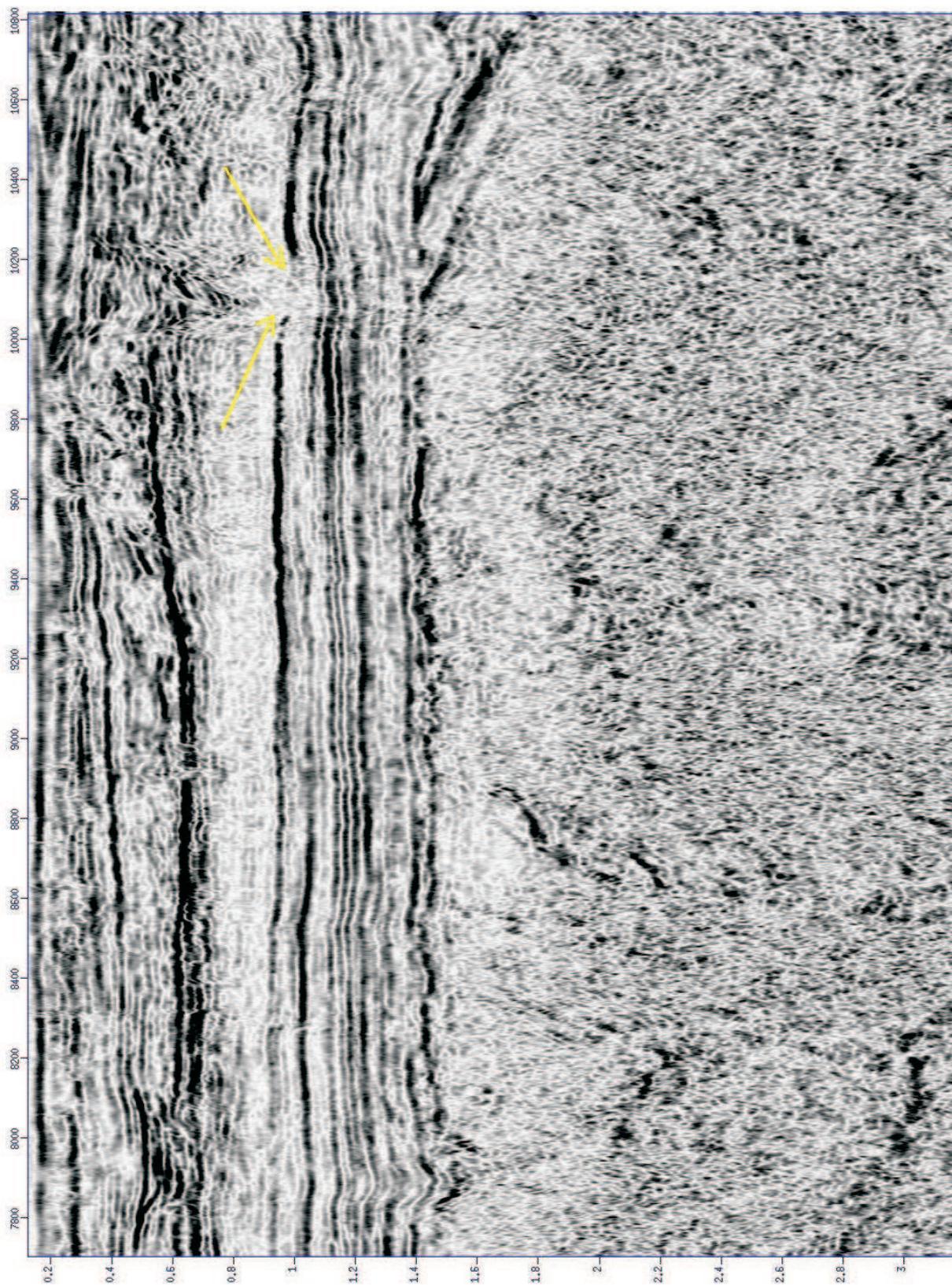


Figura 3.10: Linha 19 - ampliação da região que tem o canal.

3.2 Fase e cosseno de fase instantânea

Esses dois atributos possuem resultados semelhantes já que estão relacionados com a fase do traço sísmico complexo.

Observamos nas Figuras de 3.11 à 3.19 que os contrastes de amplitude foram removidos, em todas as seções, principalmente nas regiões mais profundas das seções sísmica, onde as amplitude dos refletores são menores. Como o atributo normaliza (cosseno de fase instantânea), e equaliza (fase instantânea) os dados sísmicos, os horizontes com amplitudes mais baixas ficam mais fáceis de serem rastreados.

O retângulo amarelo mostra (em todas as seções com atributo) que houve uma melhora na continuidade lateral dos refletores mais fundos como se estivesse dado um AGC. E as setas amarelas indicam os refletores que ficaram mais definidos com esses atributos.

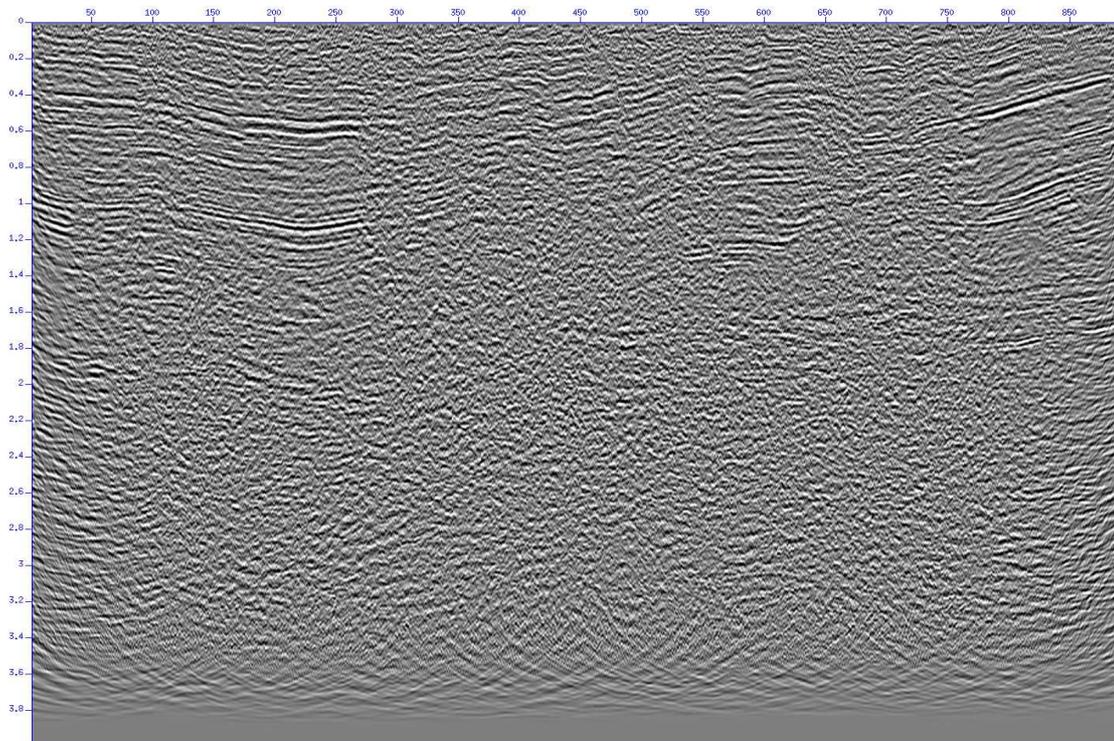


Figura 3.11: Linha 0026-1190 - original (migrada).

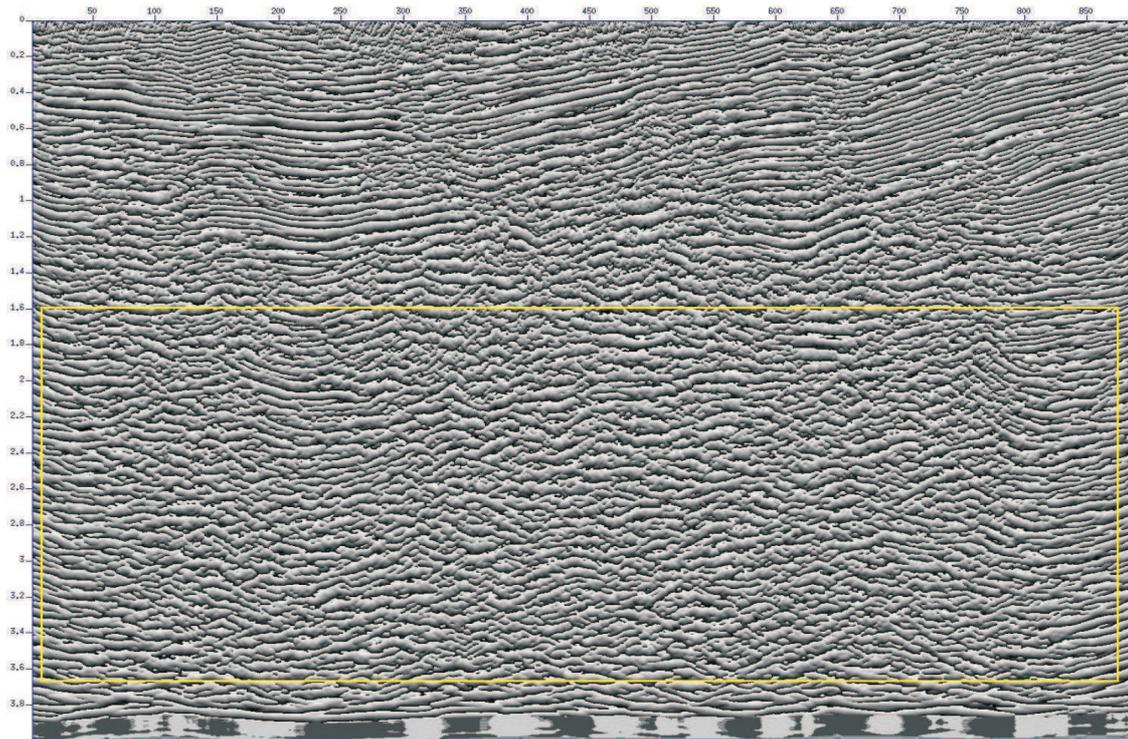


Figura 3.12: Linha 0026-1190 - com atributo fase instantânea.

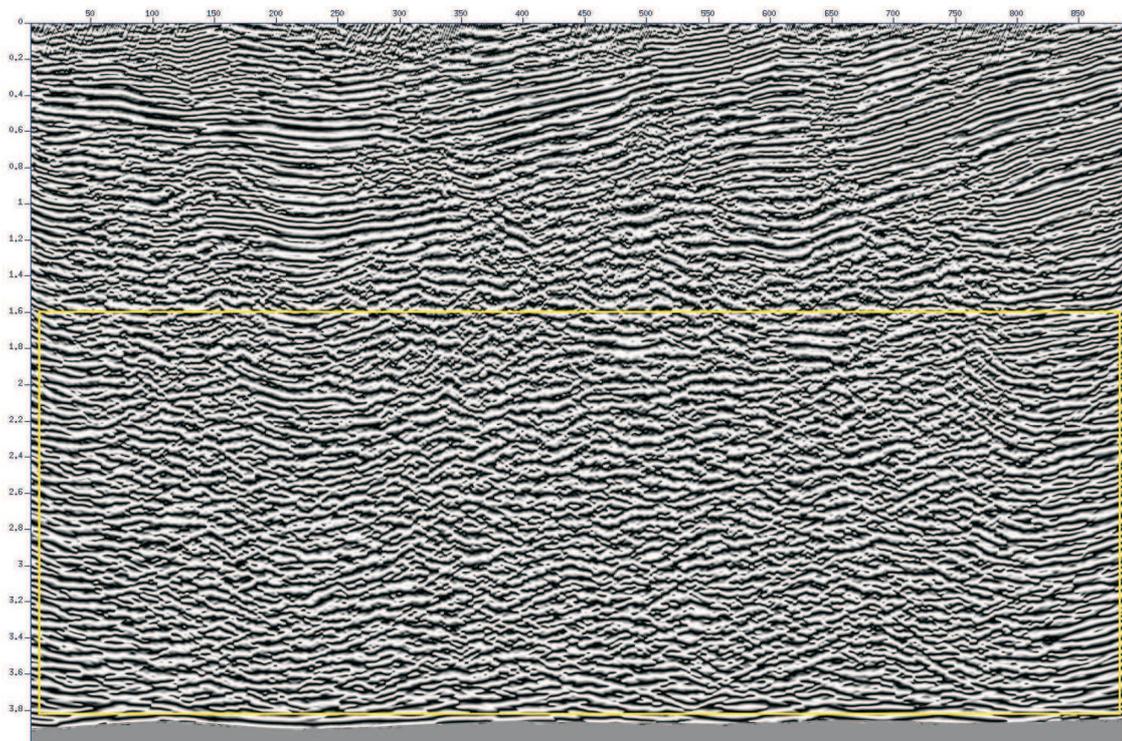


Figura 3.13: Linha 0026-1190 - com atributo cosseno de fase instantânea.

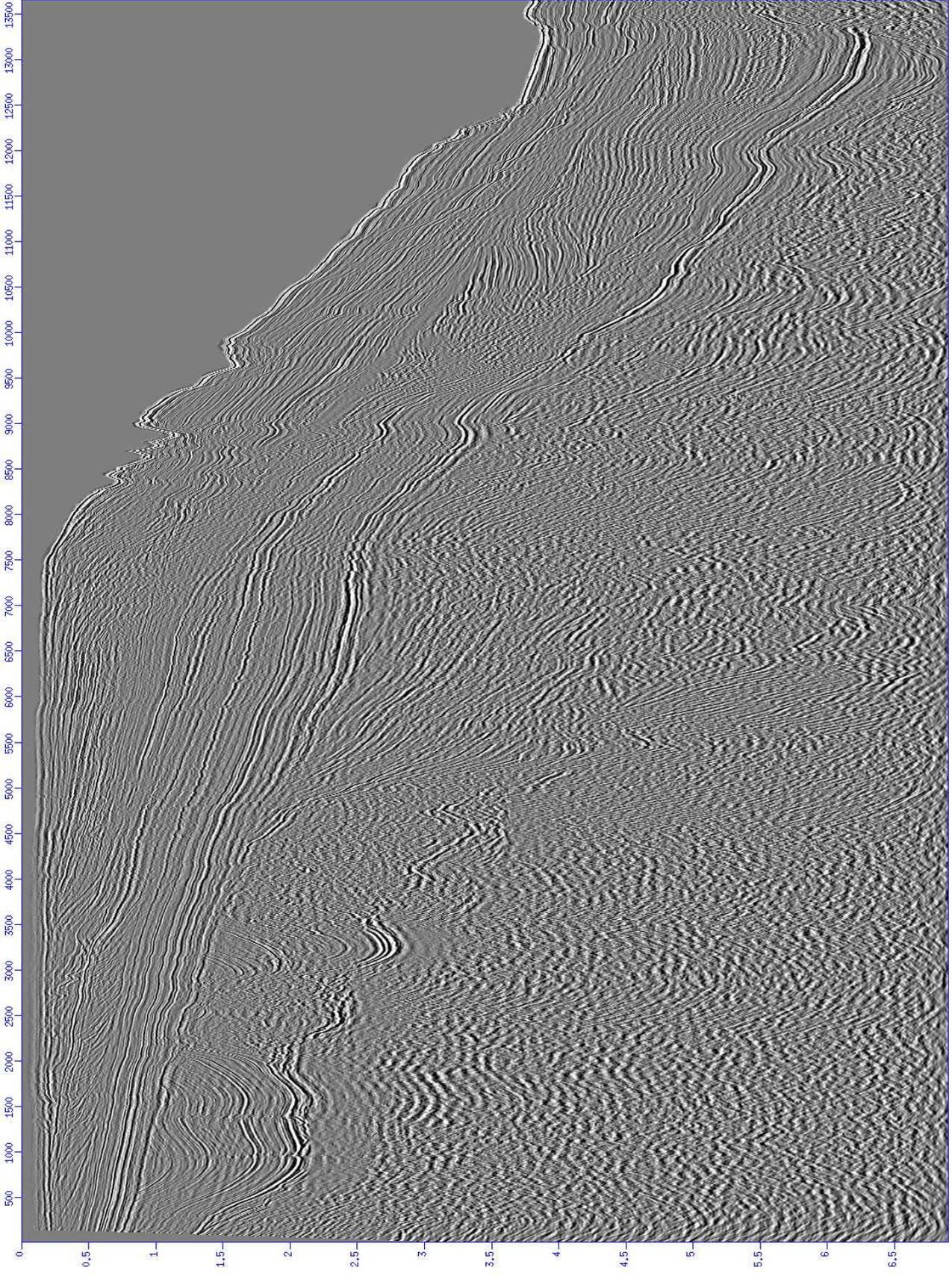


Figura 3.14: Linha 11 - original (migrada).

