



Felipe Costa Dib

**INTERPRETAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO
PRÉ-SAL NA PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2022



UFRJ

Felipe Costa Dib

**INTERPRETAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO PRÉ-SAL NA
PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Rodrigo de Paiva Ferro
João Paulo Miranda Oliveira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2022

FELIPE, COSTA DIB

Interpretação sismoestratigráfica do intervalo Pré-sal na porção central da Bacia de Campos; / Felipe Costa Dib - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2022.

xvi, 81 f.: il., 1 apênd., 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2022.

Orientadores: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, Rodrigo de Paiva Ferro, João Paulo Miranda Oliveira.

1. Geologia. 2. Estratigrafia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo, Fonseca Borghi de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Interpretação sismoestratigráfica do intervalo Pré-sal na porção central da Bacia de Campos.

Felipe Costa Dib

INTERPRETAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO PRÉ-SAL NA
PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DE CAMPOS

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:
Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Rodrigo de Paiva Ferro
João Paulo Miranda Oliveira

Aprovada em: 09.12.2022

Por:

Orientador: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
(UFRJ)

Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo
(UFRJ)

Igor Vinicius Pinto do Nascimento
(CGG)

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família, por todo o apoio, amor e carinho oferecidos ao longo dessa jornada:

À minha mãe, Valéria, por ter sempre estado ao meu lado quando precisei, por me incentivar e me apoiar quando errei ou acertei e por ser meu maior exemplo de uma profissional trabalhadora e determinada.

À minha avó, Maria Alice, por todo o amor incondicional diário dedicado a mim ao longo da graduação e por me mostrar que a paixão é fundamental para sermos bem-sucedidos no que fazemos.

Ao meu pai, Marco Antônio, por desde sempre me incentivar a correr atrás dos meus sonhos, por me mostrar que é preciso ter foco e ambição para correr atrás dos meus objetivos, e por me ensinar que o caminho do sucesso não é uma prova de tiro livre, mas sim uma maratona.

Aos meus orientadores acadêmicos, fundamentais para a conclusão desse trabalho:

Ao Leonardo, por ter aberto as primeiras portas de oportunidades na geologia sedimentar para mim, por todos os ensinamentos passados e pela paciência e tempo dedicados a mim.

Ao João Paulo, por ter me acolhido em 2019 no final do Projeto Delta II, por ter acreditado no meu potencial desde então, por ter apoiado minha evolução ao longo da graduação e por todas as discussões técnicas e conselhos pessoais que tivemos.

Ao Rodrigo, por todas as conversas e ensinamentos passados para mim, por ter me ensinado a mapear meu primeiro refletor sísmico e ter me dado apoio ao longo dessa caminhada.

A todos os amigos pessoais e colegas que conheci ao longo da graduação, sobretudo aos meus grandes amigos Caio, Pedro, Pedro e Rafael, vulgo CCE, por todo o companheirismo, risadas, boas lembranças e por tornarem o desafio que foi a graduação muito mais leve. Sem vocês, essa jornada teria sido muito diferente.

Aos colegas que conheci nos Projetos Delta II e Campos, por todas as trocas, ensinamentos, sugestões, críticas e elogios, fundamentais para o meu crescimento profissional.

Ao LAGESED (Laboratório de Geologia Sedimentar), do qual fiz parte por cinco anos, por terem me dado a oportunidade única de iniciar a construção da minha carreira na geologia do petróleo em um laboratório de ponta desde o início da faculdade, e à Equinor (Equinor Brasil Energia Ltda.), pelo apoio financeiro ao Projeto Campos, tornando possível a realização deste trabalho.

*“Não sou nada.
Nunca serei nada.
Não posso querer ser nada.
À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo.”*

-Fernando Pessoa

Resumo

DIB, Felipe Costa. **Interpretação sismoestratigráfica do intervalo Pré-sal na porção central da bacia de Campos**. Rio de Janeiro, 2022. xvi, 81 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia de Campos pertence ao conjunto de bacias marginais da costa leste brasileira. Sua gênese está diretamente relacionada à abertura do Oceano Atlântico e à consequente formação de um sistema de rifte, no qual estão inseridas três diferentes fases tectonossedimentares: Rifte, Pós-rifte e Drifte, sendo as duas primeiras referentes ao chamado “intervalo Pré-sal”. O trabalho tem como objetivo a interpretação sismoestratigráfica do intervalo Pré-sal da área de estudo, por meio da identificação de sismo-horizontes, sismofácies e sismossequências, assim como a avaliação de mapas de contorno estrutural e isópacas, visando identificar e compreender os possíveis fatores condicionantes do preenchimento estratigráfico do intervalo Pré-sal na porção central da bacia de Campos. O trabalho envolveu a análise e interpretação de um levantamento sísmico 3D PSDM e de dois poços perfurados na área. A partir da interpretação sísmica, concluiu-se que a segmentação estrutural da área de estudo se dá pela direção principal de falhas NE-SW que escalonam os blocos do embasamento e segmentam a área em uma série de hemi-grábens. Com o auxílio dos atributos sísmicos, foram interpretados seis sismo-horizontes chave no intervalo de estudo, além de identificadas e caracterizadas seis sismofácies. A partir desses dados, foi possível subdividir o Pré-sal em cinco sismossequências (SS1 a SS5), limitadas pelos sismo-horizontes e preenchidas internamente pelas sismofácies. A SS1 apresenta sismofácies interpretadas como depósitos siliciclásticos proximais de borda de falha e possíveis derrames vulcânicos, influenciadas diretamente pelo embasamento e falhas geológicas. A partir das SS2 e SS3, uma mudança gradual das sismofácies, conseqüentemente, aponta uma mudança sucessiva na estratigrafia do intervalo, em termos de energia e sedimentação, ainda sob influência de falhas. Já nas SS4 e SS5, nota-se a ocorrência de sismofácies mais plano-paralelas e de altos contrastes de impedância, em oposto ao encontrado nas sismofácies mais basais, corroborando com o entendimento que a diminuição da atividade tectônica e a deposição em ambientes de menor energia dominam a dinâmica deposicional desse intervalo. Dessa forma, discutiu-se como a sedimentação na área de estudo teve uma influência tectônica reduzida gradualmente e uma consequente influência climática gradativamente mais relevante até o topo do Pré-sal.

Palavras-chave: Pré-sal; sismoestratigrafia; bacia de Campos;

Abstract

DIB, Felipe Costa. **Seismic stratigraphy interpretation of the Pre-salt interval in the central portion of Campos Basin.** 2022. xvi, 81 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Campos Basin is one of the sedimentary marginal basins located on the Southeast Brazilian coast. Its genesis is directly related to the opening of the Atlantic Ocean and the consequent formation of a rift system, in which three different tectonosedimentary phases are defined: Rift, Post-rift and Drift, the first two referring to the so-called “Pre-salt interval”. The main objective of this thesis is to apply the seismic stratigraphic interpretation in the Pre-salt interval of the study area, through the identification of seismic horizons, seismic facies and seismic sequences, as well as the evaluation of structural contour and isopach maps, aiming to identify and understand the possible conditioning factors of the stratigraphic filling of the Pre-salt interval in the central portion of the Campos Basin. The work involved the analysis and interpretation of a 3D PSDM seismic survey and two wells drilled in the area. From the seismic interpretation, it was concluded that the structural framework of the study area is due to normal faults with the main trend as NE-SW that tilt the basement blocks and segment the area into a series of hemi-grabens. With the aid of seismic attributes, six key seismic horizons were interpreted in the study interval, in addition to identifying and characterizing six seismic facies. Based on this information, it was possible to subdivide the Pre-salt into five seismic sequences (SS1 to SS5), limited by seismic horizons and internally filled by seismic facies. SS1 presents seismic facies interpreted as siliciclastic deposits proximal to fault edges and possible volcanic flows, directly influenced by the basement. In SS2 and SS3, a gradual change of the seismic facies, consequently, points to a gradual change in the stratigraphy of the interval, in terms of energy and sedimentation. In SS4 and SS5, the occurrence of more plane-parallel seismic facies and high impedance contrasts is noted, as opposed to what is found in the more basal sequences, corroborating the understanding that the decrease in tectonic activity and the deposition in environments of lower energy dominate the sedimentation of this interval. Therefore, it was discussed how the sedimentation in the study area had a gradually reduced tectonic influence and a consequent gradually more relevant climatic influence up to the top of the Pre-salt.

Key-Words: Pre-salt; seismic stratigraphy; Campos Basin

Lista de Figuras

Figura 1 – Seção geológica regional esquemática da bacia de Campos, com ênfase na porção da área de estudo, localizada no limite batimétrico entre águas rasas e profundas (seta vermelha). Modificado de Guardado et al. (2000).	5
Figura 2 – Diagrama estratigráfico da bacia de Campos com o intervalo de estudo em destaque no retângulo vermelho. Retirado de Winter et al. (2007).	7
Figura 3 – Diagrama estratigráfico da bacia de Campos com foco no intervalo Pré-sal (Fases Rifte e Pós-rifte), seus principais eventos tectono-magmáticos, sua extensão temporal, divisões cronológicas e principais unidades litoestratigráficas (CB – Fm. Cabiúnas, ITA – Fm. Itapaboana, ATA - Fm. Atafona, CQ - Fm. Coqueiros, GGU - Fm. Gargaú, MCB - Fm. Macabu, RT - Fm. Retiro). Retirado de Alvarenga et al. (2016) apud Winter et al. (2007).	8
Figura 4 – Localização da área de estudo e dos materiais utilizados, na porção centro-sul da bacia de Campos, evidenciados em verde claro e vermelho.	10
Figura 5 – Volume sísmico 3D PSDM (preto), poços utilizados (círculos pretos), e localização das seções arbitrarias (laranja) e dip/strike (amarelo) que serão discutidas ao longo do presente trabalho.	10
Figura 6 – Fluxograma de trabalho para o presente estudo, seguindo as dez etapas determinadas.	11
Figura 7 – (a) Seção sísmica Dip 5819 na fase normal sem interpretação, com ênfase nas porções com dado sísmico de pouca confiabilidade (setas vermelhas); (b) Seção sísmica Strike 2190 na fase normal sem interpretação, com ênfase nas porções com dado sísmico de pouca confiabilidade (círculo vermelho).	12
Figura 8 – Janela de calibração poço-sísmica do PETREL®, versão 2020.4, com os perfis geofísicos densidade (DENS) e sônico (DT) do poço 1-RJS-135-RJ utilizados no processo e a relação estabelecida entre os perfis com o dado sísmico 3D (sismograma sintético).	14
Figura 9 – Recorte da seção sísmica Dip 5819 com o atributo de Pseudo-Relevo aplicado, diferenciando os três intervalos principais de estudo (Fm. Retiro, Intervalo Pré-sal e embasamento acústico) e suas respectivas características de sismofácies.	17
Figura 10 – Esquema com a seção sísmica Dip 5819 interpretada com falhas e horizontes, com ênfase nos atributos sísmicos utilizados no presente trabalho. Localização da figura referenciada na Figura 5.	18
Figura 11 – (a) Seção sísmica dip 5819 sem interpretação; (b) Seção sísmica dip 5819 interpretada, mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas no intervalo de estudo. Notar a falha principal da área de estudo em rejeito e tamanho, falhando o embasamento até a Formação Macabu, associada ao alto estrutural central; os refletores divergentes abaixo do sismo-horizonte I, com direção a noroeste; o forte contraste de impedância positivo (preto) do topo da Formação Macabu.	22
Figura 12 – (a) Recorte da seção sísmica dip 5819 sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica dip 5819, mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas no intervalo de estudo. Ênfase nas setas em vermelho, apontando as terminações de refletores interpretadas: toplap contra o sismo-horizonte I e downlaps contra os sismo-horizontes II e III.	24
Figura 13 – (a) Recorte da seção sísmica Arbitraria 1 sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica Arbitraria 1, mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas	

interpretadas no intervalo de estudo. Ênfase no número 1, apontando o topo da Formação Macabu (lilás) que sofreu inversão de polaridade e nas setas em vermelho, apresentando truncamentos contra o sismo-horizonte IV.	26
Figura 14 – (a) Recorte da seção sísmica dip 5819, sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica dip 5819 mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas. Ênfase nos refletores sísmicos pertencentes às Sismofácies A e B apresentando morfologias de pináculos (vermelho).	28
Figura 15 – (a) Recorte da seção sísmica Arbitrária 1, sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica Arbitrária 1 mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas. Ênfase nos refletores sísmicos pertencentes à Sismofácies B apresentando clinofomas (tracejado vermelho).	30
Figura 16 – (a) Seção sísmica dip 5819 sem interpretação; (b) Seção sísmica dip 5819 interpretada, mostrando os sismo-horizontes, sismofácies e falhas geológicas interpretadas. Ênfase nas setas em vermelho representando terminações de refletores: à noroeste, terminações em onlap, toplap e terminações em pinch-out contra o alto estrutural local e, à sudeste, uma discordância angular abrupta contra o plano de falha.	32
Figura 17 – (a) Seção sísmica dip 5819 com o atributo de Impedância Acústica Relativa aplicado, sem interpretação; (b) Seção sísmica dip 5819 com o atributo de Impedância Acústica Relativa aplicado, mostrando os horizontes sísmicos, falhas geológicas e sismofácies interpretadas no intervalo de estudo. Notar a resolução vertical dos refletores aumentada, devido ao aumento da frequência do dado sísmico, notável sobretudo na Sismofácies C (azul).	33
Figura 18 – Recorte da seção strike 4302 sem interpretação (à esquerda) e com interpretação (à direita), representando a variação da Sismofácies D (azul) no topo topográfico para a C (vermelha) sentido nordeste na sismossequência 4, ocorrendo de forma interdigitada.	34
Figura 19 – (a) Seção sísmica dip 5819 com o atributo Sweetness aplicado, sem interpretação; (b) Seção sísmica dip 5819 interpretada com o atributo Sweetness aplicado, com ênfase na Sismofácies D interpretada na seção (verde), representando em quase toda a sismofácies baixos valores do atributo aplicado, devido aos baixos valores de frequência característicos dessa sismofácies, e no horizonte do embasamento acústico (vermelho), delimitando bem o início do empilhamento sedimentar.	35
Figura 20 – a) Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento acústico com os poços utilizados; b) Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento acústico, com ênfase nos baixos estruturais identificados (roxo), no principal alto estrutural do embasamento (vermelho) e na principal falha da área de estudo (polígono preto).	39
Figura 21 – Diagrama de Roseta representativo das principais falhas geológicas mapeadas na área de estudo, onde o trend preferencial das falhas é N15E a N30E com vergência para SE.	40
Figura 22 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte I com os poços utilizados, com os baixos estruturais em evidência pelas cores frias.	41
Figura 23 – Mapa de isópaca da sismossequência 1. Notar as maiores espessuras da sismossequência localizadas nos baixos estruturais, e as menores espessuras sobre o alto estrutural central.	41
Figura 24 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte II com os poços utilizados, com os baixos estruturais e o rejeito da falha ainda evidentes, mas com um aumento topográfico relativo das curvas de nível na região central.	42

Figura 25 – Isópaca da sismossequência 2, com o alinhamento de maiores espessuras no sentido NW-SE, representado pela seta em branco. Observar a diferença do padrão das espessuras nesse mapa ao compará-lo com as demais isópacas geradas.	43
Figura 26 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte III com os poços utilizados, com o baixo estrutural a nordeste mais discreto e o baixo a sudeste em evidência. Notar as curvas de nível na porção leste decrescendo nessa direção, enquanto as curvas na porção ocidental do mapa decrescendo sentido norte. Ênfase na região de dificuldade de interpretação devido ao dado sísmico (polígono vermelho).	44
Figura 27 – Mapa de isópaca da sismossequência 3. Notar as maiores espessuras concentradas nos baixos estruturais. Ênfase no polígono tracejado, referente à região de dificuldade de interpretação devido aos problemas no dado sísmico.	45
Figura 28 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte 4. Ênfase na seta (vermelho) indicando o baixo estrutural a sudeste e no plano de falha (branco) que segmenta a borda do mesmo baixo.	46
Figura 29 – Mapa de isópaca da sismossequência 4, com discretas variações de espessura ao longo da área, mantendo a espessura média de 300 metros. Ênfase no polígono (vermelho) referente à região com problemas no dado sísmico.	47
Figura 30 – Mapa de contorno estrutural do topo da Formação Macabu. Notar as curvas de nível decrescendo predominantemente sentido leste-sudeste e o baixo estrutural na porção oriental do mapa.	48
Figura 31 – Mapa de isópaca da sismossequência 5 (Formação Macabu), com as maiores espessuras concentradas nas extremidades sudeste e noroeste do mapa, assim como as menores concentradas na porção central.	49
Figura 32 – a) Seção esquemática do intervalo Pré-sal a partir da linha Dip 5819, representando os sismo-horizontes e as sismofácies interpretadas; b) Seção esquemática do intervalo Pré-sal a partir da linha Dip 5819, representando o arcabouço estratigráfico composto pelas sismossequências interpretadas e coloridas com as respectivas cores dos horizontes de topo de cada unidade.	50
Figura 33 – Modelo conceitual 3D mostrando a interpretação dos principais ambientes deposicionais a partir da análise de sismofácies e elementos arquiteturais na plataforma de Yanada. Retirado de Paumard et al. (2017).	52
Figura 34 – (a) Recorte da seção sísmica dip 5819, sem interpretação, com o perfil litológico (direita) e de raios gama (esquerda), com valores de 0 a 150, plotados no poço; (b) Recorte da seção sísmica dip 5819 interpretada e com os perfis plotados no poço. Notar o pico dos raios gama referente ao refletor de forte sinal positivo (preto).	53
Figura 35 – a) Seção Dip 5819 em fase normal não interpretada, os planos de falha (preto) que segmentam a seção Pré-sal e, na base, porção centro-norte do mapa de contorno estrutural do embasamento acústico (em azul no mapa); b) Seção Dip 5819 com o sismo-horizonte I (laranja) e Sismofácies E (amarelo) interpretadas. Ênfase na geometria externa da sismofácies e nos espaços de acomodação identificáveis no mapa.	55
Figura 36 – Seção sísmica da margem passiva Antártica-Austrália, mostrando a relação genética de camadas vulcânicas escalonadas (azul) por falhas com o crescimento de estruturas sedimentares subjacentes (laranja). Notar a relação dos pacotes em questão com as Sismofácies F e E, respectivamente. Retirado de Gillard et al. (2016).	57

Figura 37 – Seções esquemáticas ilustrando variações morfológicas de sistemas de falhamentos encontrados em hemi-grábens em contexto de rifte. Ênfase na seção A4-A'4 (vermelho), ilustrando uma falha-mestra de borda associada a um sistema de falhas distributárias e falhas antitéticas. Modificado de Rosendhal et al. (1986).....	58
Figura 38 – (a) Seção sísmica strike 4302 sem interpretação; (b) Seção sísmica strike 4302 interpretada, mostrando o poço com perfil litológico, sismo-horizontes e falhas geológicas interpretadas. Notar o padrão plano-paralelo dos refletores sísmicos na direção NE-SW e a menor ocorrência de falhas ortogonais a essa seção.....	60
Figura 39 – Modelo conceitual esquemático de um sistema de rifte assimétrico com deslocamento de hemi-grábens. Notar o padrão escalonado de falhas, com a presença de estruturas do tipo rampa de transferência/revezamento (relay ramps), relacionada a falhas de alívio (breaching faults). Modificado de McClay et al. (2005).....	61
Figura 40 – Representação esquemática ilustrando as idades relativas de pacotes sedimentares definidas pela dinâmica de falhas ao longo de margens de rifte ativo, utilizado para dar embasamento às nomenclaturas de Discordância Rifte I e II, sugeridas para os sismo-horizontes I e II, respectivamente. Retirado de Gillard et al. (2016).....	62
Figura 41 – Esquema representativo dos três principais fatores controladores da estratigrafia de bacias rifte. Retirado de Bosence (1998).	63
Figura 42 – Perfis geofísicos do poço 1-RJS-135-RJ, com ênfase no intervalo do sismo-horizonte III (pontilhado em azul). Notar o aumento das curvas de GR, DT e RES_DP logo após atingir a formação interpretada como folhelhos.	65
Figura A-1 – Esquema representando inconformidades e sismossequências em seções sísmicas. Ênfase nas superfícies limitantes de topo e base da sismossequência. Modificado de Mitchum et al. (1977a).....	76
Figura A-2 – Padrões de terminação de refletores dentro de uma sequência sísmica idealizada. Retirado de Catuneanu (2006).....	77
Figura A-3 – Padrões de configuração de refletores sísmicos. Modificado de Mitchum et al. (1977a).....	79
Figura A-4 – Diferenças de valores de continuidade, amplitude e frequência sísmica encontradas em sismofácies distintas. Retirado de Al-Masgari et al. (2021).....	80
Figura A-5 – Principais configurações externas das sismofácies. Retirado de Mitchum et al. (1977a).....	81

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela esquemática com as sismofácies caracterizadas no presente estudo, demonstrando-as em fase normal (escala vertical em vermelho), interpretadas em desenho, suas características sísmicas e a ocorrência em cada sismossequência.....	37
Tabela A-1 – Parâmetros de caracterização de sismofácies e as interpretações geológicas por elas fornecidas. Retirado de Severiano Ribeiro (2001) apud Mitchum et al. (1977a).....	81

Sumário

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
SUMÁRIO.....	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
Objetivo.....	2
2 CONTEXTO GEOLÓGICO	3
2.1 Tectônica.....	3
2.2 Estratigrafia	5
3 MATERIAIS.....	9
3.1 Poço	9
3.2 Sísmica.....	9
4 MÉTODOS.....	11
4.1 Estudo bibliográfico e referencial teórico.....	11
4.2 Carregamento dos dados e controle de qualidade.....	11
4.3 Calibração sísmica-poço	12
4.4 Interpretação sísmica	14
4.5 Atributos sísmicos	15
4.6 Sismo-horizontes.....	19
4.7 Sismofácies	19
4.8 Sismossequências.....	20
4.9 Mapas de contorno e isópacas.....	20
4.10 Fatores condicionantes	20
5 RESULTADOS.....	21
5.1 Sismo-horizontes.....	21
5.2 Sismofácies	27
5.3 Sismossequências.....	38
6 DISCUSSÕES.....	51
6.1 Caracterização de sismofácies.....	51

6.2 Caracterização das sismossequências	57
6.2.1 Controle estrutural na sedimentação.....	57
6.2.2 Evolução estratigráfica	62
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
7.1 Próximos passos	68
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
APÊNDICE A – REFERENCIAL TEÓRICO	74
Poço.....	74
Sísmica	75
Interpretação sismoestratigráfica	75
Terminação de refletores	76
Sismofácies (fácies sísmica).....	78

1 INTRODUÇÃO

A bacia de Campos, situada na região Sudeste do Brasil, pertence ao conjunto de bacias *offshore* da margem leste brasileira. Durante décadas, a bacia de Campos foi a mais prolífera do Brasil, possuindo as maiores reservas exploradas, até a descoberta das acumulações do intervalo Pré-sal na bacia de Santos tomarem a vanguarda da exploração de óleo e gás no país (GUARDADO *et al.*, 2000).

No Pré-sal da bacia, as coquinas (Formação Coqueiros) foram consideradas importantes reservatórios de hidrocarbonetos em meados da década de 1970, quando foram descobertos os campos comerciais de Badejo, Linguado, Pampo e Trilha, enquanto os “microbialitos” (Formação Macabu) não apresentaram acúmulos prolíficos, possivelmente devido às janelas de sal existentes no sistema petrolífero. Apesar disso, o Cretáceo da bacia de Campos possui relevantes reservatórios do Pré-sal, explorados em diversos ativos em operação, como os blocos BM-C-33 e Wahoo, os campos de Caratinga e Marlim Leste e o *cluster* Parque das Baleias, sendo o último explorado desde o final dos anos 2000. Na área de estudo, até o presente momento, alguns poços atingiram o Pré-sal e identificaram acumulações de hidrocarbonetos, porém, em quantidades não-comerciais.