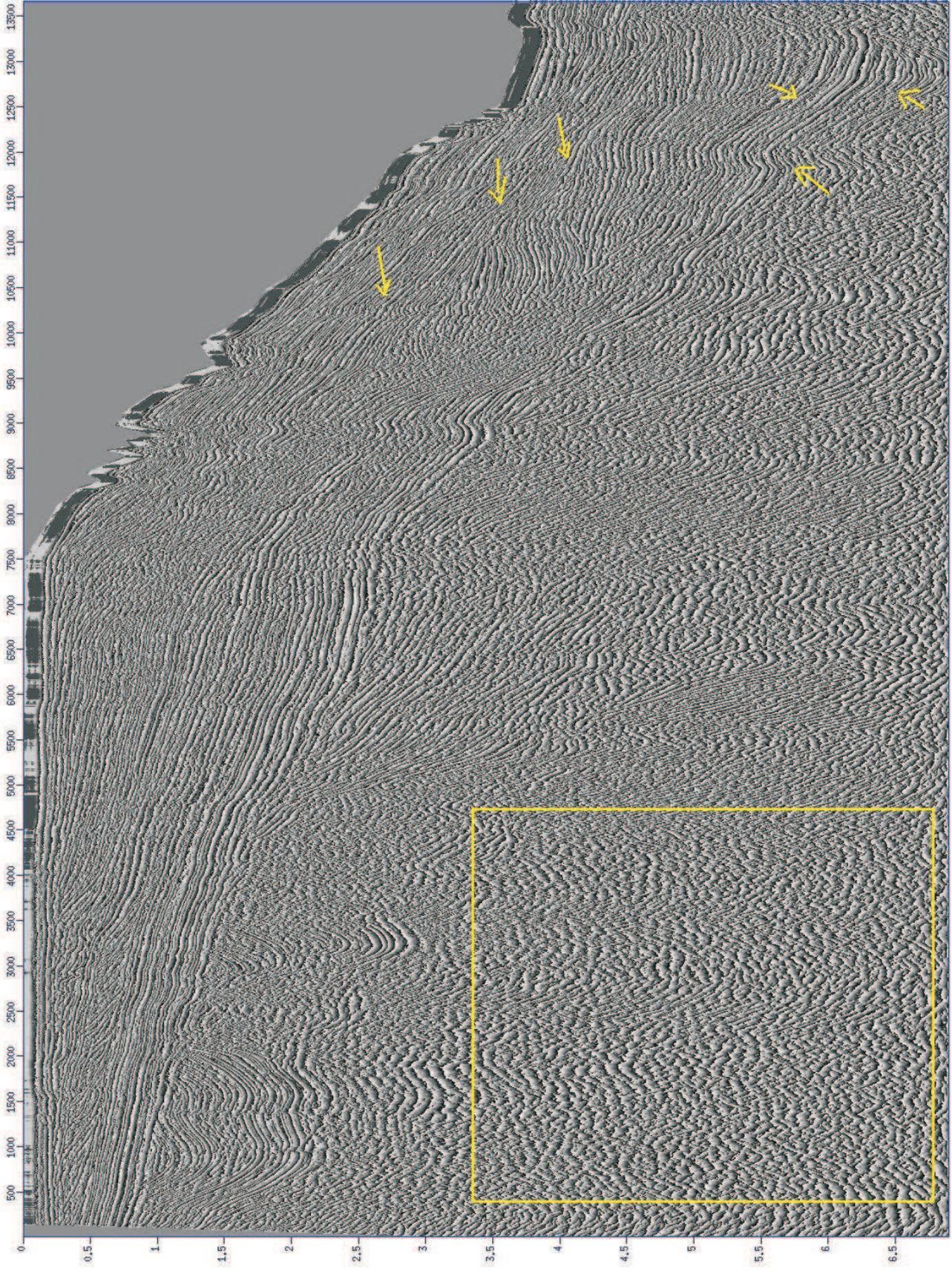


Figura 3.15: Linha 11 - com atributo fase instantânea.

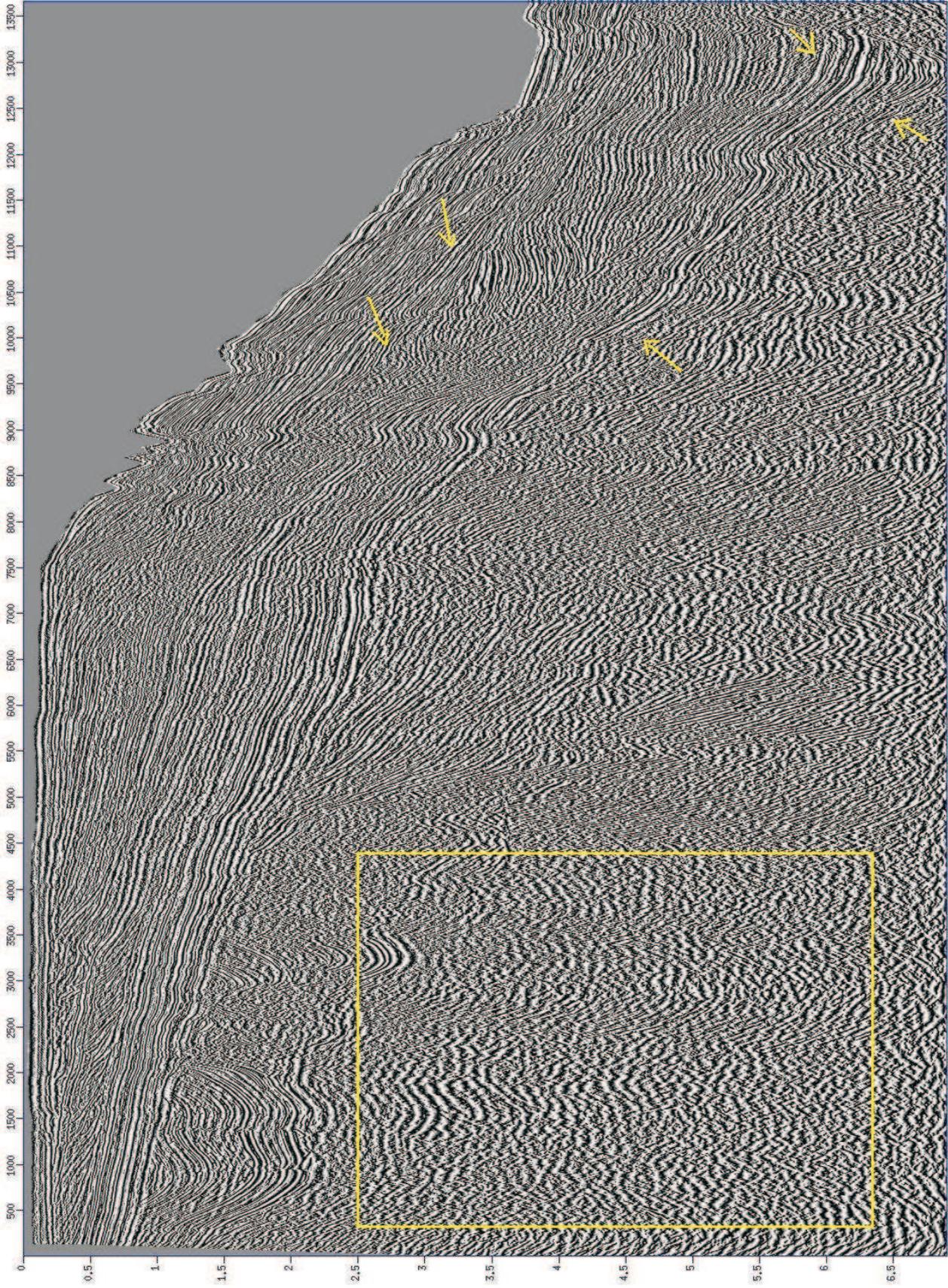


Figura 3.16: Linha 11 - com atributo coseno de fase inatantânea.

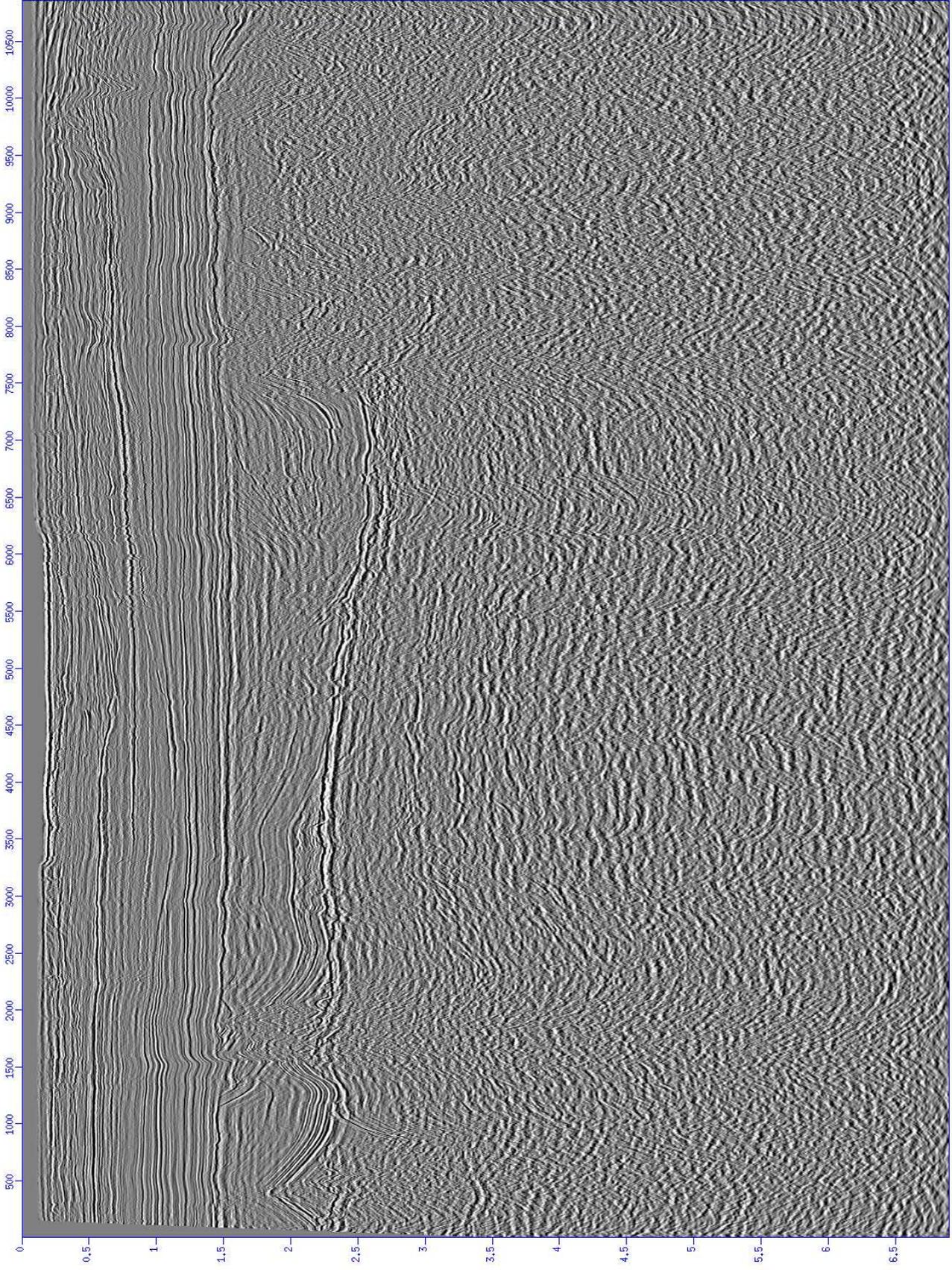


Figura 3.17: Linha 19 - original (migrada).

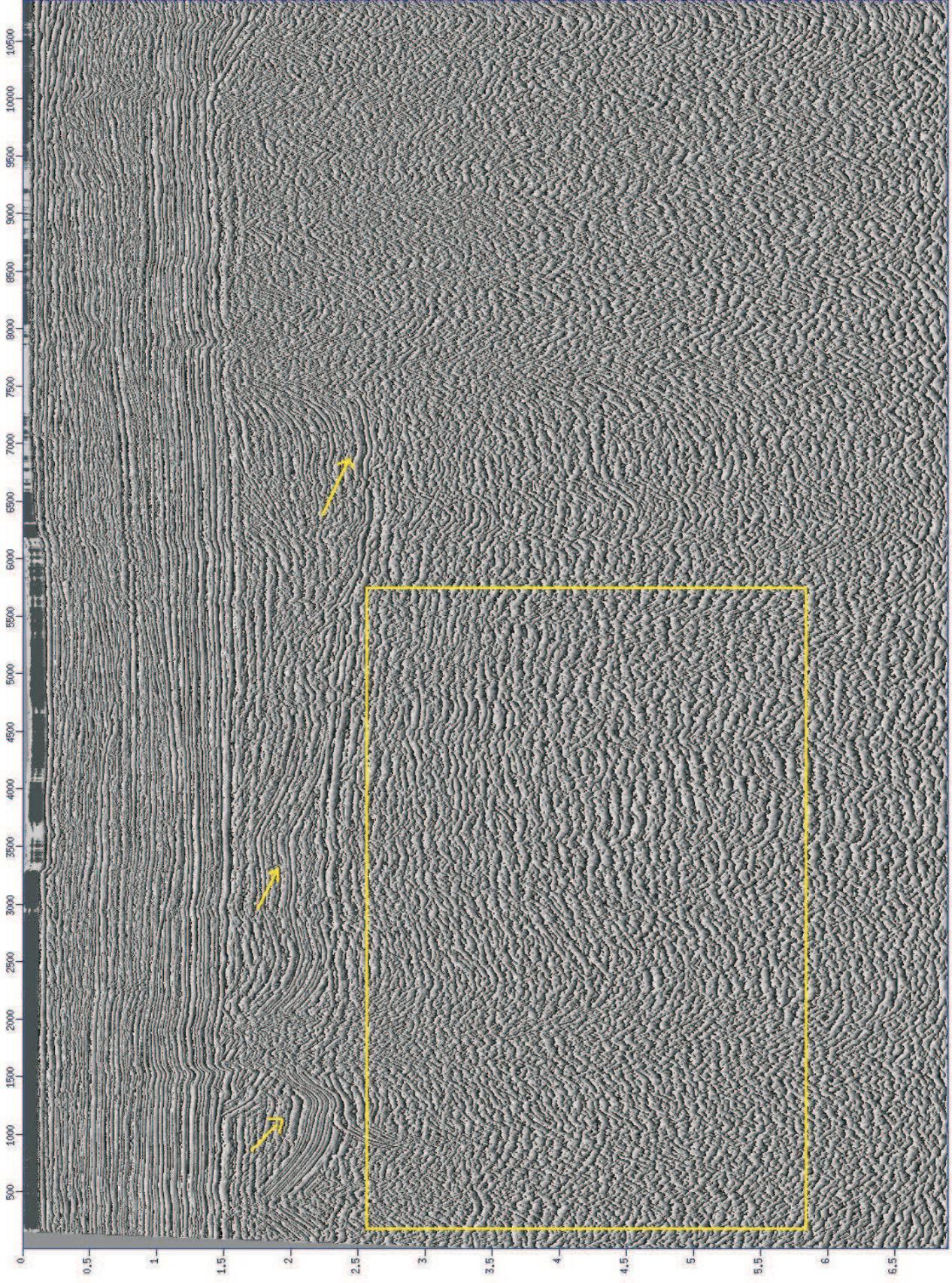


Figura 3.18: Linha 19 - com atributo fase instantânea.