Atualmente, a bacia de Campos aparece em segundo lugar na produção de petróleo, com mais de 21% da produção total, assim como em terceiro lugar na produção de gás natural, com cerca de 9% da produção total, segundo o boletim da Produção Mensal de Petróleo e Gás Natural da ANP publicado no mês de junho de 2022 (ANP, 2022). Recentemente, com o novo cenário de descomissionamento e revitalização de campos maduros, em paralelo aos investimentos em fronteiras exploratórias na bacia, o intervalo Pré-sal da bacia de Campos se encontra em uma posição de destaque na geologia do petróleo brasileira, sobretudo por representar, simultaneamente, uma retomada e um novo marco na exploração de óleo e gás.

Por outro lado, poucos trabalhos acadêmicos foram desenvolvidos a respeito da interpretação sismoestratigráfica e caracterização de sismofácies do intervalo Pré-sal da bacia de Campos. A caracterização do arcabouço estratigráfico através da interpretação sísmica é um procedimento essencial na indústria do petróleo, cujo qual pode ser aprimorado e aplicado em estudos de casos detalhados. O reconhecimento de sismo-horizontes e sismossequências, assim como a caracterização de sismofácies do intervalo Pré-sal, como proposto neste trabalho, permite um melhor entendimento da relação dos pacotes sedimentares com os fatores condicionantes da sua sedimentação e deformação, assim como a definição de sistemas petrolíferos e dos eventos deposicionais em uma bacia sedimentar, conhecimento imprescindível em um fluxo de trabalho de exploração de hidrocarbonetos.

Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo a interpretação sismoestratigráfica do intervalo Pré-sal da área de estudo, por meio da identificação de sismo-horizontes, da identificação e caracterização de sismofácies, avaliando parâmetros como configuração de refletores, textura, variações de amplitude, continuidade e frequência, assim como variações de ocorrência de sismofácies nas sismossequências. Por fim, o presente trabalho também visa a segmentação do intervalo de estudo em sismossequências, avaliando mapas de contorno estrutural e isópacas gerados, de forma a identificar e discutir possíveis fatores condicionantes do preenchimento estratigráfico do intervalo de estudo, abordando as relações entre diferentes sismofácies, a influência tectônica na sedimentação e a possível evolução estratigráfica do intervalo.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A bacia de Campos é uma bacia sedimentar localizada ao longo da margem continental sudeste do Brasil. Seu limite sul, localizado no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, é marcado pelo Alto de Cabo Frio, que a separa da bacia de Santos, enquanto o seu limite norte é definido pelo Alto de Vitória, que a limita, por sua vez, da bacia do Espírito Santo. Em sua totalidade, a bacia ocupa uma área de aproximadamente 100.000 km², desde os afloramentos do embasamento no continente até seu limite com as águas internacionais (WINTER *et al.*, 2007).

Tendo em vista a classificação das diferentes sequências sedimentares da bacia de Campos, foram utilizados como base teórica do presente trabalho dois artigos científicos: Cainelli & Mohriak (1999) e Winter *et al.* (2007). Enquanto no primeiro artigo a bacia é subdividida em quatro Megasequências - Pré-Rifte, Continental, Transicional e Marinha -, levando-se em consideração sobretudo a estratigrafia da bacia, no artigo de Winter *et al.* (2007) propõe-se que a compartimentalização do preenchimento sedimentar seja feita em três grandes Supersequências: Rifte, Pós-Rifte e Drifte, unidades correlatas às Continental, Transicional e Marinha de Cainelli & Mohriak (1999), respectivamente.

Dessa forma, apesar da proposta de divisão da bacia de Campos criada por Cainelli & Mohriak (1999) ser amplamente utilizada na academia, este trabalho utilizará como referência bibliográfica para a análise estratigráfica da bacia os termos tectônicos e magmatismos estabelecidos no diagrama cronoestratigráfico publicado por Winter *et al.* (2007), nas quais apenas as duas primeiras Supersequências serão abordadas, por englobarem todo o intervalo Pré-sal.

2.1 Tectônica

A evolução tectônica da bacia de Campos, assim como as demais bacias sedimentares da margem continental brasileira, é controlada pelo rifte mesozóico do Atlântico Sul, processo distensivo iniciado no Jurássico Superior que resultou na ruptura do paleocontinente Gondwana e, conseqüentemente, no desenvolvimento de várias bacias sedimentares marginais na costa leste brasileira e na costa oeste do continente africano (THOMAZ FILHO *et al.*, 2000). O processo de abertura do Atlântico mais aceito atualmente é dado como um misto de estiramento litosférico e afinamento da crosta e manto litosférico, acompanhado do fenômeno de *underplating* e, posteriormente, evoluindo para uma ruptura continental e uma subsidência associada ao resfriamento da astenosfera (MCKENZIE, 1978 *apud* ANP, 2017).

No caso da bacia de Campos, durante o processo de rifteamento, formou-se um *rift valley* alongado na direção NE-SW onde se desenvolveram uma série de grábens, hemi-grábens e *horsts*, assim como altos estruturais e depocentros locais que configuraram o arcabouço estrutural da bacia de Campos na forma de blocos rotacionados no chamado “padrão dominó” (Figura 1) (GUARDADO *et al.*, 1989). Nesse contexto, considerando a evolução tectonoestratigráfica das bacias

brasileiras em geral, Winter *et al.* (2007) estabeleceram três Supersequências: Rifte, Pós-Rifte e Drifte.

A Supersequência Rifte corresponde ao rifte principal ocasionado pelo movimento divergente das placas tectônicas da África e da América do Sul, durante o Neojurássico ao Eocretáceo (CHANG *et al.*, 1992). Essa unidade se estende por 3.500 km e é limitada a oeste por falhas normais sintéticas com deslocamentos variáveis, com rejeitos ultrapassando, por vezes, 2.000 metros. As primeiras fases de subsidência sin-rifte em regiões alongadas e falhadas foram preenchidas por basaltos toleiíticos (Formação Cabiúnas). Segundo Almeida *et al.* (1996), em termos genéticos, a Formação Cabiúnas e suas unidades basálticas correspondentes nas bacias de Espírito Santo e Santos (Fm. Camboriú) são correlacionáveis com os eventos magmáticos da área continental, como é o caso da Formação Serra Geral, na bacia do Paraná.

A Supersequência Pós-Rifte, por sua vez, é marcada por um decréscimo na atividade do estiramento litosférico, rifteamento da crosta continental e, conseqüentemente, das atividades de falha envolvendo o embasamento, cuja variação ocorreu localmente e em taxas diferentes em comparação ao padrão regional. Estabeleceu-se, então, um período de peneplanização das cristas dos blocos de falha neocomianos soerguidos e rotacionados, deixando como registro uma topografia residual (CAINELLI & MOHRIAK, 1999).

Os depósitos evaporíticos aptianos subsequentes ocorrem na América do Sul e na África Ocidental, desde a Zona de Fratura do Rio Grande no sul. De acordo com Mohriak *et al.* (2008), os movimentos decorrentes da tectônica do sal afetaram as rochas sobrejacentes da Supersequência Drifte, criando uma série de falhas de crescimento lístrico nos domínios extensionais comumente associadas a estruturas do tipo “jangada”, sub-bacias *intraslopes* condicionadas por domos de sal, muralhas de sal e falhas de empurrão nas regiões de domínio compressional.

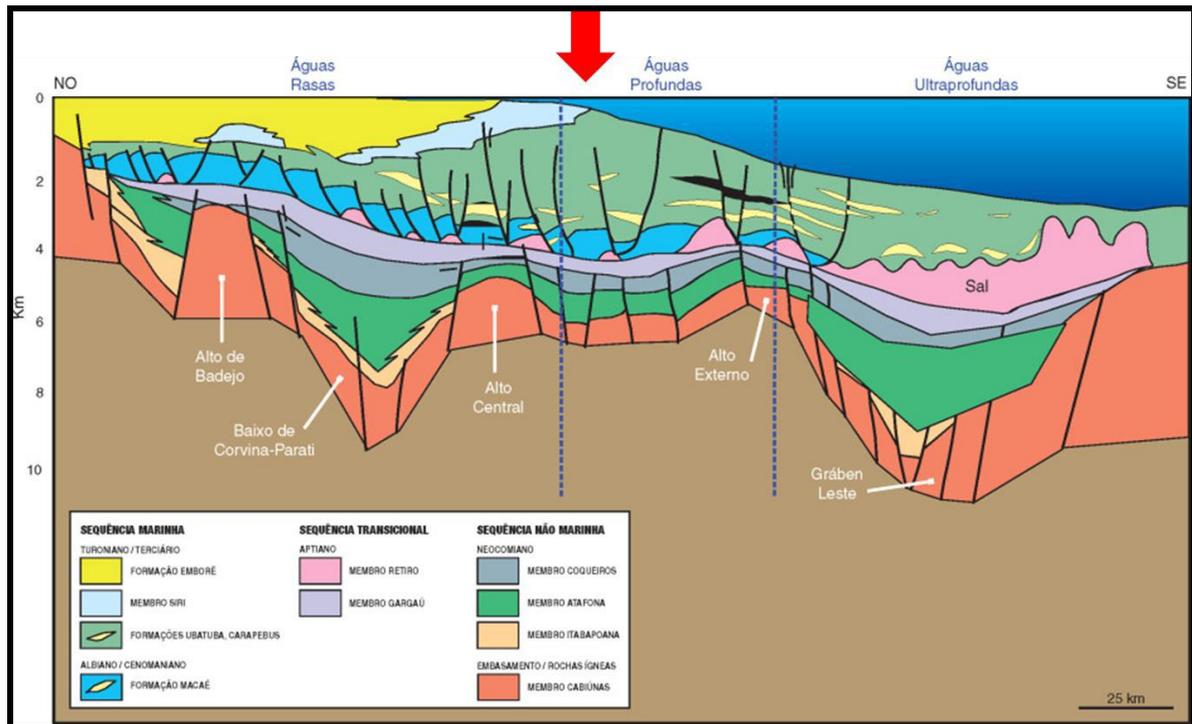


Figura 1 – Seção geológica regional esquemática da bacia de Campos, com ênfase na porção da área de estudo, localizada no limite batimétrico entre águas rasas e profundas (seta vermelha). Modificado de Guardado *et al.* (2000).

2.2 Estratigrafia

A primeira carta estratigráfica da bacia de Campos foi proposta em Schaller (1973) e estabeleceu as relações litoestratigráficas a partir de resultados da perfuração dos primeiros poços da bacia. Posteriormente, a carta passou por diversas atualizações, sendo a última proposta por Winter *et al.* (2007), que compilaram e resumiram o conhecimento que se tinha sobre a bacia até então, dando ênfase à análise cronoestratigráfica utilizando dados de poços e sísmica (Figura 2 e Figura 3). Sendo assim, estes autores defendem que o preenchimento sedimentar da bacia é compartimentado em três grandes Superseqüências: Superseqüência Rifte, Superseqüência Transicional (ou Pós-rifte) e Superseqüência Drifte que são, por sua vez, subdivididas em unidades litoestratigráficas (WINTER *et al.* 2007).

A análise do presente trabalho foca nas unidades litoestratigráficas que ocorrem no intervalo Pré-sal da bacia, interpretado por Winter *et al.* (2007) como as unidades da Superseqüência Rifte e Pós-rifte, que consistem na Formação Cabiúnas e no Grupo Lagoa Feia.

A Formação Cabiúnas, também intitulada como “embasamento econômico”, é a unidade mais basal da Superseqüência Rifte e é composta por basaltos alcalinos depositados durante o Hauteriviano que sobrepõem o embasamento cristalino pré-cambriano. Esta unidade é caracterizada por rochas ígneas básicas, por vezes intercaladas com camadas de rochas vulcanoclásticas e sedimentares. Porém, o diabásios e rochas com textura traquítica podem ser mapeadas em menores

proporções em relação ao basalto (MIZUSAKI, 1986). Essas rochas compõem grande parte do embasamento interpretado na área de estudo (embasamento acústico), sendo o mais profundo refletor sísmico interpretado no dado.

O Grupo Lagoa Feia foi depositado desde o Barremiano até o Albiano Inferior. De acordo com Winter *et al.* (2007), o Grupo Lagoa Feia está subdividido em seis Formações: Itabapoana, Atafona, Coqueiros, Gargaú, Macabu e Retiro.

A Formação Itabapoana é composta por conglomerados polimíticos, siltitos, folhelhos e arenitos líticos formados a partir de leques de delta e leques aluviais associados às falhas de borda na porção oeste da bacia, nas margens de um paleoambiente interpretado como lacustre. Esses sedimentos foram relacionados à atividade de falhas normais no processo de rifteamento da bacia, por volta de 130 Ma. Esta unidade ocorre nas fases Rifte e Pós-rifte, podendo ocorrer interdigitada com as unidades subjacentes.

A Formação Atafona é composta por arenitos, siltitos e folhelhos lacustres com intercalações carbonáticas que foram depositados em uma condição química específica, na qual possibilitou a formação de minerais talco-estevensíticos (WINTER *et al.*, 2007). Sua deposição, quando em contato com os basaltos da Formação Cabiúnas, ocorre na forma de discordâncias, ou interdigitada lateralmente, quando em contato com a Formação Coqueiros. Seu limite superior é composto por sedimentos finos lamíticos e se dá pela discordância Pré-Jiquiá.

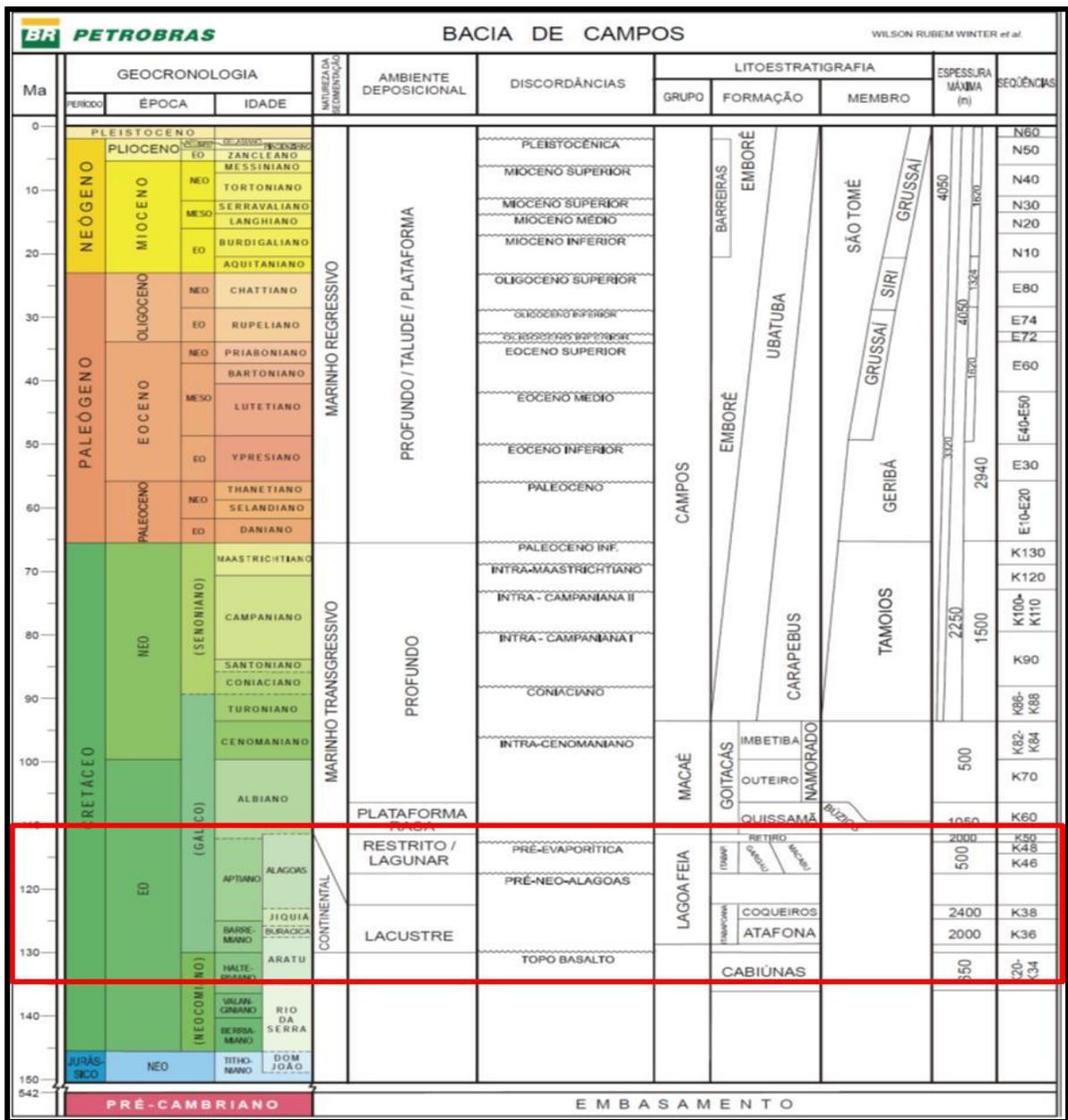
A Formação Coqueiros é composta por espessas acumulações de coquinas composta predominantemente por depósitos de bivalves de moluscos (MOHRIAK, 2003), intercaladas por folhelhos, carbonatos lacustres, calcirruditos, calcarenitos e calcilitos (BAUMGARTEN *et al.*, 1988). Os pacotes de coquinas e depósitos de leques aluviais foram depositados em paleoambientes lacustres de alta energia na fase Rifte, geralmente na forma de sedimentos retrabalhados. Esta formação possui grande relevância na área de estudo, por representar um importante reservatório de petróleo e é facilmente identificável em dados sísmicos, uma vez que a intercalação de folhelhos ricos em matéria orgânica apresenta baixa densidade, enquanto as coquinas apresentam alta densidade e, assim, representam uma fácies sísmica bem característica, com altos valores de amplitude nos refletores sísmicos em questão. Adicionalmente, os refletores sísmicos com máximas amplitudes negativas referem-se aos folhelhos do andar Jiquiá (folhelho Jiquiá) que, por sua vez, são as principais rochas geradoras de petróleo da bacia (WINTER *et al.* 2007).

A Formação Gargaú é representada por folhelhos, siltitos, margas e arenitos (RANGEL *et al.* 1994). Essa formação geralmente ocorre intercalada com argilitos que gradam distalmente em carbonatos microbianos da Formação Macabu. A unidade em questão depositou-se de forma discordante sobre as rochas carbonáticas da Formação Coqueiros. O contato superior também é discordante, por sua vez com rochas evaporíticas da Formação Retiro.

A Formação Macabu é composta por carbonatos microbianos, também conhecidos como microbialitos (RANGEL *et al.* 1994). Estes são interpretados como tendo sido depositados em um ambiente árido, em ambientes marinhos rasos e restritos (WINTER *et al.* 2007). Esta formação ocorre mais comumente nas partes distais da bacia de Campos e situa-se de forma discordante acima dos sedimentos clásticos da Formação Coqueiros, e raramente no topo dos basaltos da Formação

Cabiúnas. O contato superior é discordante com a Formação Retiro. Com base em datações palinológicas e de ostracodes, esses sedimentos são interpretados com idade Aptiano Superior, da fase Pós-rifte (WINTER *et al.* 2007).

A Formação Retiro é caracterizada por sedimentos evaporíticos, principalmente anidrita e halita, que foram depositados em um ambiente hipersalino na fase Pós-rifte (ASMUS *et al.*, 1971; RANGEL *et al.*, 1994; WINTER *et al.*, 2007). O acúmulo espesso de evaporitos levou ao desenvolvimento posterior de expressivas estruturas de sal, com grandes espessuras, particularmente nas regiões distais e de depocentro da bacia (MOHRIAK *et al.* 2008).



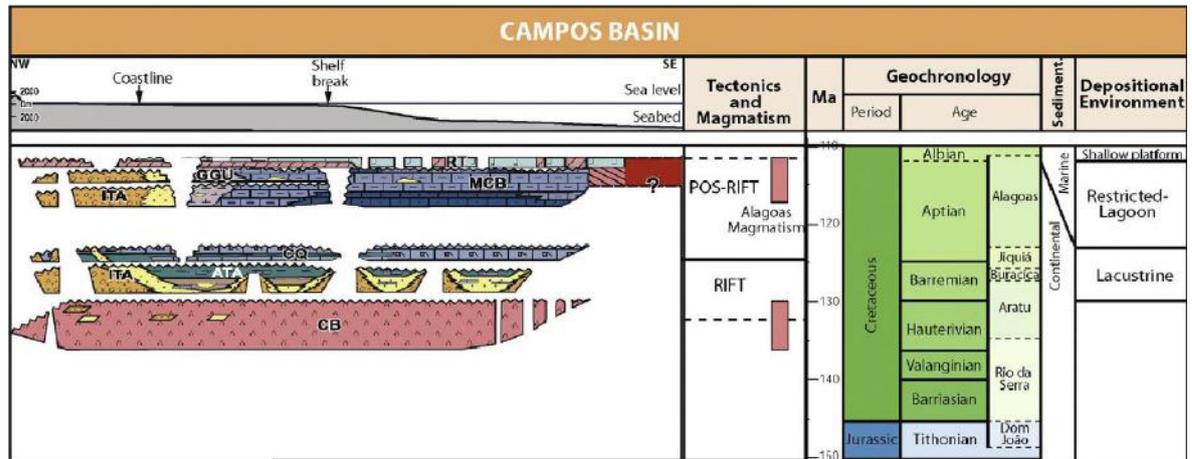


Figura 3 – Diagrama estratigráfico da bacia de Campos com foco no intervalo Pré-sal (Fases Rífite e Pós-rífite), seus principais eventos tectono-magmáticos, sua extensão temporal, divisões cronológicas e principais unidades litoestratigráficas (CB – Fm. Cabiúnas, ITA – Fm. Itapaboana, ATA - Fm. Atafona, CQ - Fm. Coqueiros, GGU - Fm. Gargaú, MCB - Fm. Macabu, RT - Fm. Retiro). Retirado de Alvarenga *et al.* (2016) apud Winter *et al.* (2007).

3 MATERIAIS

Inserida no polígono do Pré-sal, a área de estudo possui aproximadamente 600 km² e se localiza na porção central da bacia, na região da plataforma continental e em um domínio proximal a médio, com a lâmina d'água variando de 200 a 1100 metros, e dista aproximadamente 126 km da cidade de Macaé, no litoral do estado do Rio de Janeiro (Figura 4). Os dados utilizados localizam-se sobre alguns campos produtores como Bijupirá, Salema, Malhado, Congro e Caratinga.

Os dados utilizados neste estudo consistem em dois poços e um volume sísmico 3D e são provenientes do Banco de Dados de Exploração e Produção da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (BDEP/ANP), sendo tais obtidos pelo projeto de P&D denominado Projeto Campos, intitulado “Evolução tectonossedimentar do intervalo Pré-sal na bacia de Campos”, desenvolvido no Lagesed-UFRJ, ao qual este trabalho está vinculado.

3.1 Poço

São dois os poços utilizados no presente trabalho: 1-RJS-135-RJ e 6-BRSA-652-RJS (Figura 5).

O poço 1-RJS-135-RJ teve sua perfuração em 1980 e apresenta, além dos marcadores litológicos e tabela de *checkshot*, todos os perfis geofísicos básicos - *caliper*, raios gama, sônico, densidade, neutrão e resistividade, sendo os quatro primeiros os mais utilizados no presente trabalho - até a Formação Coqueiros.

O poço 6-BRSA-952-RJS data de 2011 e apresenta, além dos marcadores litológicos e *checkshot*, perfis geofísicos básicos - *caliper*, raios gama, sônico, densidade, neutrão, resistividade e o fator fotoelétrico - até a Formação Macabu, o que possibilitou uma boa sustentação para a interpretação do intervalo perfilado.