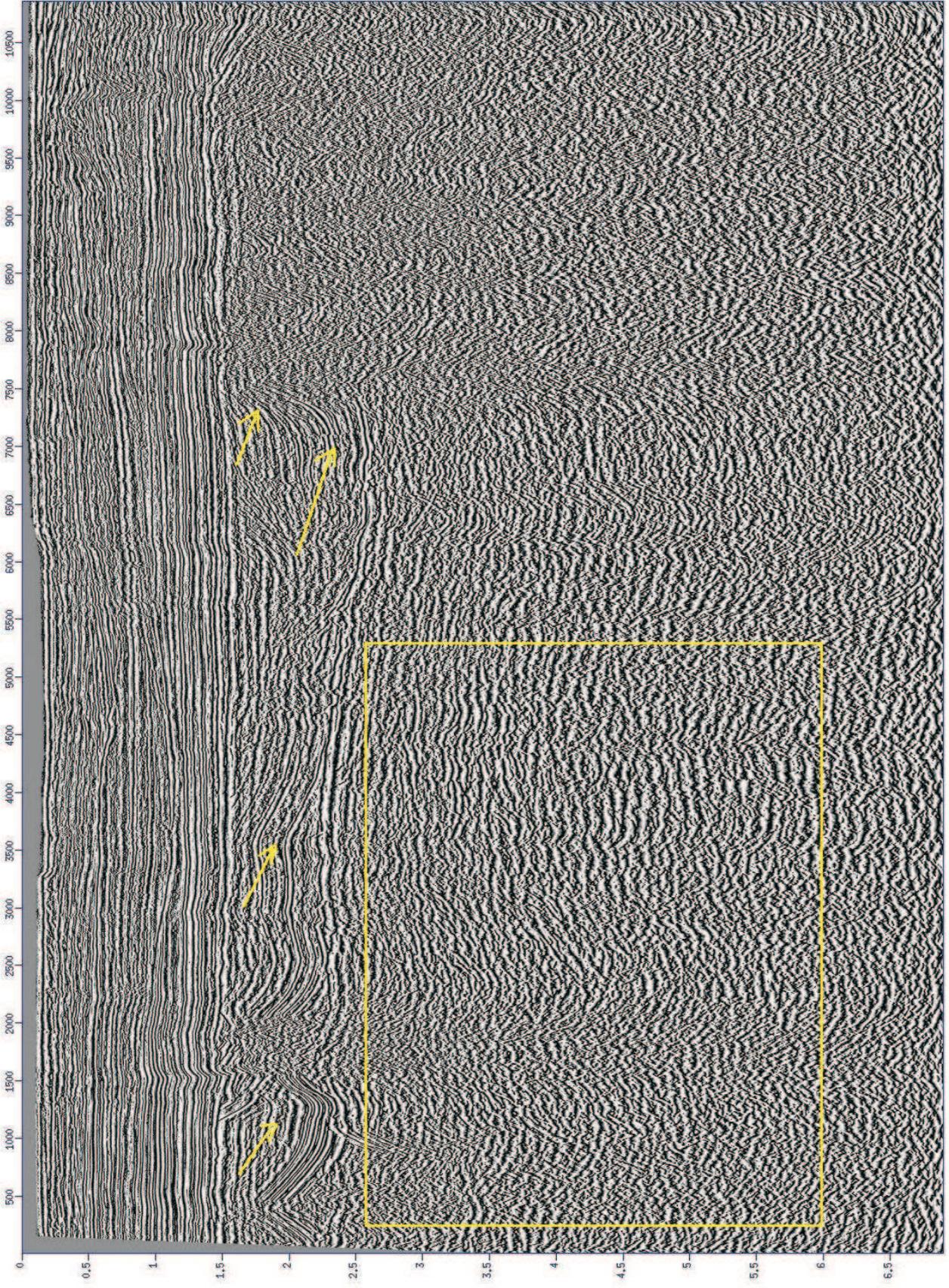


Figura 3.19: Linha 19 - com atributo coseno de fase instantânea.

3.3 Frequência instantânea

Após aplicar esse atributo nos dados vimos claramente que informações sobre a assinatura de frequência dos eventos são reveladas. Os eventos de altas frequência indicam interfaces mais finas (os interpretes costumam dizer que pode ser indicador de lâminas de folhelho) e as frequências inferiores podem ser indicativas de areia (podendo ser reservatório de petróleo ou gás - setas azuis nas seções com atributo) isso tudo teoricamente segundo Schinelli (2008). É claro que essas análises foram baseadas na literatura estudada, logo as mesmas estão sujeitas a questionamentos, pois tomou-se como base os conceitos previamente estabelecidos em livros e artigos. Os resultados são ilustrados nas Figuras 3.20 à 3.25. Na Figura 3.25, foi mapeado um domo de sal (quadrado azul).

Se observamos com cuidados, veremos que onde as amplitudes são baixas nas seções com atributo de frequência, nas mesmas seções no atributo de envelope aparece com amplitudes altas. Isso porque os *spikes* na frequência instantânea tem valores mínimo no envelope.

Para melhor análise de feição geológica deve ser feito estudo de interpretação sísmica dos dados (que não é objetivo do trabalho) usando dado de poço.

Como esse atributo é muito influenciado pelo conteúdo de frequência do dado, é muito importante ter bastante cautela na etapa de filtragem de frequência no processamento dos dados sísmicos. Principalmente em linhas sísmicas terrestre que são afetadas pelo *groundroll*, que é um tipo de onda Rayleigh e possui alta amplitude e baixa frequência.

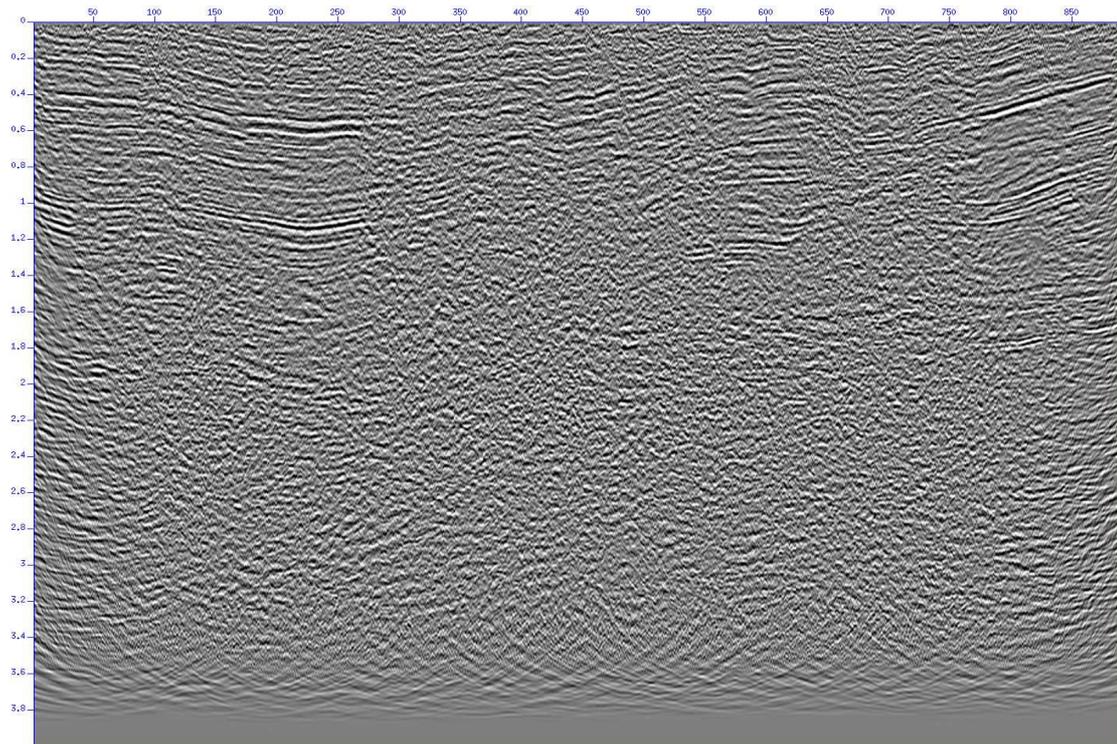


Figura 3.20: Linha 0026-1190 - original (migrada).

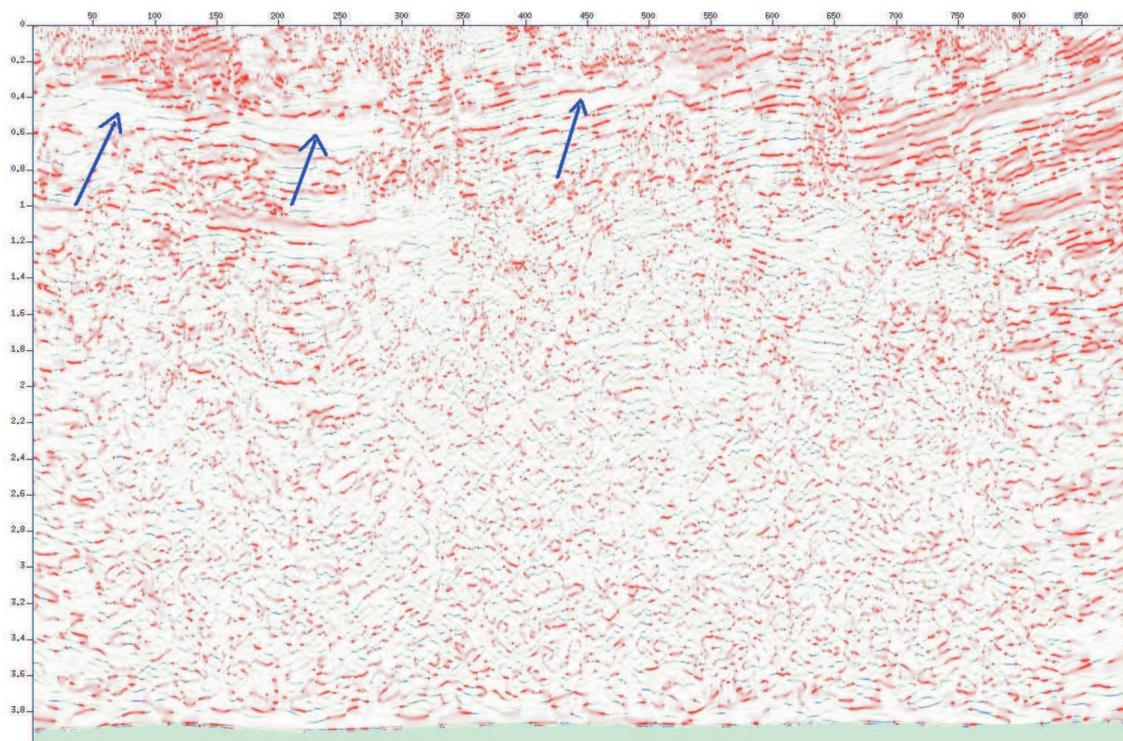


Figura 3.21: Linha 0026-1190 - com atributo frequência instantânea com escala de cor.

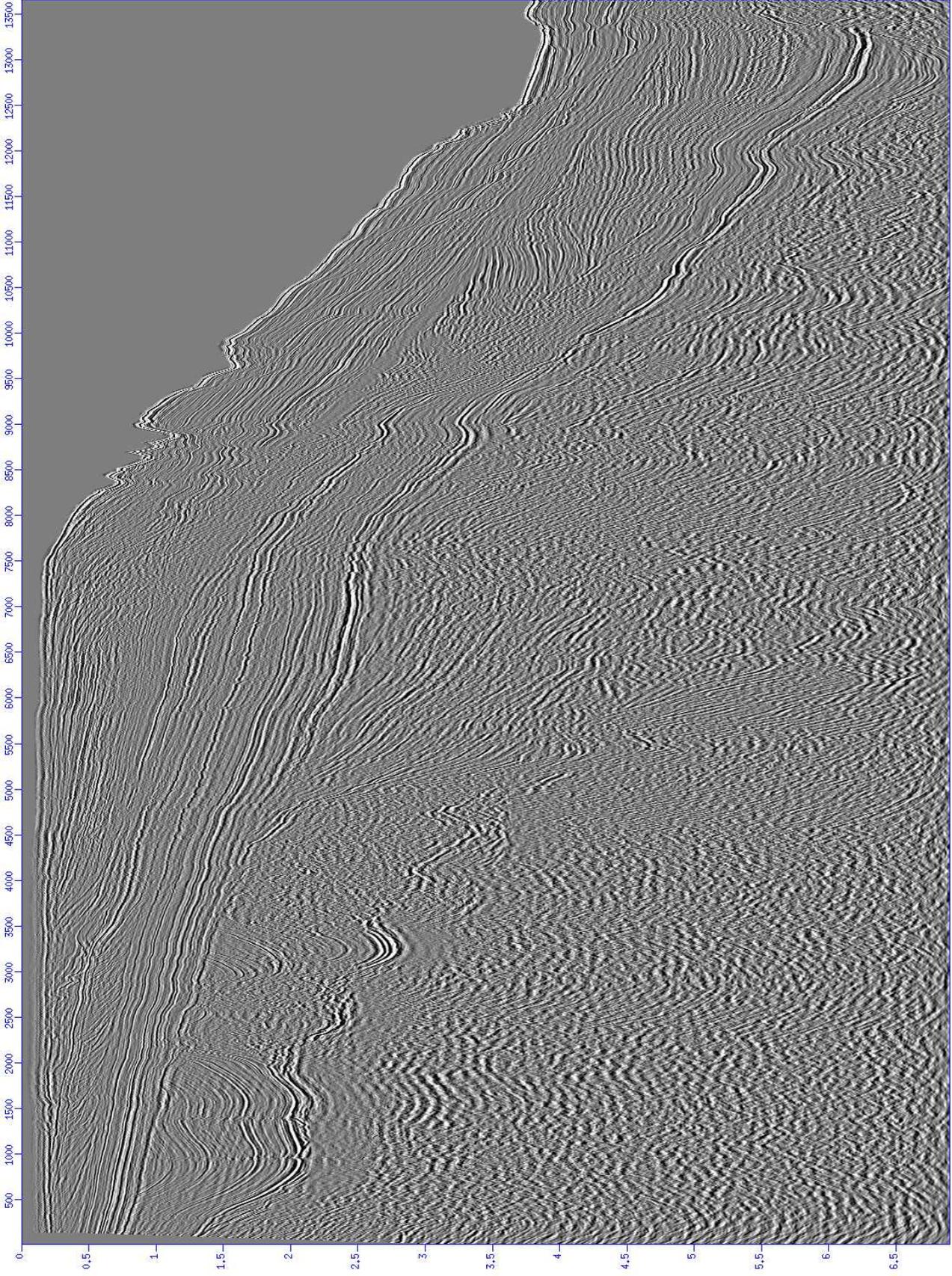


Figura 3.22: Linha 11 - original (migrada).

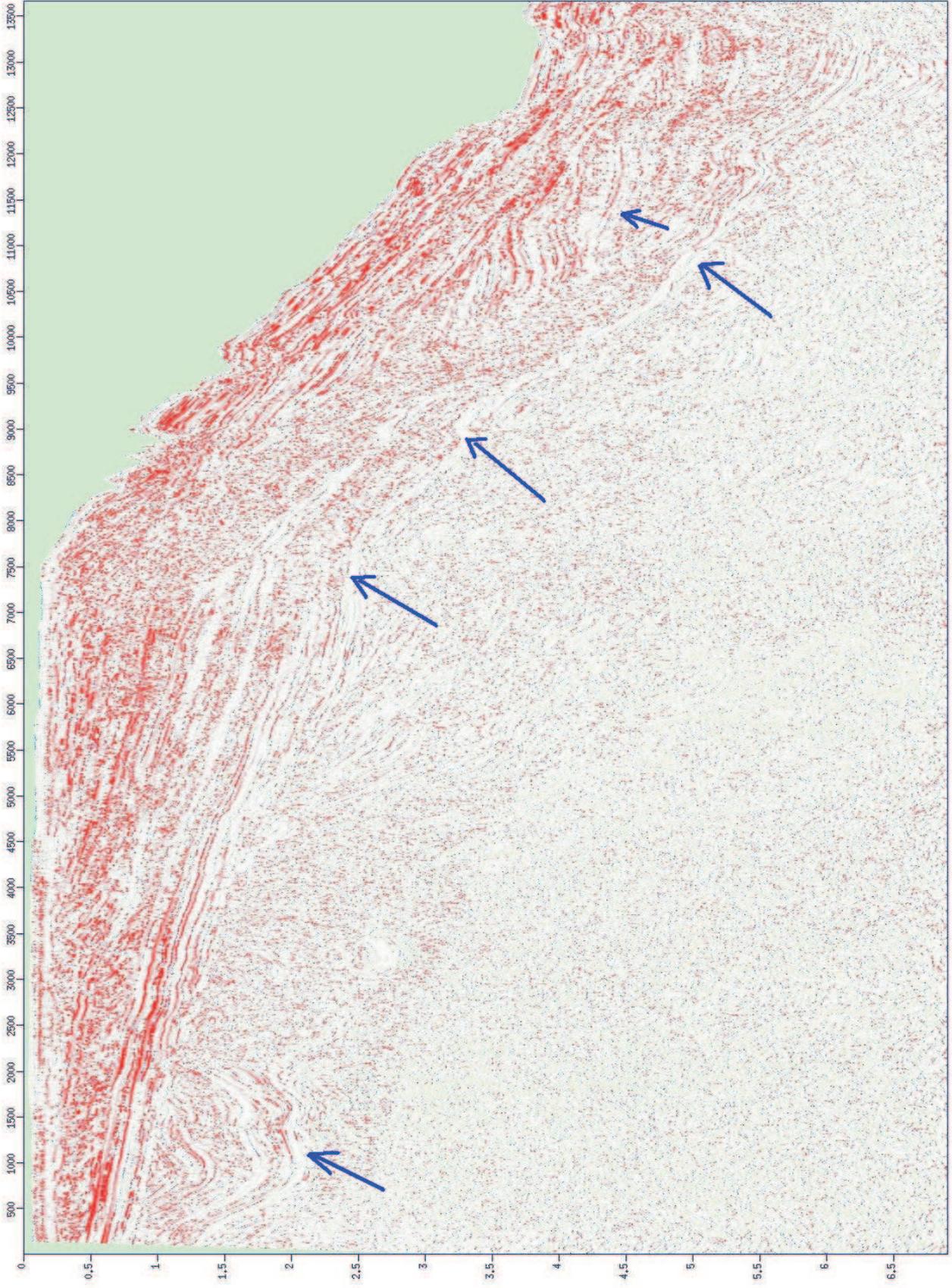


Figura 3.23: Linha 11 - com atributo frequência instantânea com escala de cor.