3.2 Sísmica

Para a análise sismoestratigráfica, o levantamento sísmico 3D utilizado no trabalho foi o “R0235_BIJUPIRA_SALEMA_MERGE_II” (Figura 4 e Figura 5).

O volume sísmico “R0235”, foi adquirido já processado e migrado em profundidade (PSDM) e adquirido no formato SEG-Y. Dessa forma, não foi necessária a realização de reprocessamentos, apenas o controle de qualidade do dado e, posteriormente, a interpretação sísmica. O dado é datado de 2014 e possui uma área de cobertura de aproximadamente 600 km².

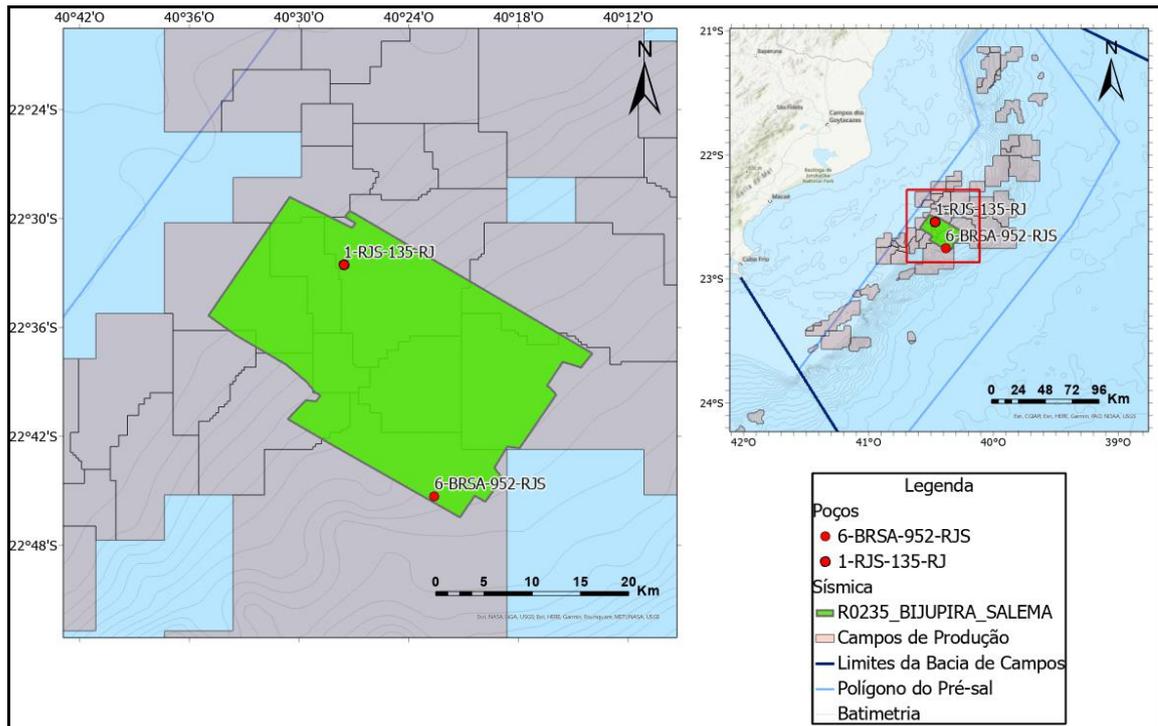


Figura 4 – Localização da área de estudo e dos materiais utilizados, na porção centro-sul da bacia de Campos, evidenciados em verde claro e vermelho.

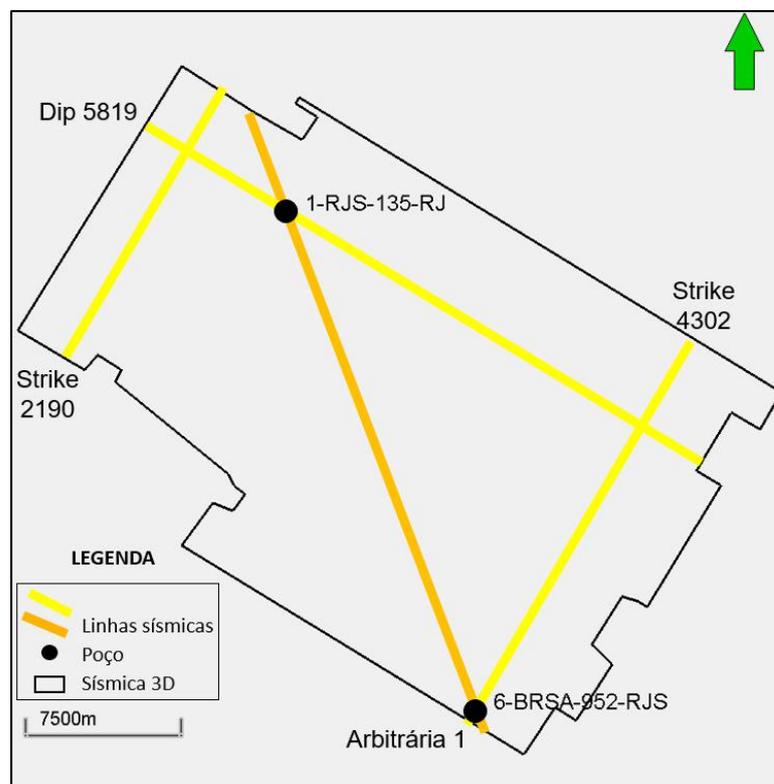


Figura 5 – Volume sísmico 3D PSDM (preto), poços utilizados (círculos pretos), e localização das seções arbitrárias (laranja) e *dip/strike* (amarelo) que serão discutidas ao longo do presente trabalho.

4 MÉTODOS

De forma a organizar as atividades do presente estudo, foi elaborado um fluxograma de trabalho que pode ser observado na Figura 6.

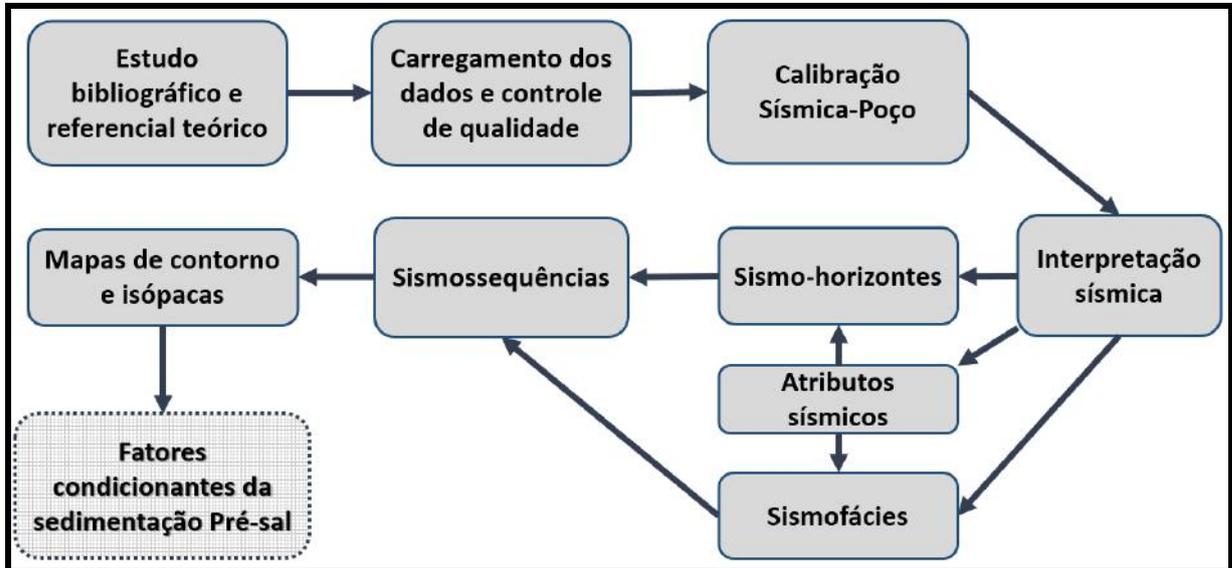


Figura 6 – Fluxograma de trabalho para o presente estudo, seguindo as dez etapas determinadas.

4.1 Estudo bibliográfico e referencial teórico

Inicialmente, de modo a auxiliar nas interpretações dos materiais e de suportar as discussões do presente trabalho, foi feito um estudo bibliográfico a partir dos principais artigos referentes à geologia da bacia de Campos (apresentadas na Seção 2), assim como o estudo dos principais métodos comumente utilizados na interpretação sísmica e de sismofácies (expostas no Apêndice APÊNDICE A – REFERENCIAL TEÓRICO).

4.2 Carregamento dos dados e controle de qualidade

Após ter sido feita a revisão bibliográfica da estratigrafia e tectônica da bacia de Campos e área de estudo, assim como a revisão metodológica e conceitual sobre interpretação sismoestratigráfica, foi iniciado o processo de carregamento dos dados no software PETREL®, versão 2020.4.

Os arquivos dos perfis geofísicos no formato “.las” foram carregados e, posteriormente, foi feito o controle de qualidade dos dados. De forma simplificada, esse controle de qualidade consistiu em atividades como a remoção de picos anômalos (*despike*), a edição dos perfis geofísicos de modo a representarem a profundidade correta do dado (*depth shift*) e a união de perfis gerados em diferentes corridas em um único perfil (*splice*).

Em relação ao volume sísmico 3D utilizado nesse trabalho, primeiramente, foi realizado o controle de qualidade dos dados com o rastreamento qualitativo de áreas que apresentavam baixa relação sinal-ruído. Foi identificado que o cubo sísmico apresenta, de um modo geral, uma boa resolução sísmica na maior parte do intervalo que compreende o intervalo Pré-sal, com exceção da porção noroeste do levantamento (Figura 7). Tal região está localizada próximo ao limite do levantamento sísmico que, associado à complexidade geológica existente na área, produziu artefatos sísmicos que não foram resolvidos durante o processamento, comprometendo seu imageamento e gerando um grau de incerteza sobre alguns resultados desenvolvidos nesta porção do dado (Figura 7).

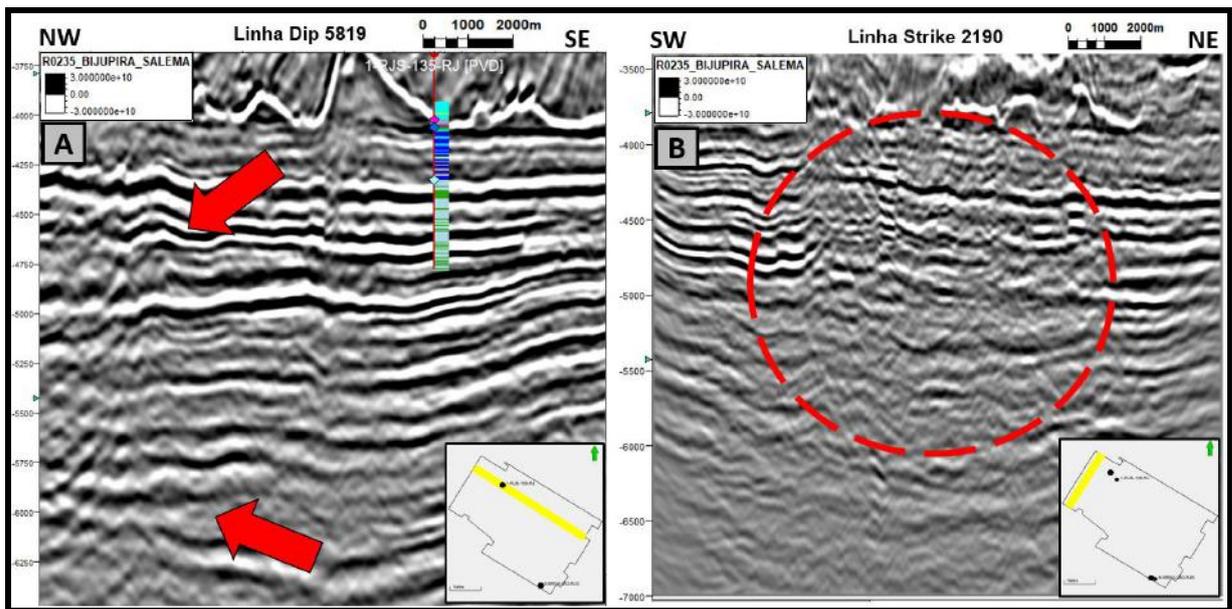


Figura 7 – (a) Seção sísmica *Dip* 5819 na fase normal sem interpretação, com ênfase nas porções com dado sísmico de pouca confiabilidade (setas vermelhas); (b) Seção sísmica *Strike* 2190 na fase normal sem interpretação, com ênfase nas porções com dado sísmico de pouca confiabilidade (círculo vermelho).