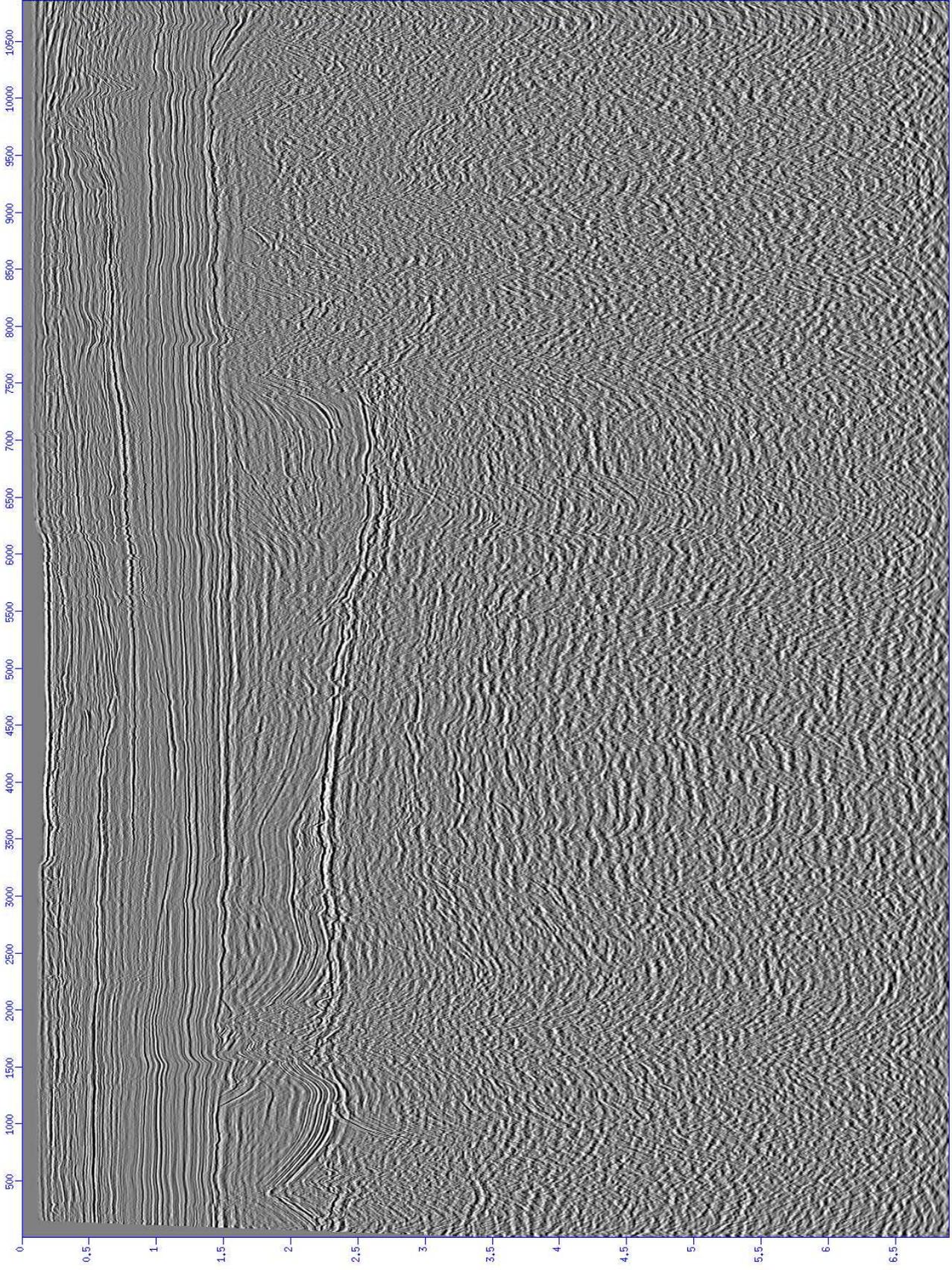


Figura 3.24: Linha 19- original (migrada).

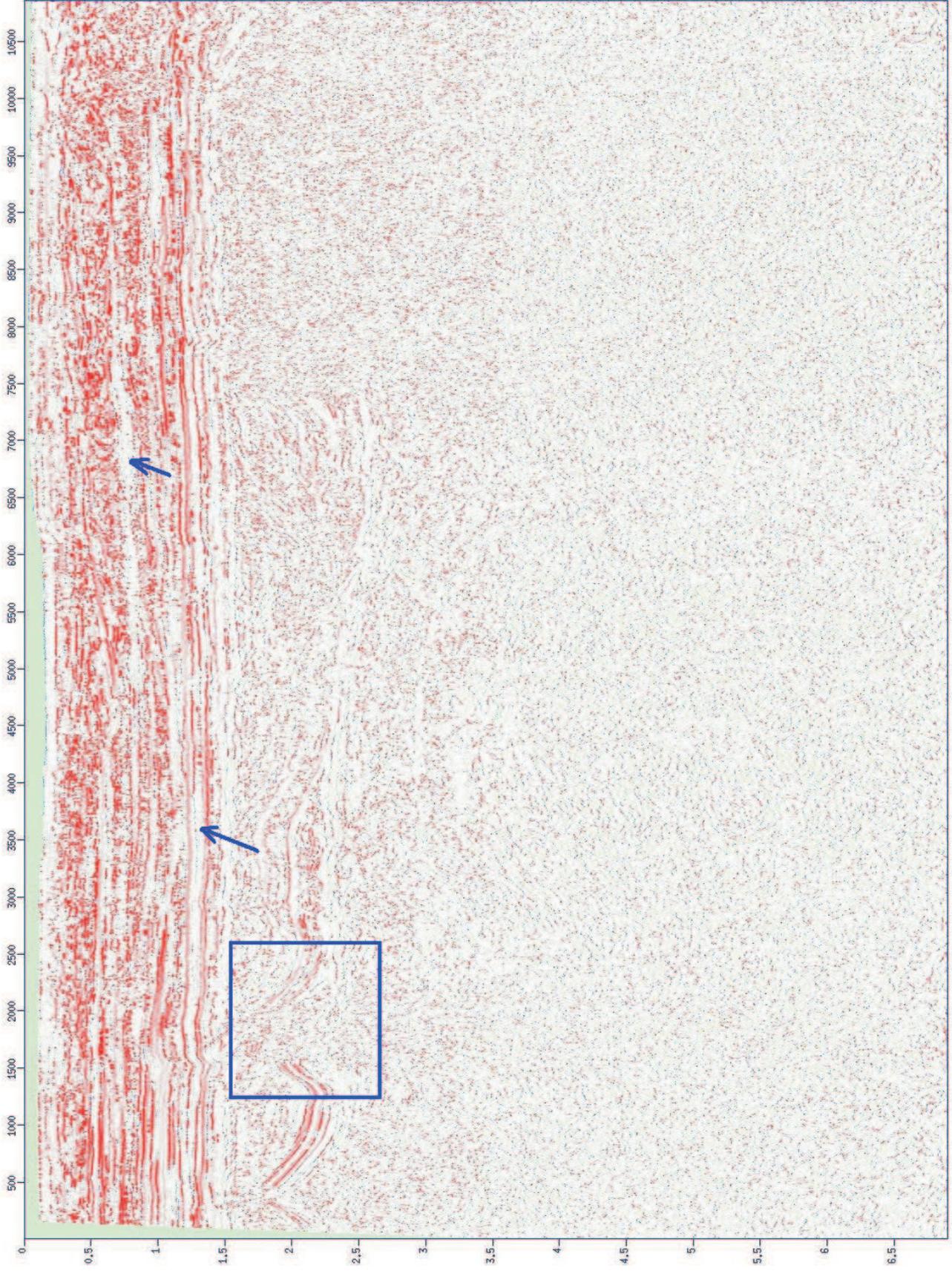


Figura 3.25: Linha 19 - com atributo frequência instantânea com escala de cor.

3.4 Atributo tecVA

Esse atributo foi o que apresentou melhores resultados. Além de melhorar a continuidade dos refletores, delimitou os domos de sais e delineou bem as falhas nas seções sísmica, o que tornou fácil rastrear algumas falhas, só para efeito de exemplificação. Esse atributo dá um aspecto de relevo na seção sísmica, fazendo com que as mesmas fiquem com uma feição mais geológica, Figuras de 3.26 à 3.42

No dado sísmico terrestre original, quase não se ver as falhas e a região mais funda da seção sísmica tem baixíssima resolução (Figura 3.26), já o dado com atributo (Figuras 3.27 e 3.28) tanto as falhas como a região mais profunda ficaram mais nítidas.

A seção sísmica marinha da Figura 3.30 (com atributo) foi dividida em 2 zonas na Figura 3.31 (retângulo amarelo). A primeira zona: mostrando que o domo de sal (setas azuis) e as falhas ficaram bastante visíveis (ver Figuras 3.32 e 3.33) e a segunda zona com indentificações das falhas (ver Figuras 3.34 e 3.35). Já a outra seção sísmica da Figura 3.37, foi também dividida em duas zonas (Figura 3.38). A primeira zona mostrou outro domo de sal e algumas falhas (Figuras 3.39 e 3.40), e a segunda com falhas e o canal (Figuras 3.41 e 3.42), visto também pelo atributo de envelope.

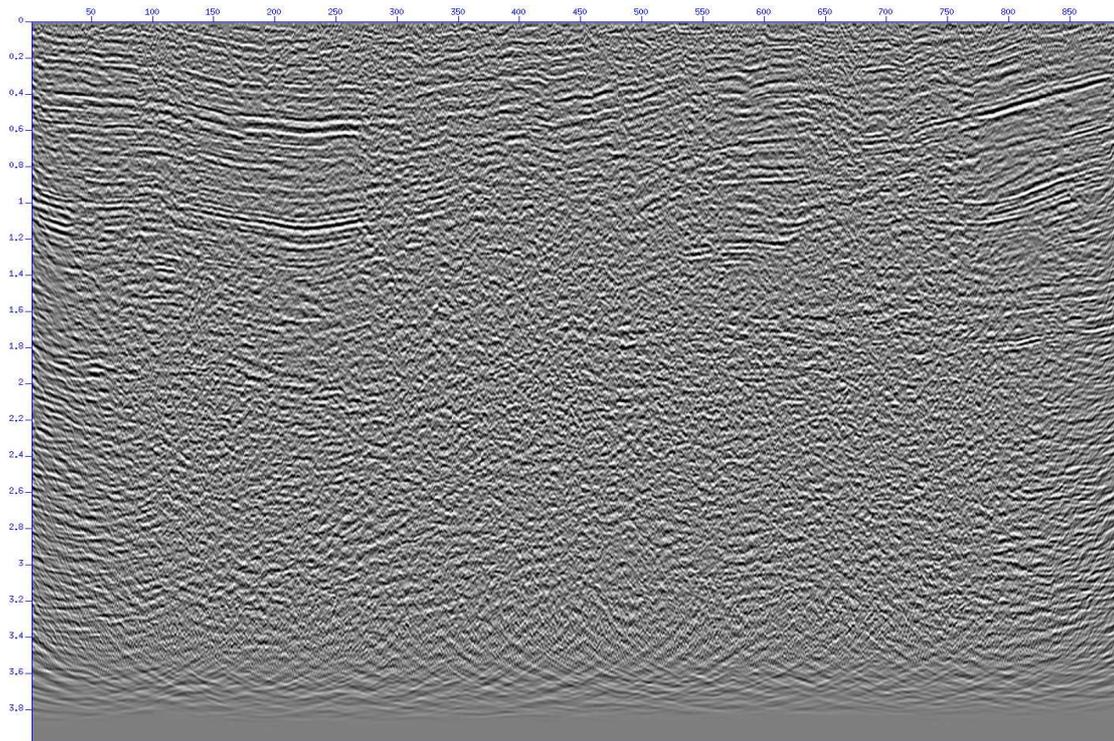


Figura 3.26: Linha 0026-1190 - original (migrada).

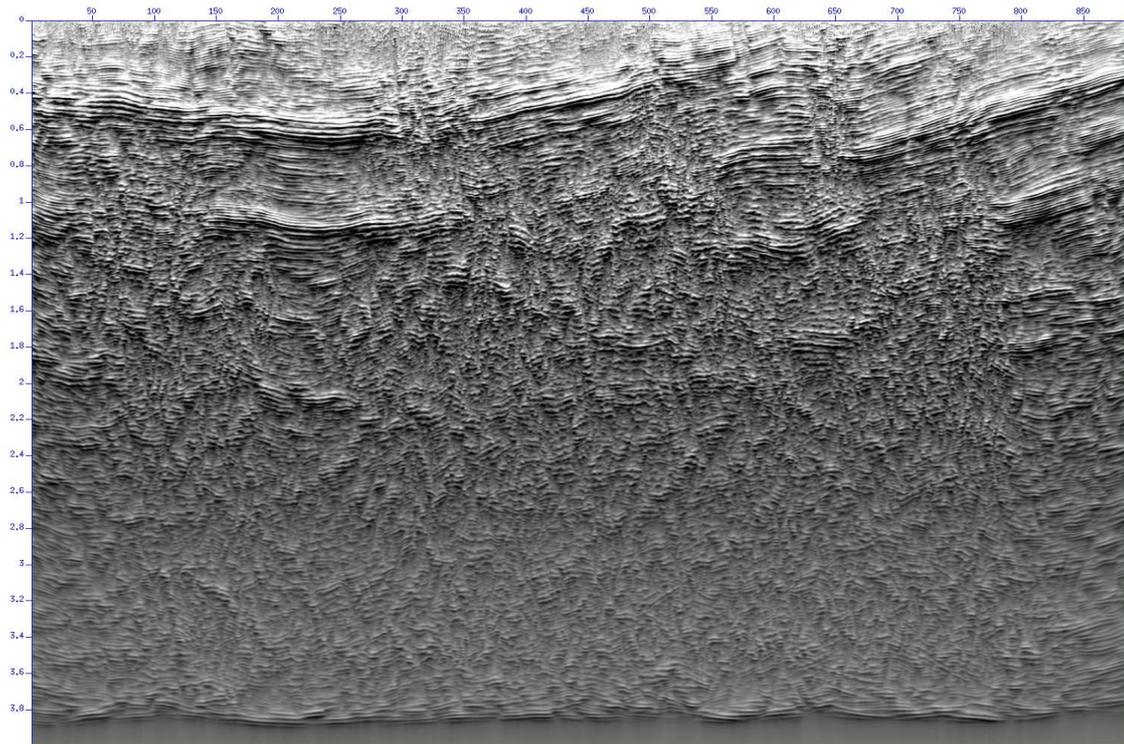


Figura 3.27: Linha 0026-1190 - com atributo tecVA.

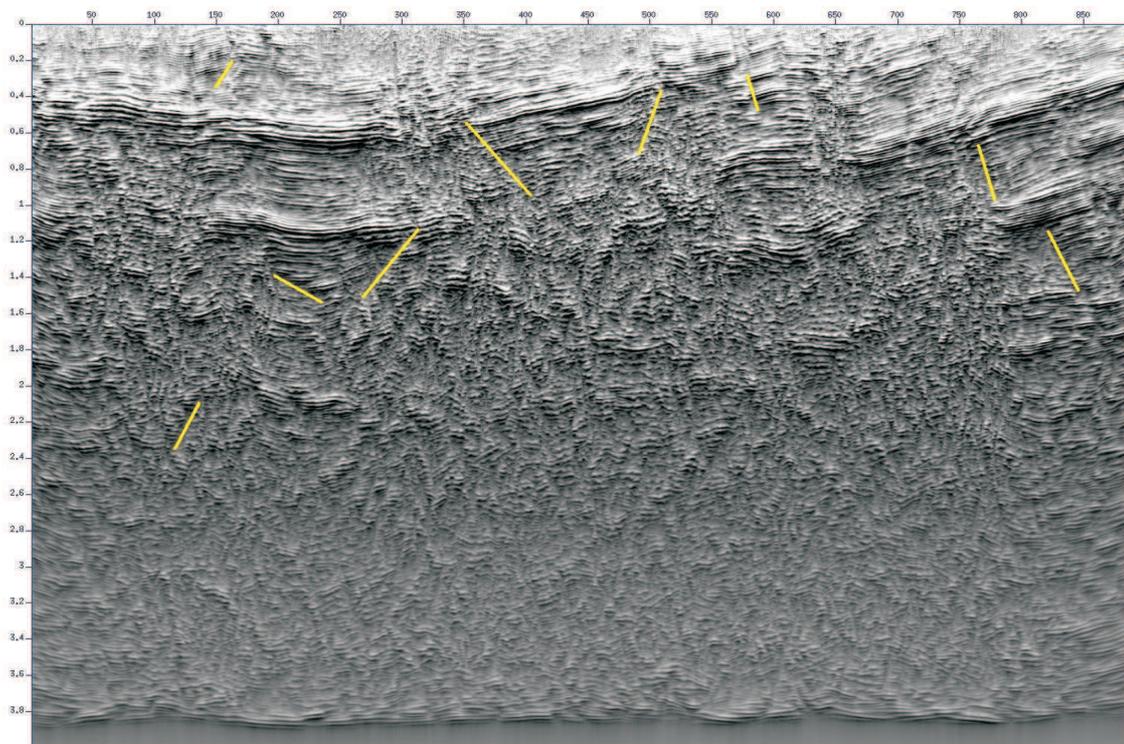


Figura 3.28: Linha 0026-1190 - com atributo tecVA e algumas falhas mapeadas.

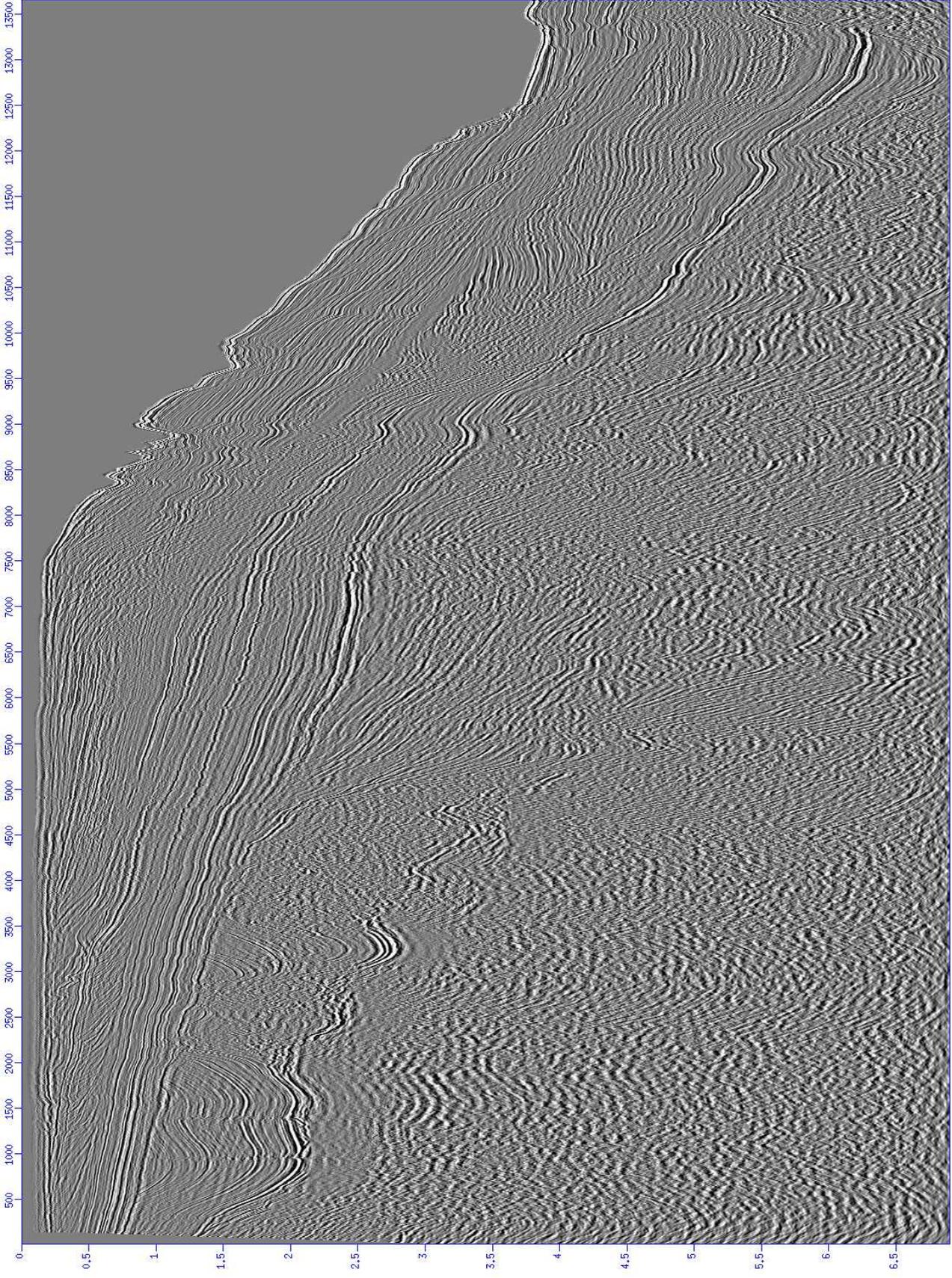


Figura 3.29: Linha 11 - original (migrada).

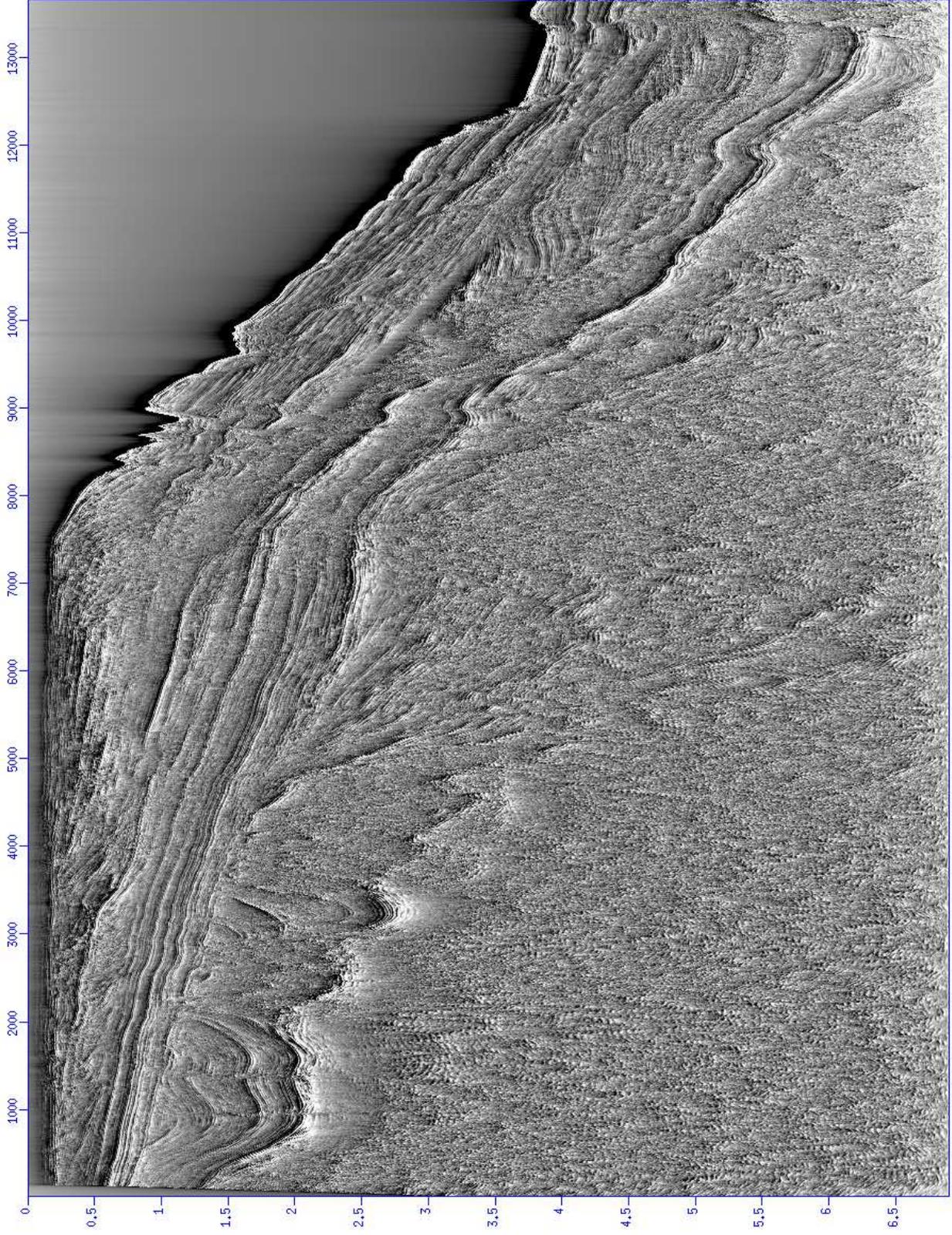


Figura 3.30: Linha 11 - com atributo tecVA.

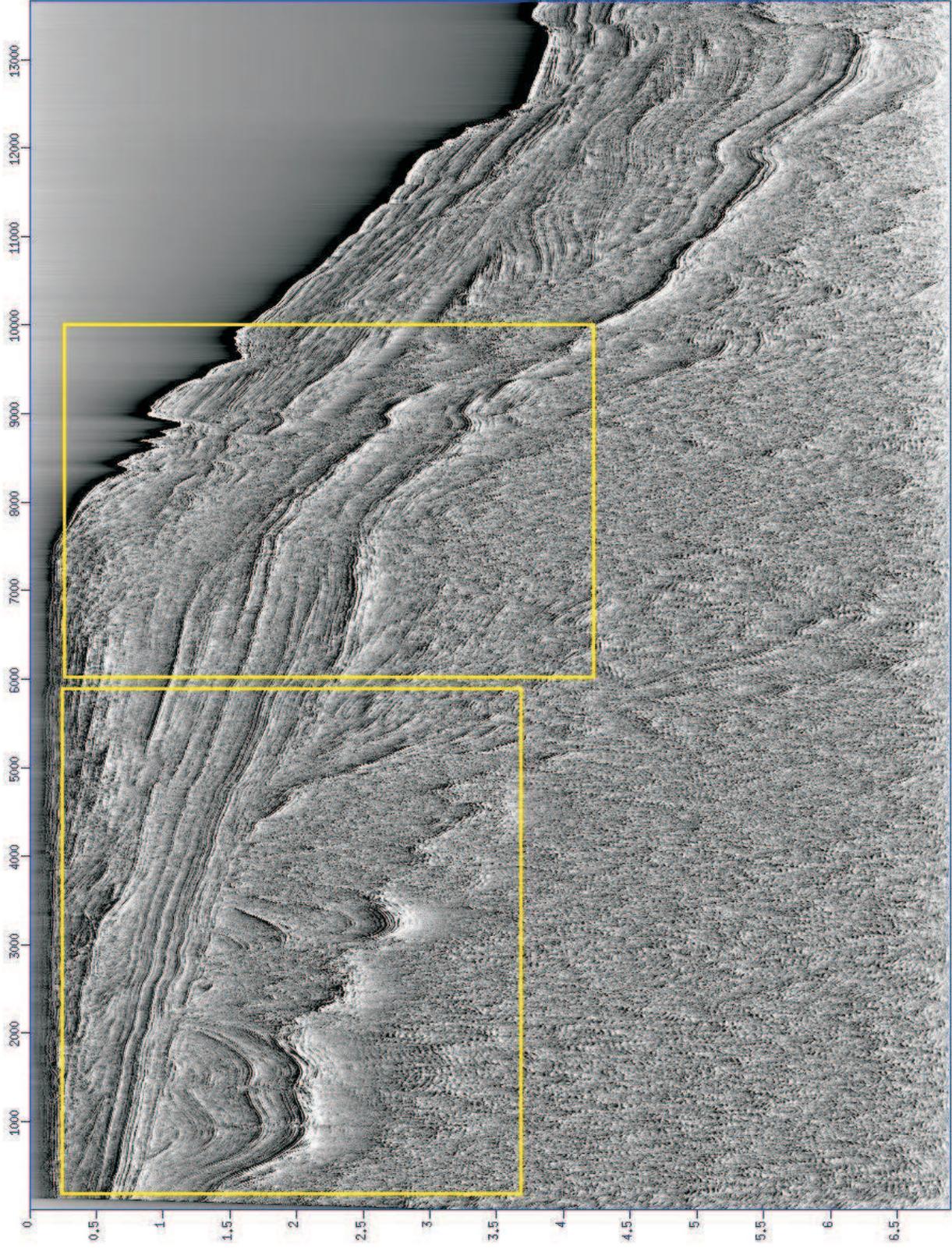


Figura 3.31: Linha 11 - com atributo tecVA: mostrando as áreas onde foi aplicado um zoom.

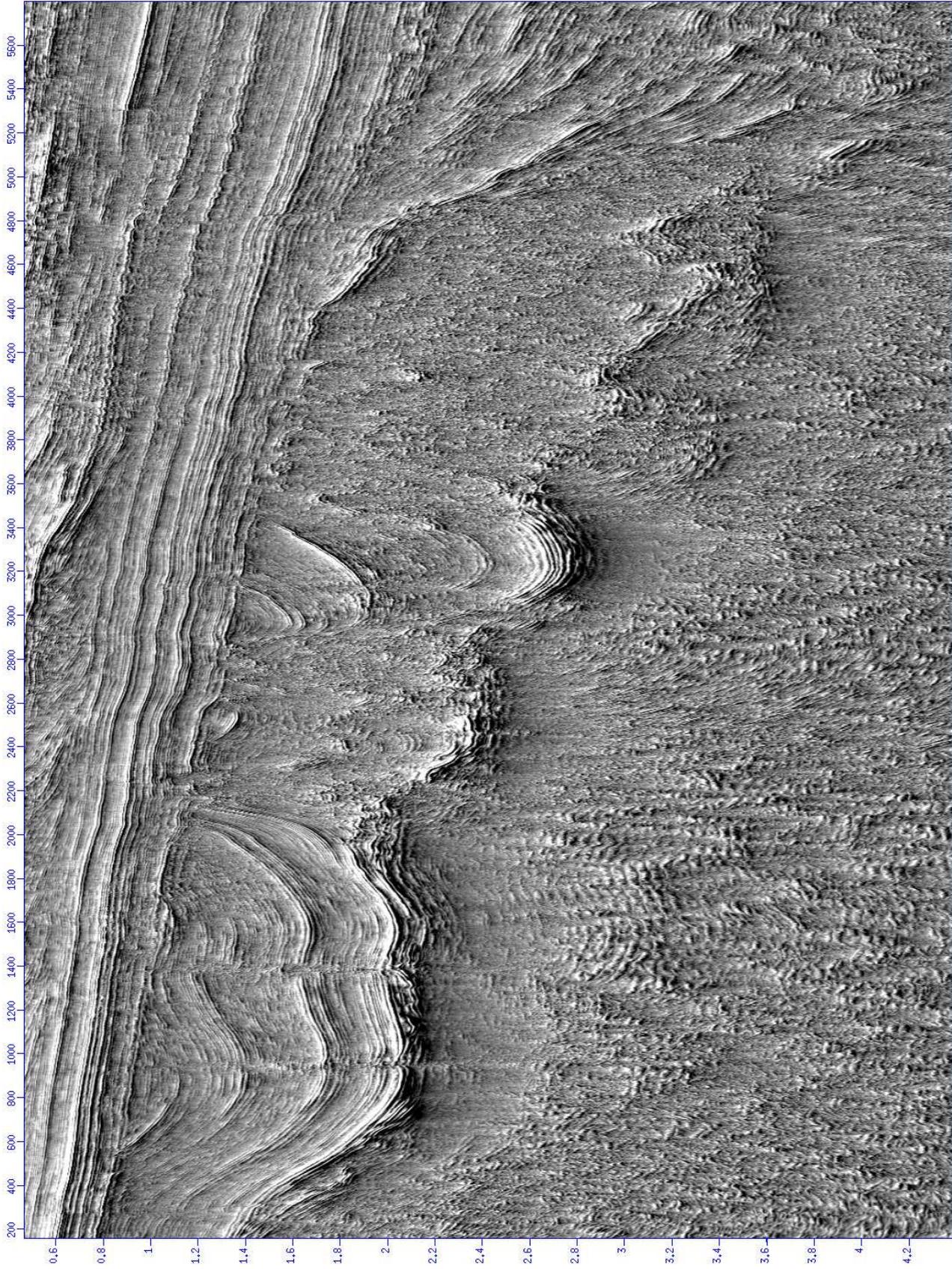


Figura 3.32: Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona.