4.3 Calibração sísmica-poço

Uma vez concluído o carregamento e o controle de qualidade dos dados, iniciou-se o processo de calibração da sísmica com os dados de poço. A calibração sísmica-poço é um dos passos mais importantes para o início da interpretação sísmica de horizontes, visando a análise sismoestratigráfica, pois é através da correlação que são transferidas as informações litoestratigráficas dos poços para as seções sísmicas.

Mesmo trabalhando com um dado sísmico migrado no domínio da profundidade, a integração destes dados por parte do intérprete sísmico é imprescindível, uma vez que os perfis geofísicos do poço têm a vantagem de ser uma informação medida diretamente das rochas e apresentar uma ótima resolução vertical (em profundidade, 1D), enquanto os dados sísmicos têm como principal vantagem a continuidade e resolução lateral dos refletores sísmicos, sendo viável,

assim, associar as informações dos dados de poço ao dado sísmico, integrando essas duas escalas de trabalho e obtendo maior confiabilidade na interpretação.

Sendo assim, de modo a estabelecer a correlação entre estes dados, é necessário obter uma relação de tempo vs. profundidade que pode ser obtida a partir da utilização de um arquivo de *checkshot* disponível nos arquivos do poço. Os dados de *checkshot* são dispostos na forma de uma planilha referente ao tempo de trânsito de uma onda sísmica em tempo simples (*One Way Time - OWT*) que viaja da superfície (ou datum de referência) até determinadas profundidades ou intervalos dos receptores (*Measured Depth - MD*) dispostos ao longo da coluna do poço.

Além da planilha de *checkshot*, outro elemento vital da calibração sísmica-poço é a utilização de uma *wavelet*. Essa pode ser tanto estimada quanto extraída do próprio dado sísmico. No caso do presente trabalho, a escolha da frequência da *wavelet* baseou-se na estimativa de uma série de *wavelets* analíticas *Ricker* modeladas, até chegar a uma frequência de 25Hz que, por sua vez, propiciou uma calibração com o dado sísmico satisfatória. Dessa forma, a partir da sua combinação com os perfis de densidade (RHOB) e sônico (DT), foi gerado um sismograma sintético. O sismograma sintético combina informações de poços que permitem estimar a verdadeira origem da resposta sísmica e quantificar a relevância ou não de determinados refletores (SCHINELLI, 2013). Pode-se dizer ainda que é uma forma de confirmar se o modelo sísmico proveniente do processamento representa de forma fidedigna a realidade.

Após a geração do sismograma sintético (Figura 8), foi realizado um controle de qualidade da calibração, por meio da ancoragem do sismograma sintético gerado com os marcadores litológicos de topo de formação importados dos dados de poço e pelos refletores sísmicos. Dessa forma, foi possível “ancorar” os trechos que apresentam fortes amplitudes sísmicas, de forma a mitigar possíveis falhas de correlação entre os dados. Além disso, o sismograma sintético também passou por um controle de qualidade a partir da coluna de *cross-correlation* da janela de amarração. Essa coluna relaciona diretamente o sismograma sintético gerado com o dado sísmico da linha utilizada, e seu valor apresentado no cabeçalho representa a razão de similaridade entre o traço sísmico modelado e o dado sísmico real, indicando a qualidade da calibração, no qual quanto maior o valor, melhor o seu ajuste. No caso do poço 1-RJS-135-RJ, foi possível obter um valor de 0.79 (Figura 8), enquanto no poço 6-BRSA-952-RJ foi obtido um valor de 0.63, o que representa bons níveis de correlação.

Além do dado sísmico 3D, foi disponibilizado para essa monografia um modelo de velocidade referente à *survey* “R0235”, que seria utilizado para trazer maior exatidão no controle de qualidade da calibração sísmica-poço. Porém, devido a problemas na geometria do dado enviado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP/BDEP), não foi possível utilizá-lo nesse trabalho. Dessa forma, a metodologia de calibração sísmica-poço se deu somente a partir dos dados de *checkshot*, dos perfis sônico e densidade e da estimativa de *wavelet* sintética.

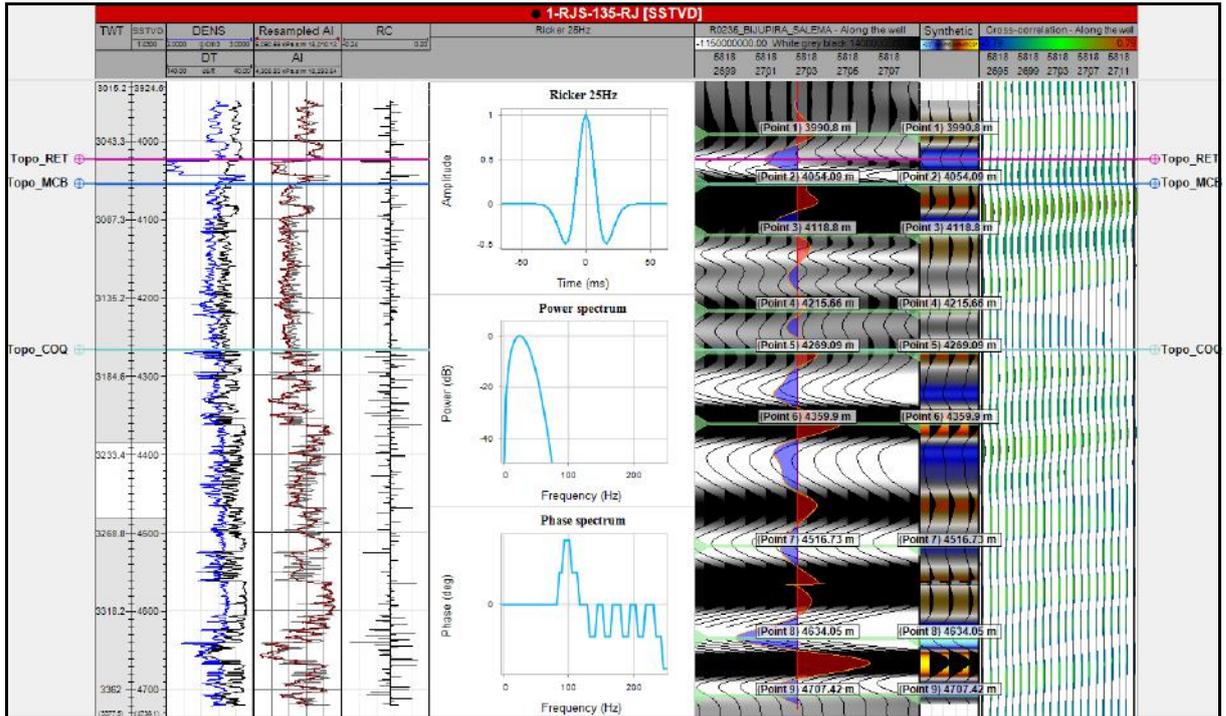


Figura 8 – Janela de calibração poço-sísmica do PETREL®, versão 2020.4, com os perfis geofísicos densidade (DENS) e sônico (DT) do poço 1-RJS-135-RJ utilizados no processo e a relação estabelecida entre os perfis com o dado sísmico 3D (sismograma sintético).

4.4 Interpretação sísmica

A interpretação sísmica dos sismo-horizontes foi feita de forma sistemática, com o “incremento” da malha de interpretação inicialmente configurado em espaçamentos de 128 linhas e posteriormente reduzido para 64, resultando, no total, em 27 linhas *dip* e 38 linhas *strike* mapeadas - o que configura um espaçamento final entre as seções de, aproximadamente, 780 metros -, além de algumas linhas arbitrárias geradas de modo a auxiliar no controle de qualidade da interpretação e geração de mapas, proporcionando outras perspectivas e visadas do dado sísmico. Além disso, a interpretação sísmica foi feita utilizando a convenção americana, cujos contrastes de impedância positivos, tomados como referência a superfície do fundo do mar, se dão por um pico de amplitude positiva.

Também foram mapeadas 36 falhas geológicas na área de estudo, de forma a auxiliar na interpretação dos sismo-horizontes, na definição de sismossequências e no entendimento das variações da influência tectônica ao longo do intervalo Pré-sal. A partir das falhas mapeadas ao longo do dado, foi gerado um mapa do plano de falhas e um diagrama em roseta – sendo o último apresentado no tópico das sismossequências, nos Resultados -, de modo a suportar as discussões a respeito da influência tectônica na sedimentação.

4.5 Atributos sísmicos

Por vezes, são encontradas dificuldades no que tange a identificação e diferenciação de sismofácies, contrastes de impedância e de interpretação de estruturas como falhas e truncamentos de refletores em um determinado dado sísmico. Com o objetivo de facilitar o processo de interpretação sísmica, são aplicados os chamados atributos sísmicos, parâmetros que permitem realçar, identificar e correlacionar eventos e estruturas geológicas a partir dos dados de um levantamento sísmico, 2D ou 3D (CHOPRA & MARFURT, 2007).

Outro objetivo da aplicação dos atributos sísmicos é a de quantificar a amplitude e características geomorfológicas identificadas em um dado sísmico por meio de uma série de cálculos determinísticos, de modo a encontrar padrões e caracterizá-los de forma mais eficiente (CHOPRA & MARFURT, 2007).

Taner *et al.* (1994) separam os atributos sísmicos em duas categorias: geométricos e físicos. A função dos atributos geométricos é a de aprimorar a visualização de características geométricas do dado sísmico, por meio do mergulho, azimute e continuidade. Já os atributos físicos se referem aos gerados a partir dos parâmetros físicos em subsuperfície, como a amplitude, fase e frequência.

Dentro desse contexto, no presente estudo, foram utilizados quatro atributos sísmicos: o *Structural Smoothing*, o Pseudo-Relevo, a Impedância Acústica Relativa e o *Sweetness*.

O *Structural Smoothing* é um atributo sísmico que reduz efetivamente ruídos no dado sísmico, elimina marcas de aquisição e aumenta os atributos de coerência e curvatura. É comumente utilizado para suavização de dados sísmicos ruidosos. Todas as seções sísmicas na fase normal e com atributos sísmicos aplicados nesse trabalho foram previamente tratadas com esse atributo, com o objetivo de filtrar os ruídos que passaram pelo processamento sísmico e facilitar a identificação dos refletores sísmicos e suas terminações, mas com o controle de qualidade adequado para não se perder a veracidade do dado sísmico inicial.

O Pseudo-Relevo, ou TecVA, é uma feição gerada a partir da convolução de uma sequência de atributos sísmicos, com o objetivo de ressaltar a imagem sísmica sob a forma de um “relevo tridimensional”, facilitando a identificação, principalmente, de estruturas como falhas geológicas e determinados pacotes sedimentares. Ela permite, a partir da análise do dado sísmico 3D, mostrar as variações laterais das sismofácies tanto na horizontal como na vertical, além de ressaltar feições estruturais da área de estudo (BULHÕES & DE AMORIM, 2005).

O atributo de Pseudo-Relevo inicialmente foi aplicado afim de auxiliar no reconhecimento das principais falhas e realizar a diferenciação das sismofácies referentes ao objeto de estudo, assim como o intervalo Pré-sal do embasamento acústico e da Formação Retiro, de forma a individualizar o intervalo de estudo em sua base e topo. Dessa forma, foi possível descrever três padrões sísmicos distintos (Figura 9):

A Formação Retiro (lilás), que apresenta uma boa definição nos limites de topo e base, assim como um intervalo prevalecendo um padrão *reflection-free* ou, por vezes, caótico, associado às estruturas de sal, comumente associado a pouco ou

nenhum contraste litológico interno da unidade, referente a provável ocorrência de um único tipo de sal, como por exemplo a halita.