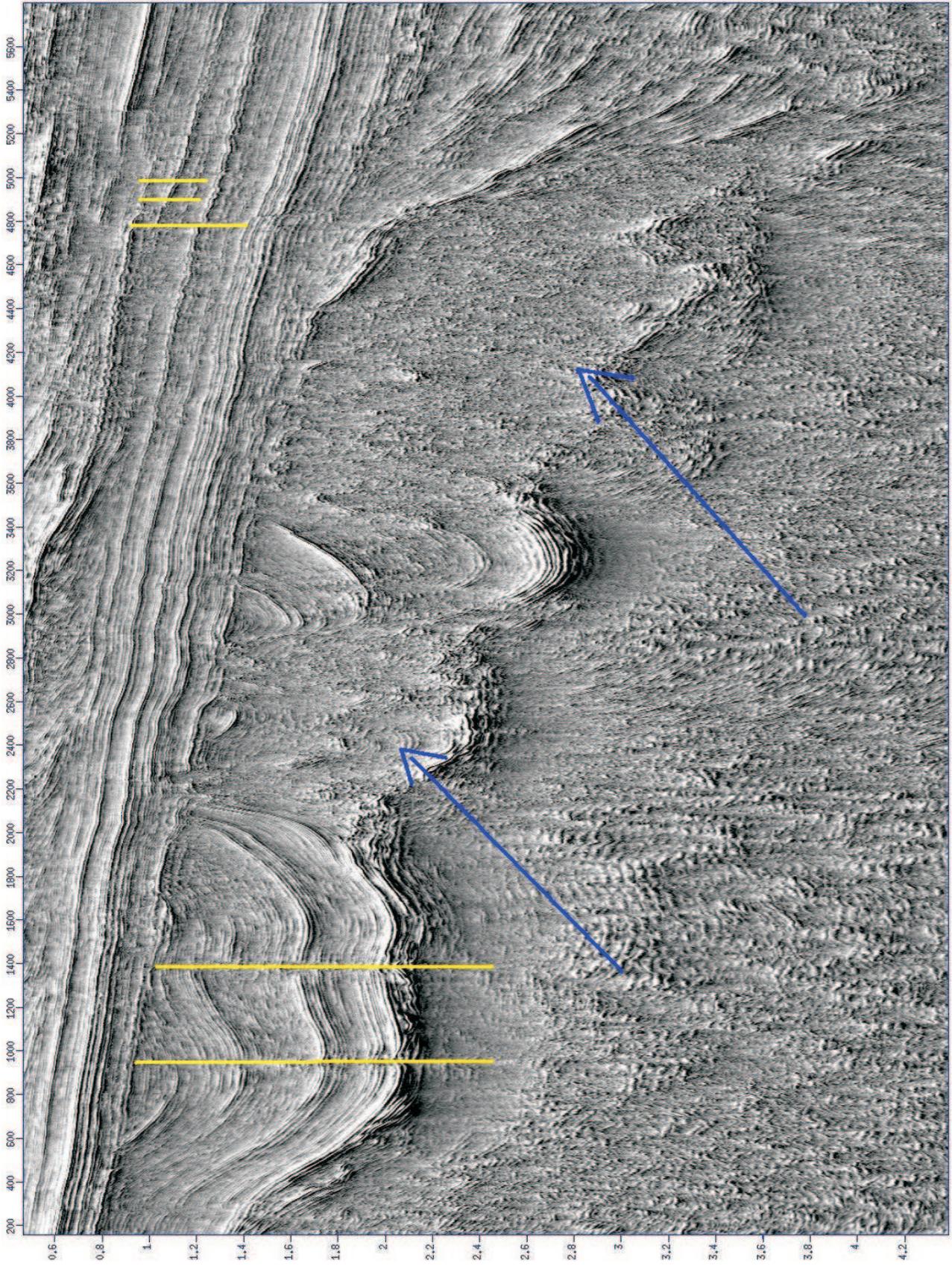


Figura 3.33: Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona com o domo de sal e falhas mapeadas.

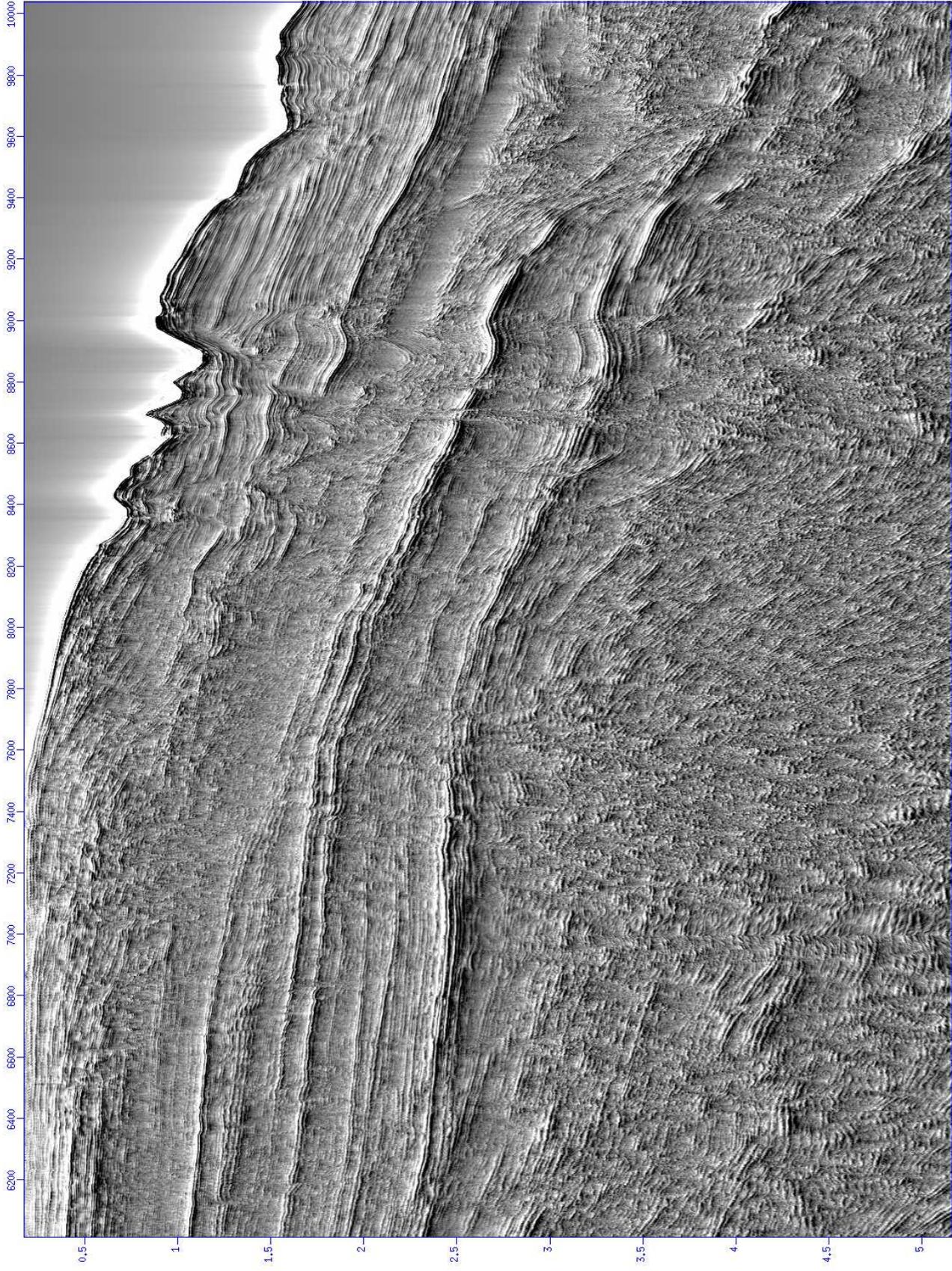


Figura 3.34: Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona.

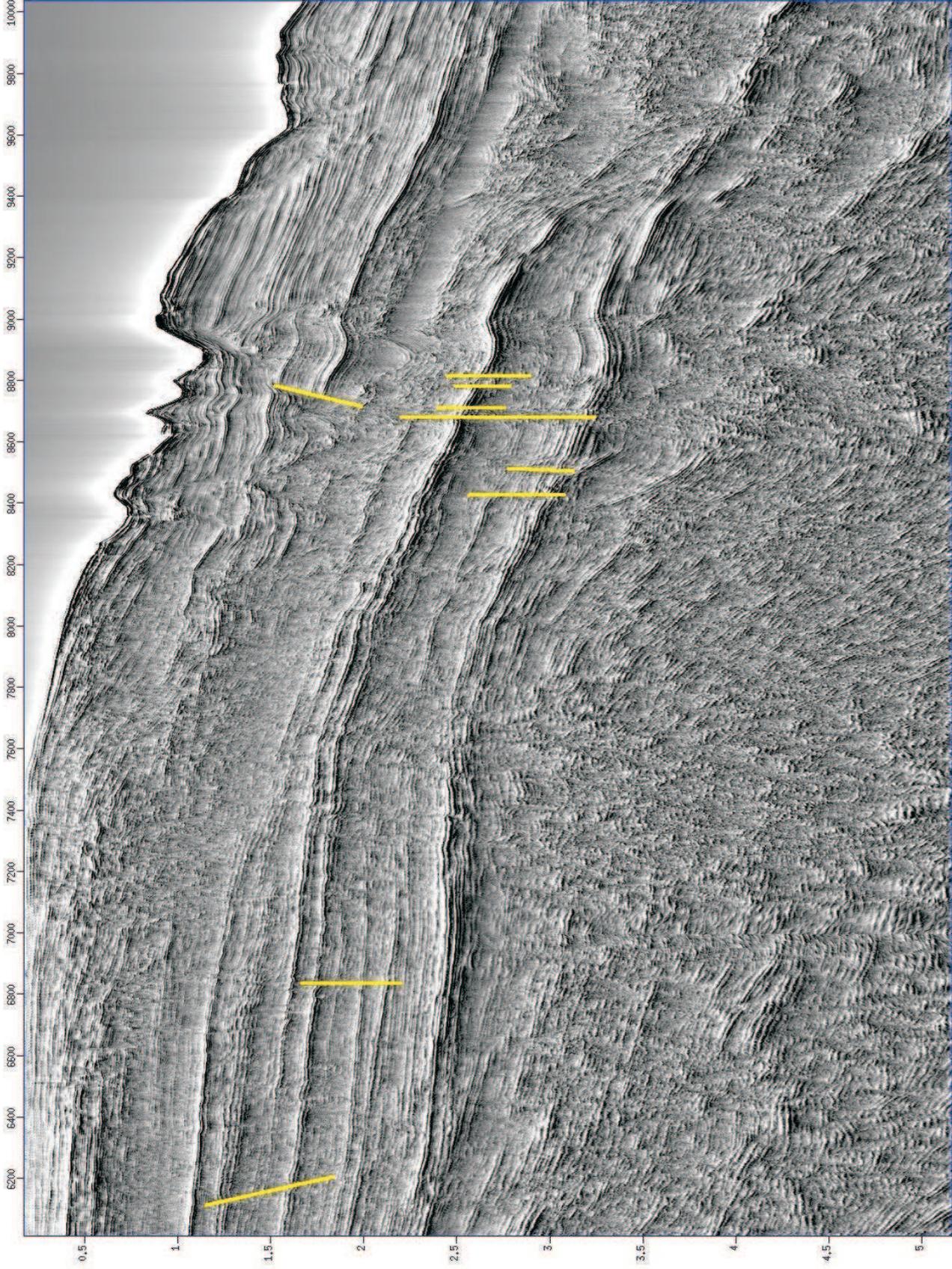


Figura 3.35: Linha 11 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona com falhas mapeadas.

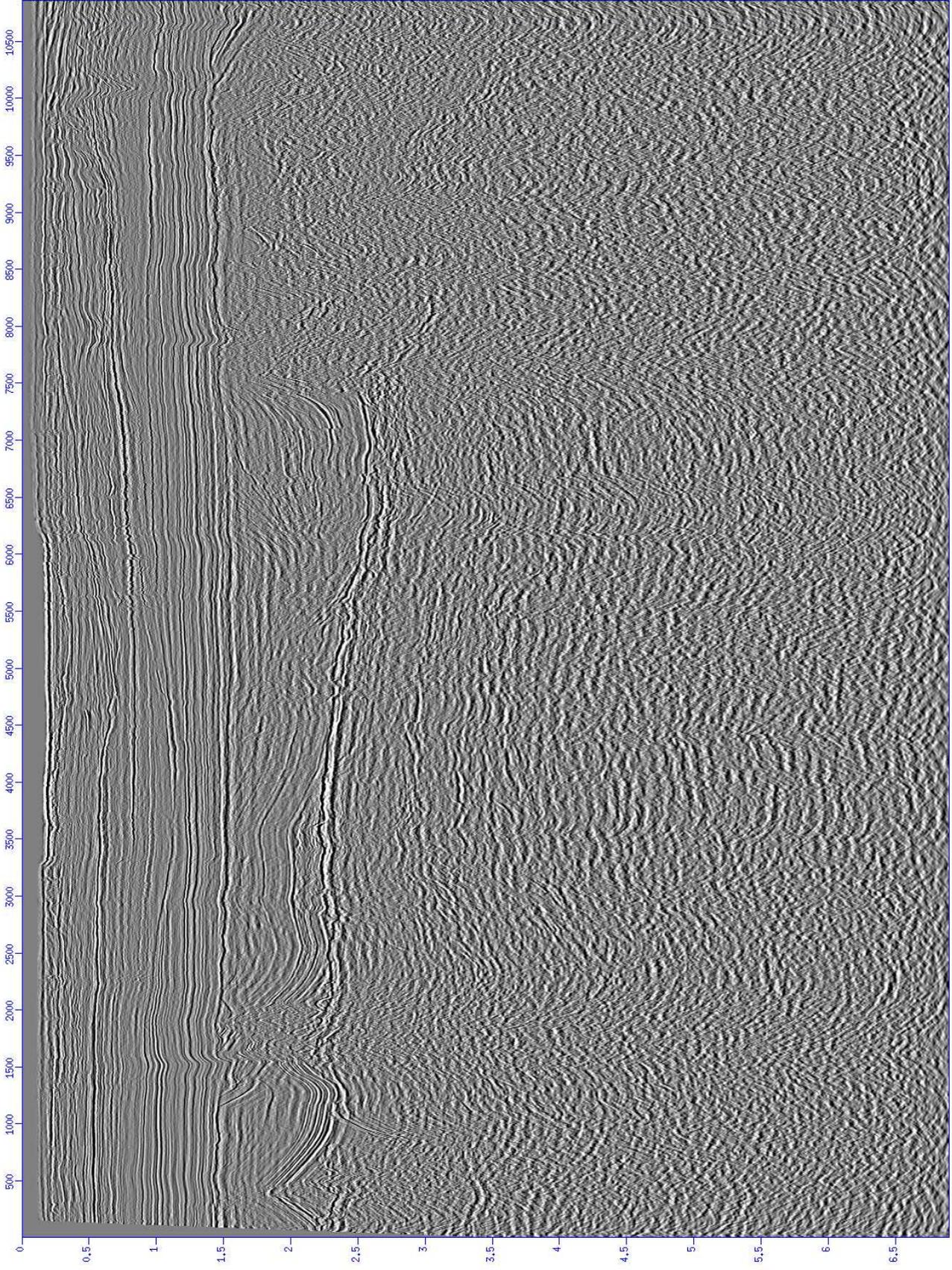


Figura 3.36: Linha 19 - original (Migrada).