O intervalo Pré-sal, composto por camadas de rochas siliciclásticas e carbonáticas (azul), influenciadas por altos e baixos estruturais, exibindo padrões geométricos variados, de paralelos à contorcidos. Uma feição relevante identificada na base desse intervalo é o padrão divergente e de truncamento erosional de alguns refletores contra o alto estrutural do embasamento, assim como alguns níveis estratigráficos com altos valores de amplitude sísmica, na base do poço perfurado, com o “relevo” ressaltado pelo atributo sísmico.

O intervalo do embasamento acústico (vermelho), relacionado aos refletores sísmicos correspondentes às rochas magmáticas (Formação Cabiúnas) e o embasamento cristalino, não diferenciados. Os padrões sísmicos observados variam de reflexões de fracas a fortes amplitudes, variando de refletores caóticos à *reflection-free*.

O atributo sísmico Impedância Acústica Relativa se resume como a aproximação do componente de maior frequência do traço sísmico, ampliando as frequências do dado através da inversão de picos e calhas e, assim, realçando estruturas (CHOPRA & MARFURT, 2007). Esse atributo foi utilizado neste trabalho com o objetivo de destacar texturas sísmicas nas sismofácies, a continuidade dos refletores e os limites sedimentares das subunidades caracterizadas, de forma a auxiliar em sua descrição e diferenciação (Figura 10).

O *Sweetness* é um atributo sísmico gerado a partir da razão da amplitude instantânea sísmica com a raiz quadrada da frequência instantânea. Esse atributo tende a evidenciar pacotes que possuem altos valores de amplitude e baixos valores de frequência, sendo um comum indicativo de grandes acumulações de hidrocarbonetos (também chamados de *sweet spots*) (BARNES, 2016). A partir desse atributo foi possível diferenciar os pacotes sedimentares do intervalo Pré-sal que possuem altos valores de amplitude e baixos valores de frequência do sinal sísmico, resultando em altos valores do atributo, dos pacotes que possuem baixos valores de amplitude e altos valores de frequência sísmica que, por sua vez, apresentaram baixos valores do atributo (Figura 10). Além disso, esse atributo também foi utilizado preliminarmente à interpretação do embasamento acústico, de forma a auxiliar na diferenciação do mesmo aos pacotes sedimentares subjacentes.

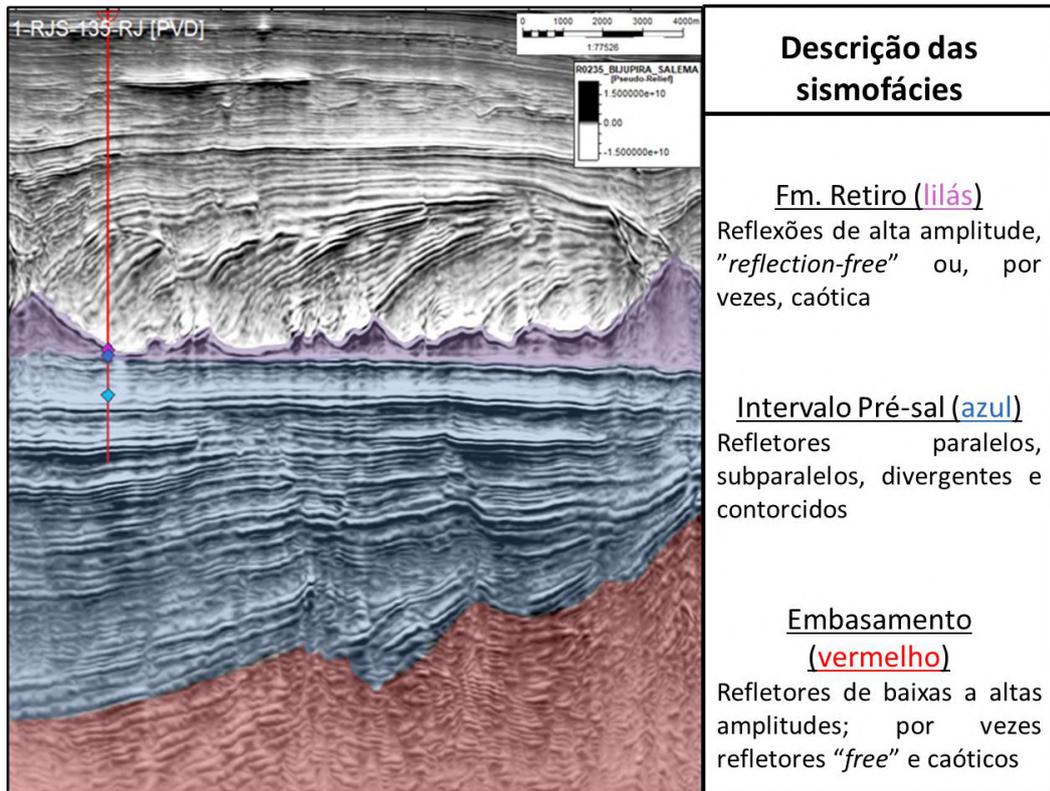


Figura 9 – Recorte da seção sísmica *Dip 5819* com o atributo de Pseudo-Relevo aplicado, diferenciando os três intervalos principais de estudo (Fm. Retiro, Intervalo Pré-sal e embasamento acústico) e suas respectivas características de sismofácies.

4.6 Sismo-horizontes

De forma a delimitar os intervalos de base e topo do intervalo Pré-sal, com o auxílio do atributo sísmico TecVA ou Pseudo-Relevo, definiu-se como o limite inferior o sismo-horizonte referente ao “embasamento acústico”, definido, por sua vez, como a interface não diferenciada entre embasamento cristalino ou econômico (Formação Cabiúnas), tendo em vista a complexidade na diferenciação sísmica entre ambas as unidades. Enquanto isso, o limite superior do intervalo se deu pelo topo da Formação Macabu ou base da Formação Retiro, denominada também como “base do sal”, referente ao sismo-horizonte de fácil interpretação da base dos sedimentos evaporíticos aptianos que limitam a sedimentação das demais unidades do Pré-sal na região de estudo.

A posteriori, a respeito do intervalo mapeado sem dados litológicos e bioestratigráficos - entre o topo da Formação Coqueiros e o embasamento -, sua interpretação sísmica foi baseada nos conceitos de sismossequências e apresentados nos trabalhos de Vail *et al.* (1977b) e Mitchum *et al.* (1977a), avaliando-se características dos refletores como altas amplitudes, terminações de refletores, variações nos padrões de sismofácies e, sobretudo, na abrangência lateral dos refletores extensa e rastreável por toda área de estudo.

Outro fator que auxiliou a interpretação sísmica do intervalo não perfilado foi a descrição das unidades litoestratigráficas na bibliografia, uma vez que as descrições dos intervalos e seções interpretadas serviram para dar suporte ao entendimento geológico da seção e, conseqüentemente, às nomenclaturas atribuídas aos sismo-horizontes.

Foi também mapeado o topo da Formação Retiro ou “topo do sal”, de modo a realizar futuros estudos acerca dos corpos de sal e suas possíveis relações com os planos de falha do Pré-sal e com o embasamento. Como o foco de estudo do presente trabalho não compreende a Formação Retiro, esse sismo-horizonte e seus produtos serão abordados como um dos próximos passos para o trabalho, sob um caráter complementar.

4.7 Sismofácies

Em paralelo ao mapeamento e identificação dos principais sismo-horizontes na área de estudo, foi realizada a identificação e classificação das sismofácies, compostas por um conjunto de reflexões sísmicas cujos parâmetros físicos as individualizam dos demais refletores subjacentes e sobrejacentes.

Dessa forma, foram identificadas seis sismofácies distintas no intervalo Pré-sal, denominadas Sismofácies A à F, ocorrendo vertical e espacialmente ao longo de toda área de estudo.

Ao contrário dos sismo-horizontes, essas sismofácies foram interpretadas apenas em algumas seções sísmicas, de forma que sua abrangência lateral não foi avaliada. Determina-se, como próximos passos, a realização dessa etapa, de modo a gerar mapas de contorno para cada sismofácies e a geração de *geobodies* para cada unidade.

4.8 Sismossequências

A partir do mapeamento dos principais sismo-horizontes e sismofácies na área de estudo, foram definidas as cinco sismossequências da área de estudo. As sismossequências foram definidas como um grupo ou pacote de refletores sísmicos que estão geneticamente relacionados e são limitados, em seu topo e base, por superfícies discordantes (MITCHUM *et al.* 1977a). Essas superfícies limitantes foram definidas, no presente trabalho, como os sismo-horizontes mapeados e os pacotes de refletores sísmicos geneticamente relacionados foram definidos como as sismofácies interpretadas.

4.9 Mapas de contorno e isópacas

Posteriormente, uma vez feita a definição das sismossequências, foram gerados mapas de contorno estrutural e isópacas para cada sequência mapeada. Esses mapas foram gerados no intuito de auxiliar na interpretação do paleorelevo das sismossequências, visando compreender a evolução espaço-temporal dos depocentros ao longo do intervalo Pré-sal, assim como estimar os principais fatores de criação de espaço de acomodação, como, por exemplo, a influência do embasamento e dos planos de falhas.

4.10 Fatores condicionantes

Baseando-se nos resultados obtidos a partir da interpretação sísmica, foram feitas, em paralelo, duas etapas: a caracterização de sismofácies, baseada na descrição e interpretação geológica dos parâmetros de reflexão sísmica, de modo a buscar compreender a deposição e erosão das unidades em questão; e a caracterização de sismossequências, baseada na interpretação sísmica do intervalo, assim como a avaliação de parâmetros morfológicos (como variações de espessura e de paleorelevo), de modo a buscar avaliar a evolução estratigráfica de cada sequência.

Também foi realizada, de forma concomitante, a comparação dos sismo-horizontes interpretados com os dados litológicos e geofísicos dos poços, de modo que os padrões observados nos perfis pudessem ser correlacionados às superfícies-chave no dado sísmico. Dessa forma, foi definida a nomenclatura do sismo-horizonte IV como “topo da Formação Coqueiros”, assim como reforçada a nomenclatura de “topo da Formação Macabu” ao sismo-horizonte do topo do Pré-sal, uma vez que essas interfaces sísmicas foram perfuradas pelos poços e calibradas com marcadores litológicos e perfis geofísicos.

Uma vez feita a avaliação e caracterização descritas acima, foi possível interpretar e discutir possíveis fatores condicionantes do preenchimento estratigráfico do intervalo Pré-sal, abordando relações entre diferentes sismofácies, a influência tectônica na sedimentação e a possível evolução estratigráfica do intervalo.