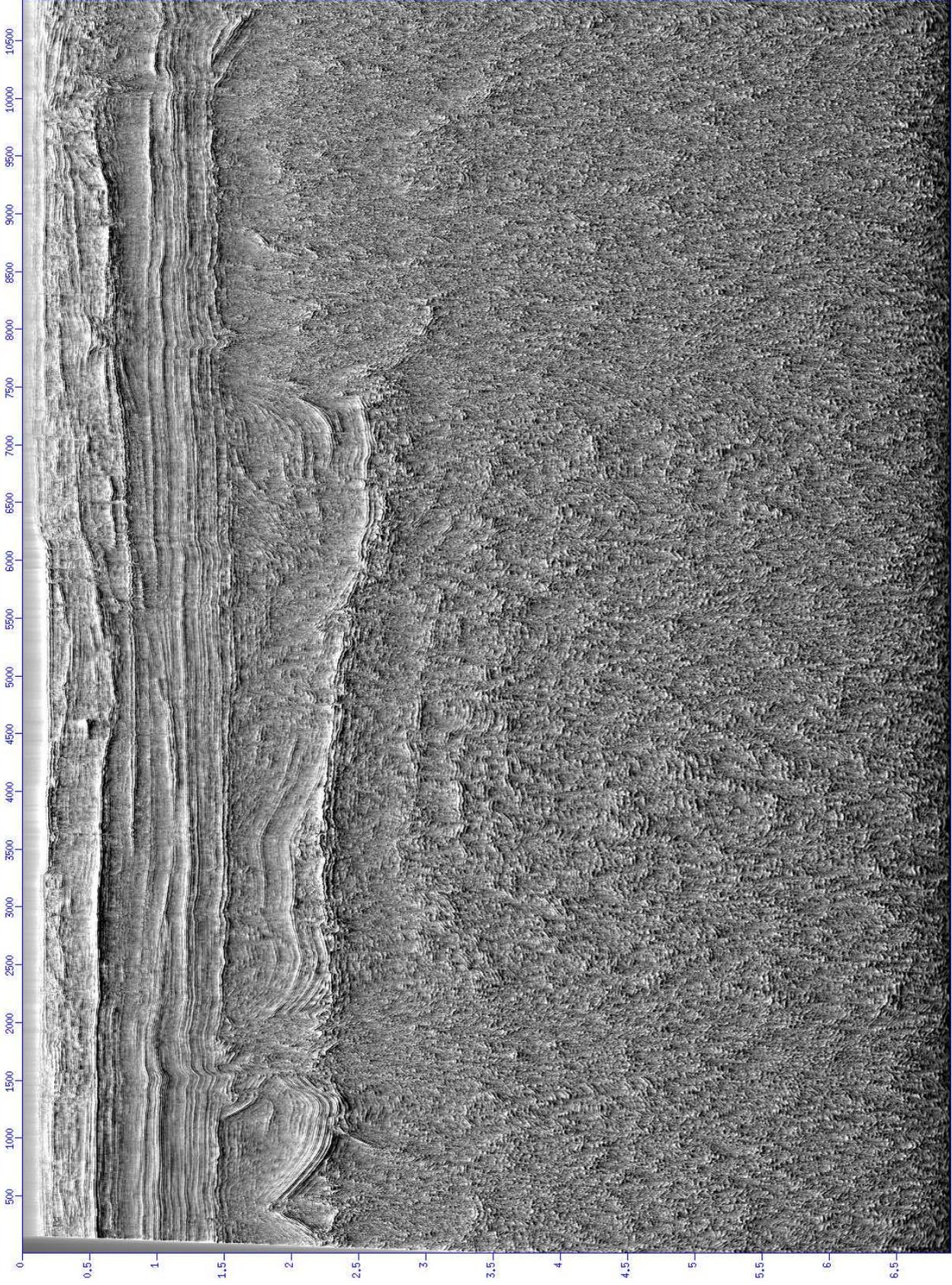


Figura 3.37: Linha 19 - com atributo tecVA.

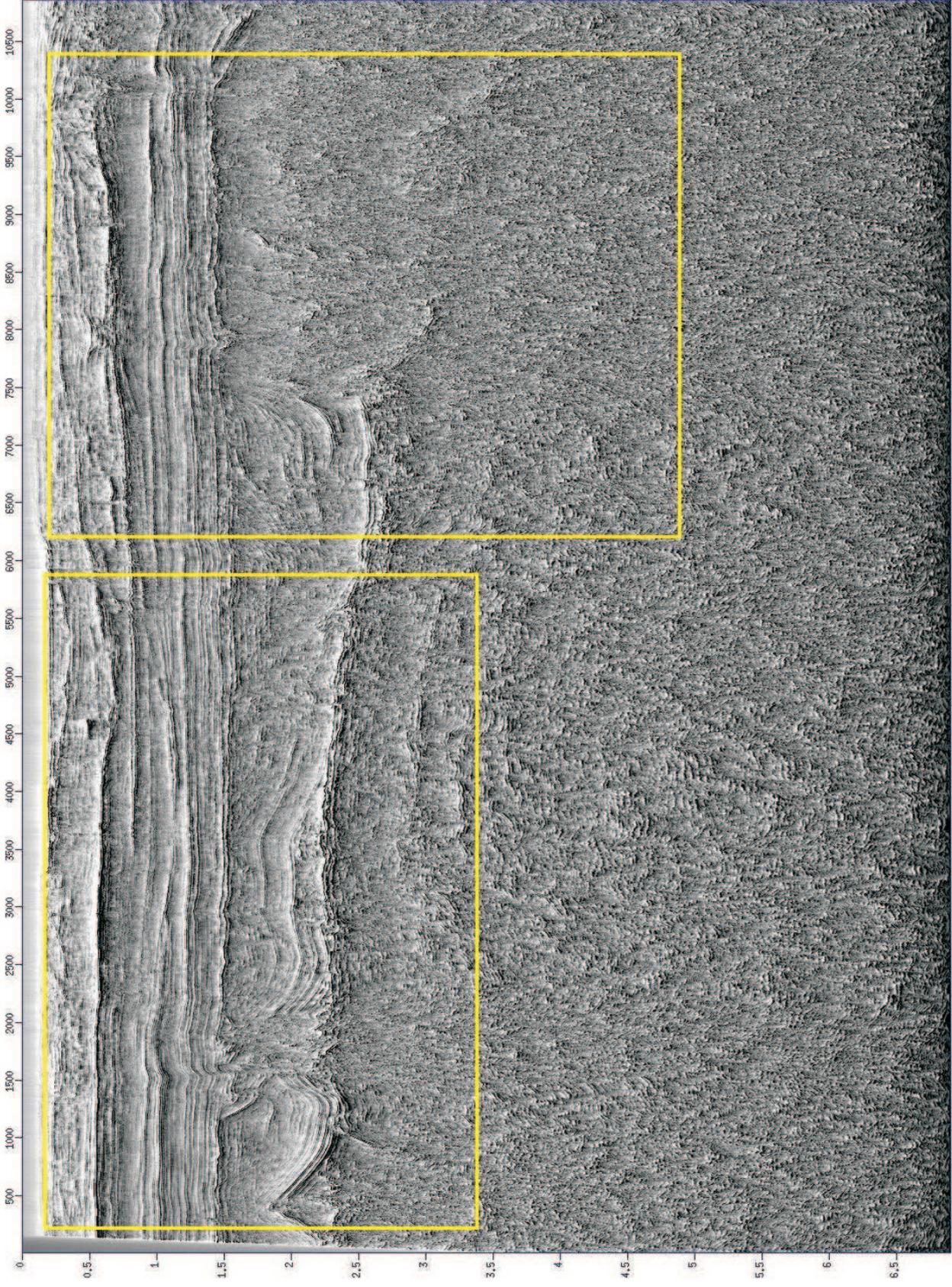


Figura 3.38: Linha 19 - com atributo tecVA: mostrando a área onde foi aplicado um zoom.

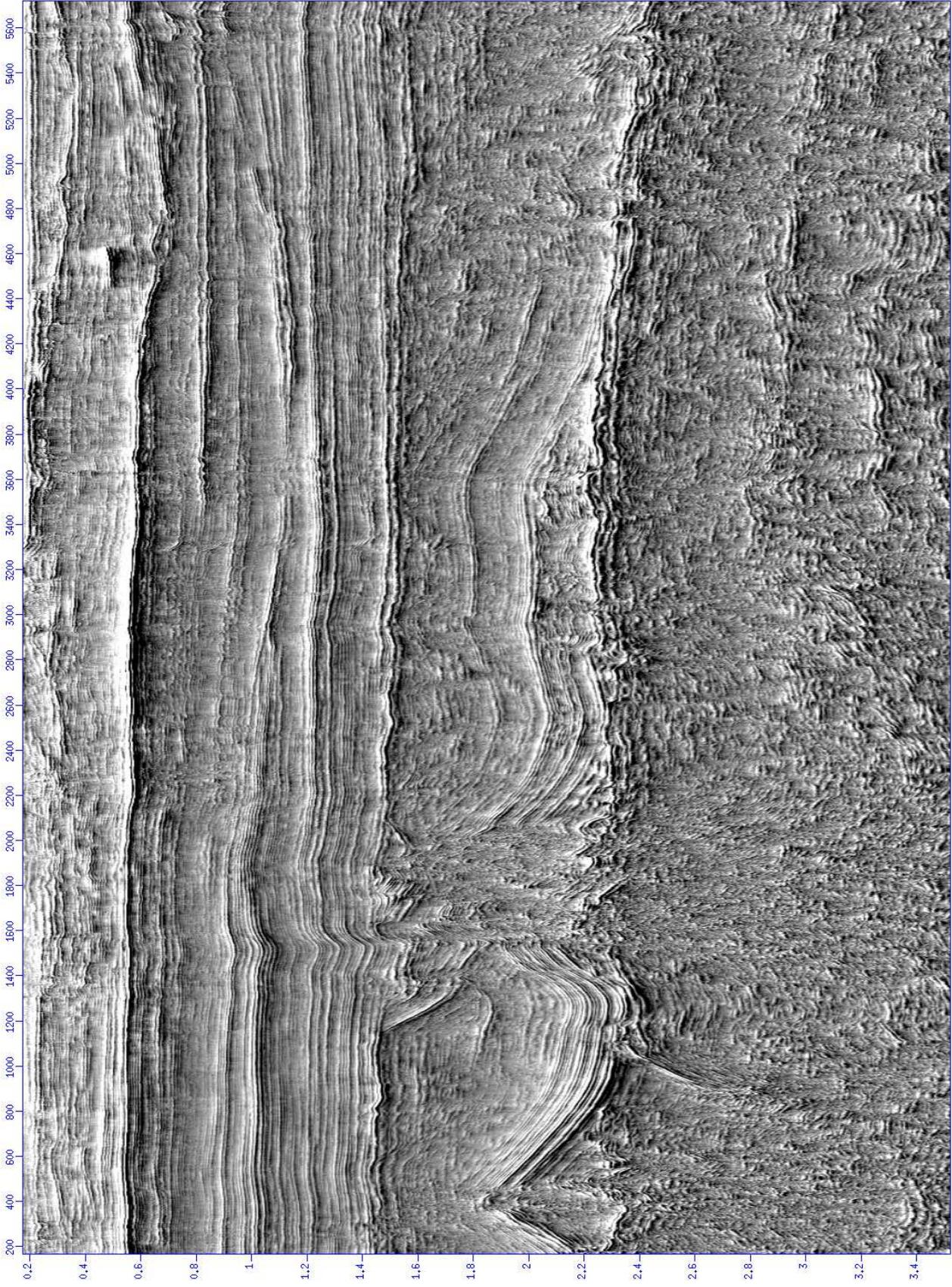


Figura 3.39: Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona.

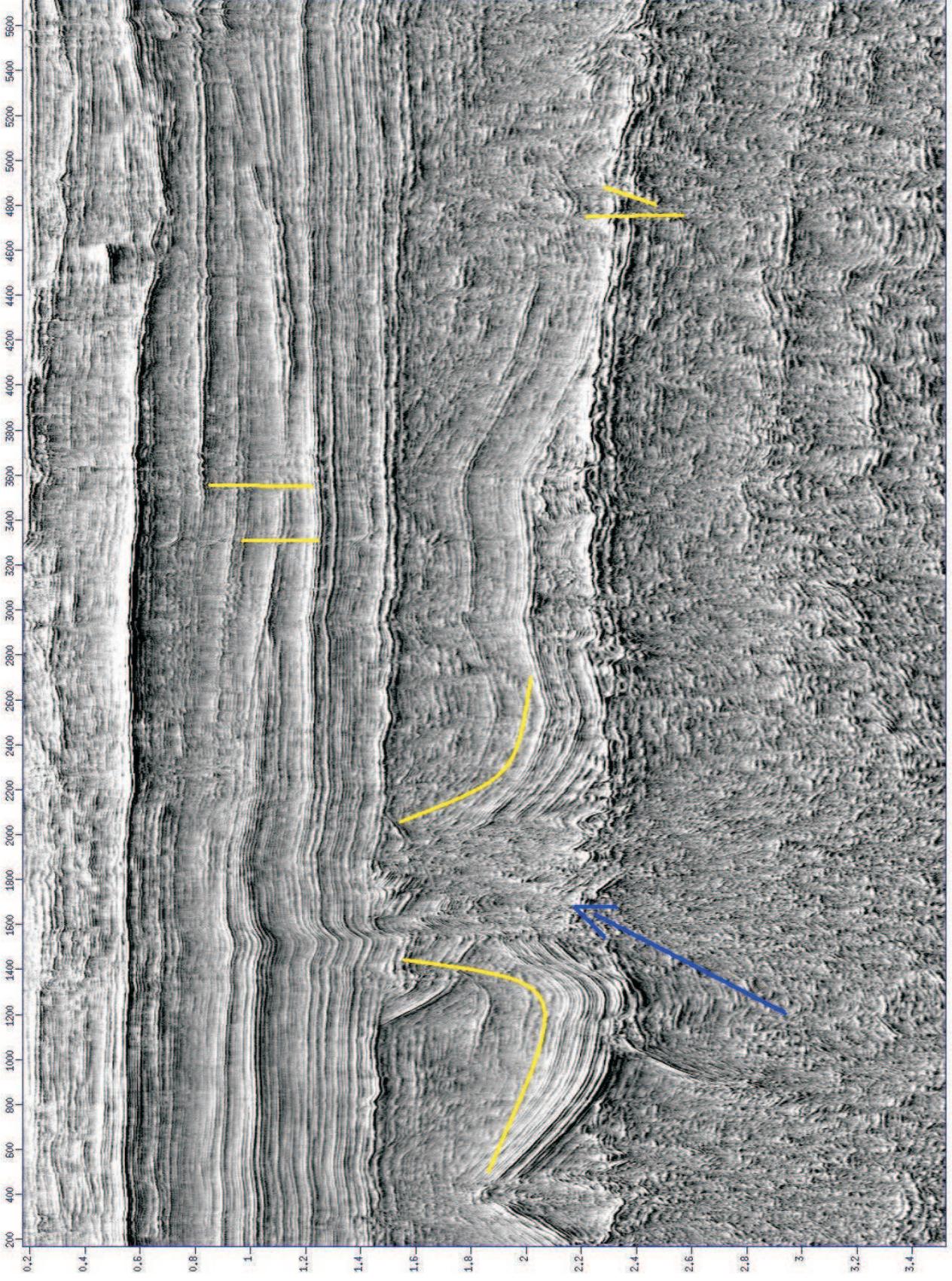


Figura 3.40: Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a Primeira zona com o domo de sal e falhas mapeadas.

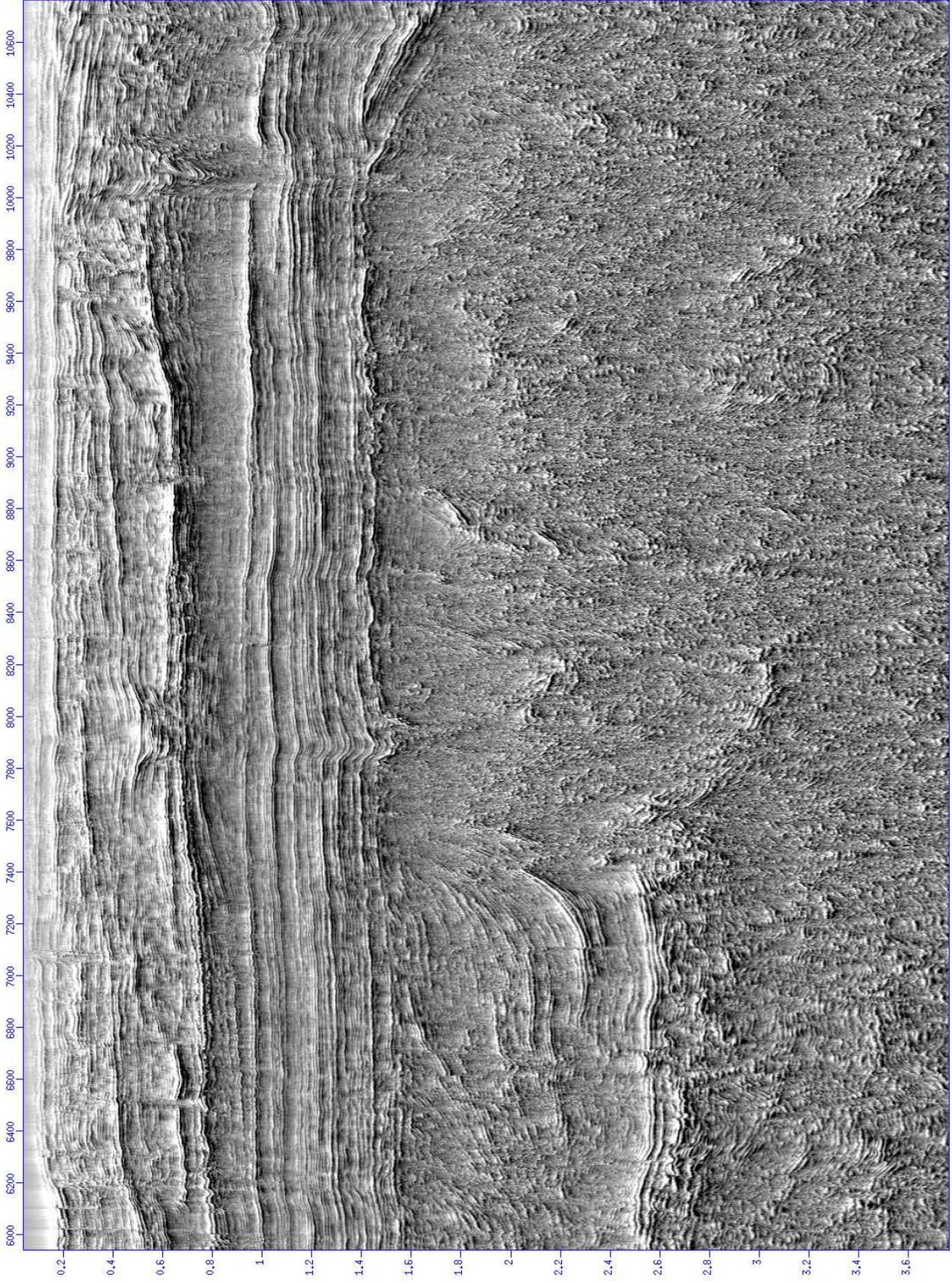


Figura 3.41: Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona.

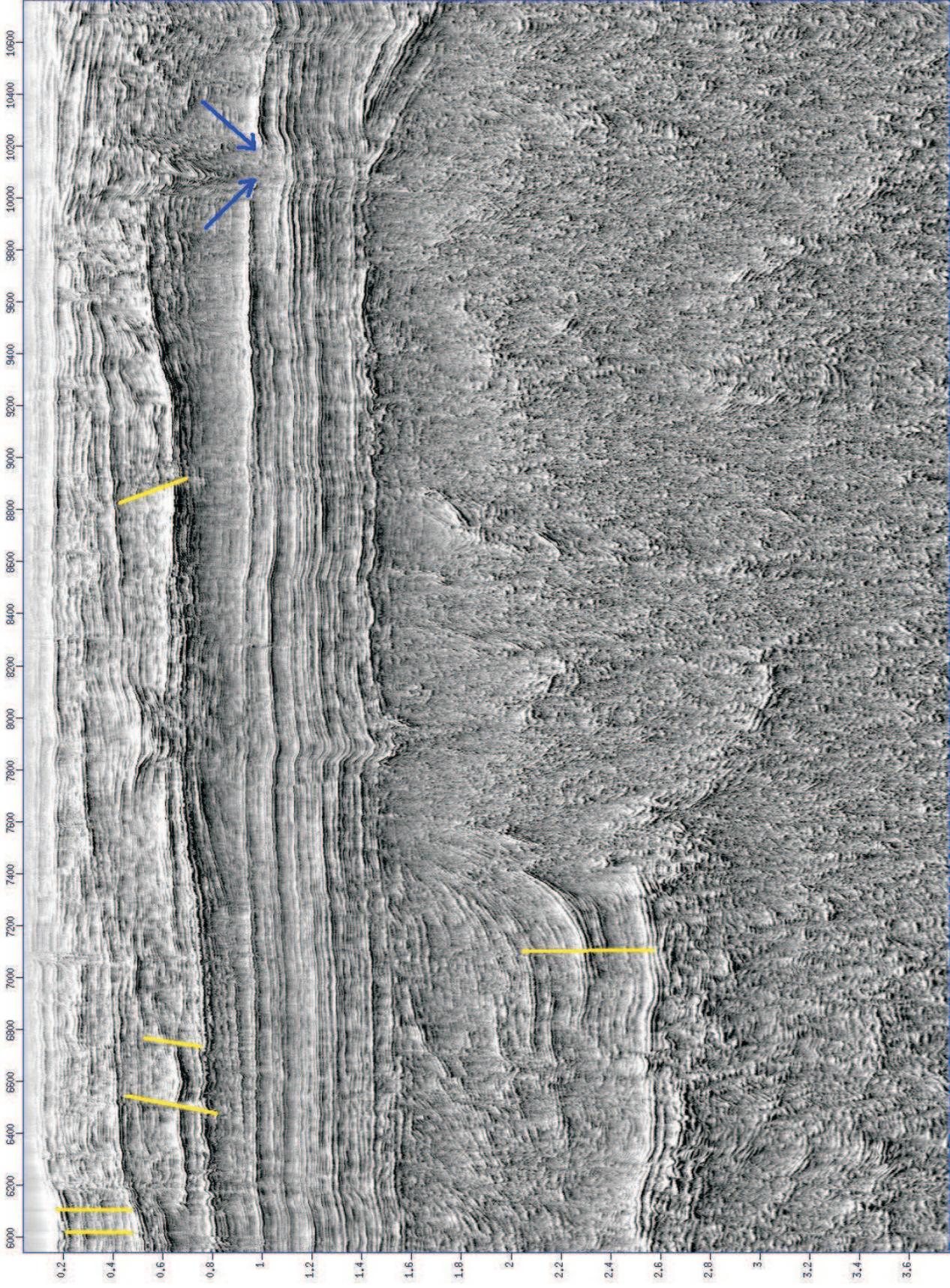


Figura 3.42: Linha 19 - com atributo tecVA - mostrando a segunda zona com falhas mapeadas.

CAPÍTULO 4

Conclusões

Análise de traço complexo separa informações da fase e da amplitude do dado. Essa separação produz dois atributos fundamentais, amplitude e fase instantâneas, dos quais outros atributos do traço derivam.

A amplitude ou envelope, fase e cosseno de fase, mostraram-se úteis na ênfase da continuidade dos refletores. O envelope realçou os refletores com amplitudes mais fortes (detectando um canal), enquanto a fase e cosseno de fase removeram os contrastes de amplitudes, realçando todos refletores, até os mais fundos.

Em alguns casos, quando a distinção entre eventos já não é possível a partir do traço sísmico convencional, a amplitude e frequência instantâneas ainda conseguem percebê-los, ou seja, as anomalias na frequência instantânea podem ser usadas para detectar a presença de camadas delgadas, mesmo sem a diferenciação de topo e base.

O atributo TecVA mostrou-se muito eficiente na visualização de estruturas e do domo de sal, além da continuidade lateral dos refletores, com as seguintes vantagens:

- Difere de outras técnicas de imageamento sísmico por considerar, mais rigorosamente, os limites entre camadas geológicas como superfícies a serem imageadas e tratar cada traço individualmente.
- Essa técnica é de parametrização simples e processamento rápido, o que facilita a visualização imediata e interpretação do arcabouço estrutural, resultando em um dado sísmico com caráter muito mais geológico, facilitando a correlação lateral dos refletores.

Para trabalhos futuros, seria aconselhável usar outras combinações de atributos, como foi feito na TecVA, aplicar atributos volumétricos (estando disponível volumes sísmicos) e diversificar o número de atributos para obter resultados diferentes e poder integrá-los.

Agradecimentos

Agradeço à Deus por todos os objetivos alcançados.

Agradeço à minha mãe pelos ensinamentos de vida e pela educação, e que apesar de todas as dificuldades me deu tudo que uma pessoa precisa na vida: O **Amor**.

Aos meus irmãos e companheiros de luta: Anderson e Alysson pela amizade e carinho. E temos que permanecer sempre unidos.

Aos meus amigos de muitos anos (mais de 13 anos de amizade) e eternos: Guerra, Fábio e Henrique, que já fazem parte da família.

Aos colegas com os quais convivi nesses anos de graduação: Vidal, Isaac, Luis (Lula), Caio, Dian (Djulia), Felipe louco, Alexandre, Luana, Enock, Luite, Vinicius, Manolo, Hilderico, Misael, Betão, Thaís, Taty, Marcy, Vinição, Thiago, Alana, Alan (tio) e Ramon. E todos os outros que não foram citados.

À Orientadora e queridinha Jacira Freitas pela orientação, dedicação, carinho, e pelos ensinamentos de dignidade e respeito.

Aos membros da banca: Michelângelo, pela ajuda à todo momento na realização do trabalho, pois sem ele seria bastante difícil terminar essa etapa. e ao Professor Cicero por aceitar o convite e ajudar os alunos nas horas difíceis.

Aos funcionários: Ana d'Ó, Joaquim Lago, Lene e Marcelinho. Que nos ajudam sempre de forma indireta. Ao LAGEP-CPGG-UFBA pela infra-estrutura.

Referências Bibliográficas

- Barnes, A. E. (2007) Tutorial, the complex seismic trace made simple, *Geophysics*, **72**:W33–W43.
- Chen, Q. e Sidbey, S. (1997) Tutorial, seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring, *The Leading Edge*, **16**:445–456.
- Da Silva, B. O.; Caixeta, M. J.; Milhomem, S. P. e Kosin, D. M. (2007) Bacia do recôncavo, In: *Boletim de Geociências da Petrobras*, vol. 15, cap. 19, pp. 423–433, Petrobras, Rio de Janeiro.
- Ferreira, F. D. (2009) Campo de fazenda mamoeiro, In: *Produção de Petróleo e Gás em Campos Marginais: Um nascente mercado no Brasil*, pp. 126–133, Campinas-São Paulo.
- King, L. H. e Drapeau, G. (1972) Nova scotia, In: *Surficial Geology of the Yarmouth-Brawns Bank map area*, vol. 32, pp. 24–72.
- Mertz, K. A. e Hurbert, J. F. (1990) Nova scotia, In: *Implication For Tectonic and Climatic Controls*, vol. 27, pp. 442–451.
- Milhomem, P. S.; Maman, J. E.; Oliveira, M. F.; Carvalho, S. S. M. e Lima, S. W. (2003) Bacia do recôncavo, In: *Bacias Sedimentares Brasileiras.*, vol. 1, pp. 1–10, Phoenix.
- Pederneiras, G.; Gabaglia, R. e Milani, J. E. (1990) Síntese sobre a geologia das bacias do recôncavo, tucano e jatobá, In: *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*, cap. 6, pp. 235–269, Petrobras, Rio de Janeiro.
- Petróleo, N. A. (2000) Relatório fazenda mamoeiro, In: *Agência Nacional de Petróleo, ANP*, 2000.
- Santos, C. Q. (2009) Aplicação da análise do traco complexo no estudo da resolução sísmica., Sistema Corporativo da Petrobras.
- Santos, E. M. e Amorim, W. N. (2005) Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à técnica de volume de amplitudes (tecva)., Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Schenk, P. E. (1973) Nova scotia, In: *Nova Scotia, Marocco and Continental Drift*.
- Scheuer, T. E. e Oldenburg, D. W. (1988) Tutorial, local fase velocity from complex seismic data, *Geophysics*, **53**:1503–1511.

- Schinelli, C. M. (2008) Curso prático de interpretação sísmica em plataforma landmark - notas de aula., CPGG/UFBA.
- Sheriff, R. E. e Taner, M. T. (1977) Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon exploration, AAPG, **26**:301–327.
- Taner, M. T.; Koehler, F. e Sheriff, R. E. (1979) Tutorial, complex seismic trace analysis, Geophysics, **44**:1041–1063.
- Wade, J. A. e Brown, D. E. and Travers, A. (1996) The triassic-jurassic fundy basin, eastern canada, In: *Regional setting, stratigraphy and hydrocarbon potencial*, vol. 32, pp. 189–231.

ANEXO I

Classificação de atributos

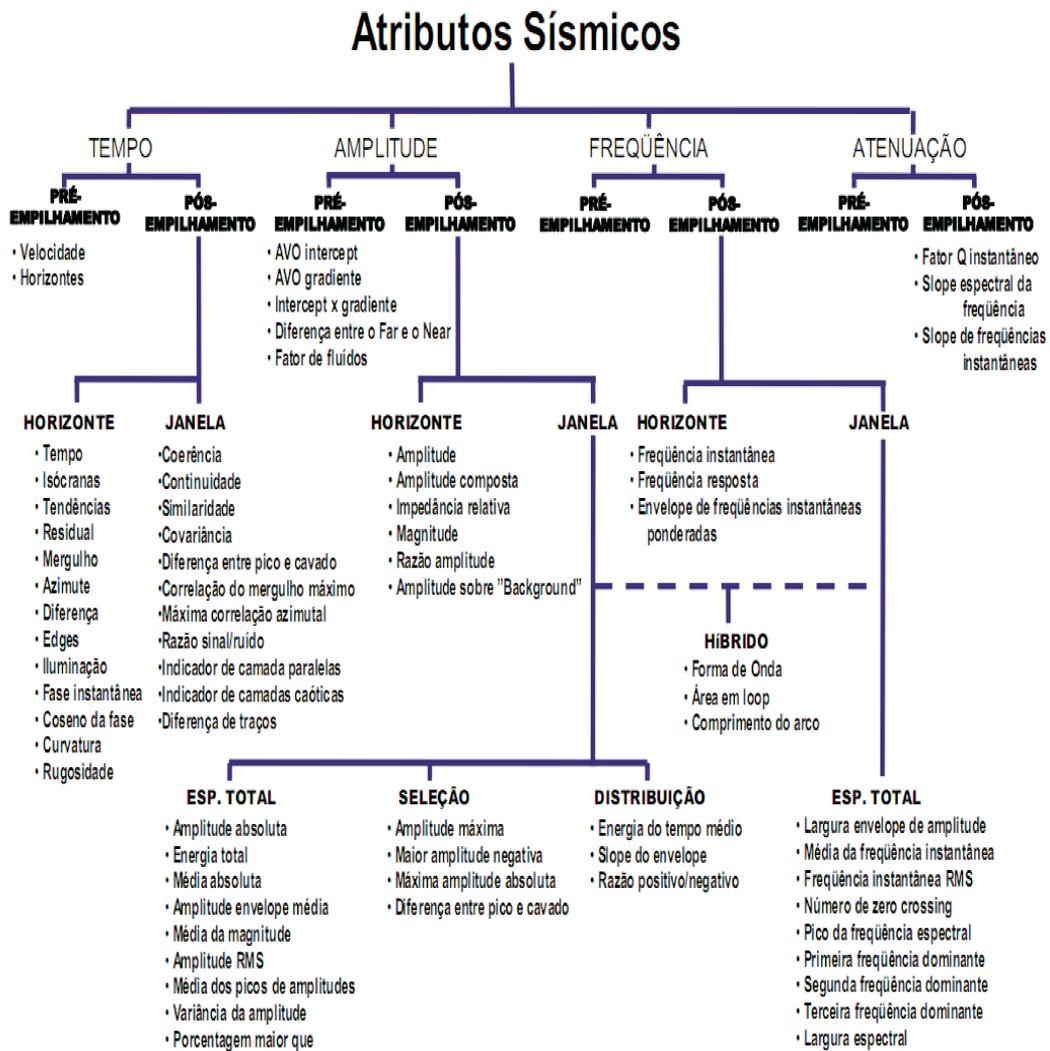


Figura I.1: Classificação de atributos segundo Chen e Sidbey (1997)