5 RESULTADOS

5.1 Sismo-horizontes

A partir da interpretação sísmica, foram definidos seis sismo-horizontes (Figura 11):

- Topo do embasamento acústico
- Sismo-horizonte I
- Sismo-horizonte II
- Sismo-horizonte III
- Sismo-horizonte IV
- Topo da Formação Macabu

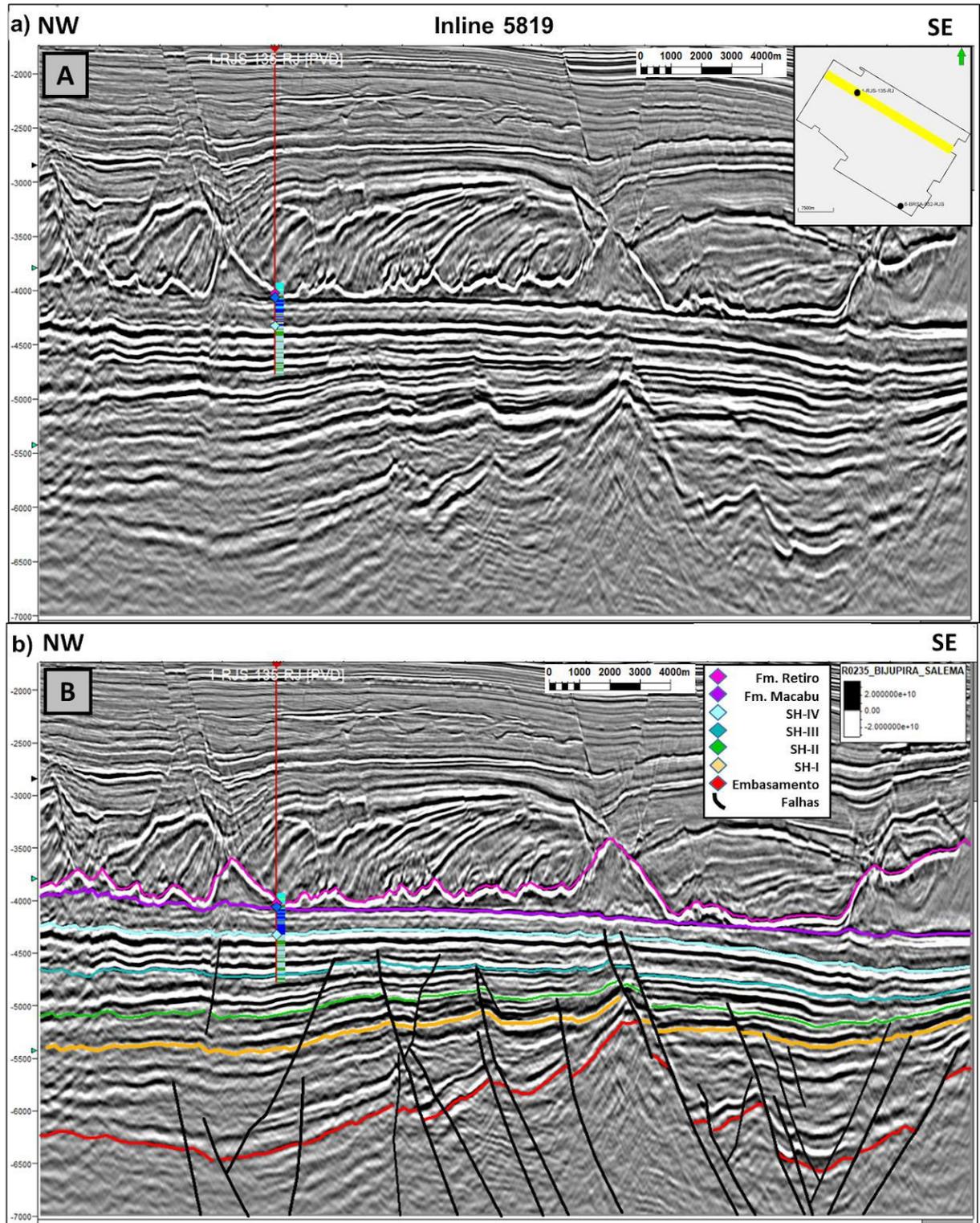


Figura 11 – (a) Seção sísmica *dip* 5819 sem interpretação; (b) Seção sísmica *dip* 5819 interpretada, mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas no intervalo de estudo. Notar a falha principal da área de estudo em rejeito e tamanho, falhando o embasamento até a Formação Macabu, associada ao alto estrutural central; os refletores divergentes abaixo do sismo-horizonte I, com direção a noroeste; o forte contraste de impedância positivo (preto) do topo da Formação Macabu.

Embasamento acústico

O sismo-horizonte mais basal interpretado no intervalo de estudo é o embasamento acústico (vermelho), referente ao embasamento cristalino e possivelmente rochas magmáticas pertencentes à Formação Cabiúnas (Figura 11). Essa superfície não foi atingida por nenhum poço na área de estudo, tendo sua interpretação baseada apenas nos seus parâmetros sísmicos, representada por um refletor de amplitude positiva (preto) que contrasta o intervalo Pré-sal da sismofácies do embasamento que, por sua vez, apresenta ora uma configuração interna caótica, ora *reflection-free*, com baixa continuidade lateral. Além disso, também foram utilizados os atributos sísmicos TecVA e *Sweetness*, de forma a auxiliar na diferenciação do embasamento do intervalo sedimentar.

As terminações de refletores acima desse horizonte tendem a ocorrer de forma concordante, seguindo a geometria do sismo-horizonte, ou terminando em *onlap* contra o mesmo.

Sismo-horizonte I

O horizonte sísmico mais basal na sucessão sedimentar do intervalo de estudo é o sismo-horizonte I, definido como um refletor de altas amplitudes negativas (branco). Alguns refletores sísmicos apresentam terminações em *toplap* contra esse horizonte em algumas porções centrais da área, próximas ao alto estrutural principal do embasamento (Figura 12).

O horizonte pode ser rastreado por toda a área de estudo com um padrão conforme (Figura 11 e Figura 12). Em alguns pontos na porção mais a noroeste, seu rastreamento fica mais desafiador devido à resolução do sinal sísmico, apresentando artefatos sísmicos em algumas áreas, como abordado no Capítulo 4.2 (Figura 8).

Sismo-horizonte II

Esse horizonte sísmico é representado por um refletor de amplitudes negativas e de fácil rastreamento nas porções sudeste e central da área de estudo, de forma similar ao sismo-horizonte I (Figura 11). Os refletores acima desse horizonte apresentam terminações de *downlap* na região central da área, ao passo que alguns refletores subjacentes terminam em *toplap* contra esse horizonte (Figura 12).

Na região do baixo estrutural a sudeste (Figura 11), foram reconhecidas terminações em *downlap* contra o horizonte, enquanto na região do alto estrutural os refletores abaixo desse horizonte truncam em *toplap*, na qual o refletor foi interpretado como um limite de sismossequências.

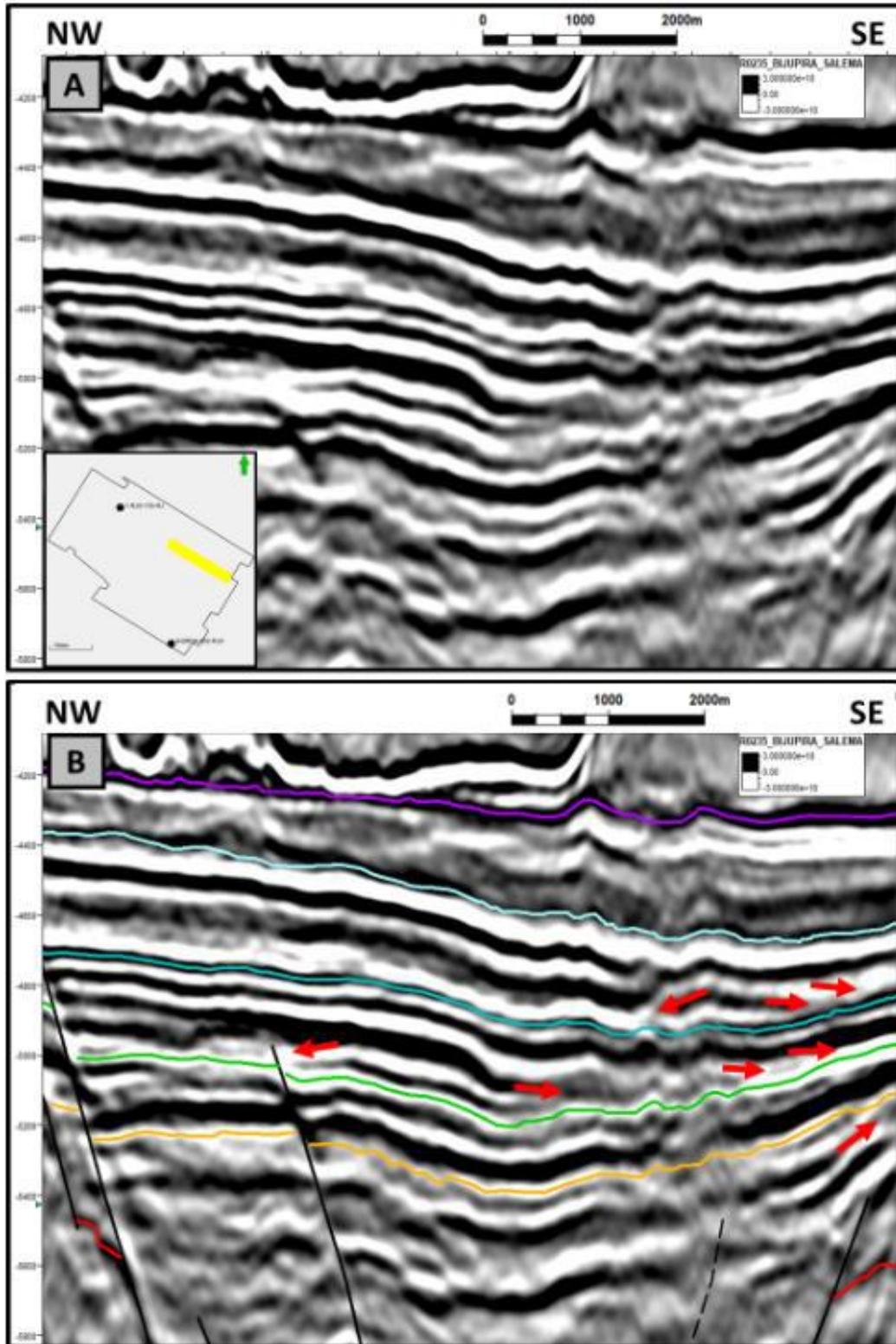


Figura 12 – (a) Recorte da seção sísmica *dip* 5819 sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica *dip* 5819, mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas no intervalo de estudo. Ênfase nas setas em vermelho, apontando as terminações de refletores interpretadas: *toplap* contra o sismo-horizonte I e *downlaps* contra os sismo-horizontes II e III.

Sismo-horizonte III

O sismo-horizonte III foi interpretado como um refletor de sinal positivo (preto), com amplitudes médias a fortes e de fácil rastreamento ao longo da área de estudo (Figura 11). Na região do baixo estrutural a sudeste, identificam-se terminações em *downlap* dos refletores subjacentes contra esse sismo-horizonte em direção às maiores profundidades (Figura 12).

Esse sismo-horizonte representa o intervalo mais profundo perfurado pelo poço 1-RJS-135-RJ (Figura 11). O intervalo perfilado correspondente à profundidade do sismo-horizonte III foi descrito, de acordo com o perfil composto do poço, como pacotes de folhelhos, corroborando com o resultado esperado baseado nos dados geofísicos dos poços (altos valores de raios gama) e inferido a partir da sísmica.

Sismo-horizonte IV

O sismo-horizonte IV foi interpretado como um refletor de sinal positivo de fortes amplitudes, contrastando as diferentes impedâncias acústicas das litologias da Formação Coqueiros com a Formação Macabu, corroborado pelos perfis geofísicos (Figura 11).

Esse horizonte é facilmente rastreável por quase toda a área de estudo, ocorrendo de forma concordante com os refletores sísmicos acima e abaixo, com exceção de alguns pontos da porção sul da área, onde o mesmo ocorre sob a forma de superfície de discordância erosiva, com alguns refletores abaixo desse horizonte sob a forma de discordâncias erosionais e refletores acima terminando em *onlaps* (Figura 13).

Topo da Formação Macabu

O sismo-horizonte V, denominado como topo da Formação Macabu por ser o refletor referente à base do sal, foi o primeiro a ser interpretado por sua fácil identificação, uma vez que é bem definido em toda a área de estudo por fortes amplitudes positivas, originadas pelo alto contraste de impedância acústica entre os evaporitos da Formação Retiro e os carbonatos da Formação Macabu (Figura 11).

As terminações de refletores contra esse horizonte, quando presentes, se dão na forma de discordâncias erosionais. E sismo-horizonte apresenta pequenas variações de profundidade ao longo de sua extensão, salvo algumas exceções em pontos específicos, onde os evaporitos da Formação Retiro apresentam pouca ou nenhuma espessura. Nesses pontos, o refletor sísmico chega a sofrer inversão de polaridade do sinal, podendo apresentar amplitudes negativas devido ao contato com os carbonatos do Albiano sobrejacentes (Figura 13).

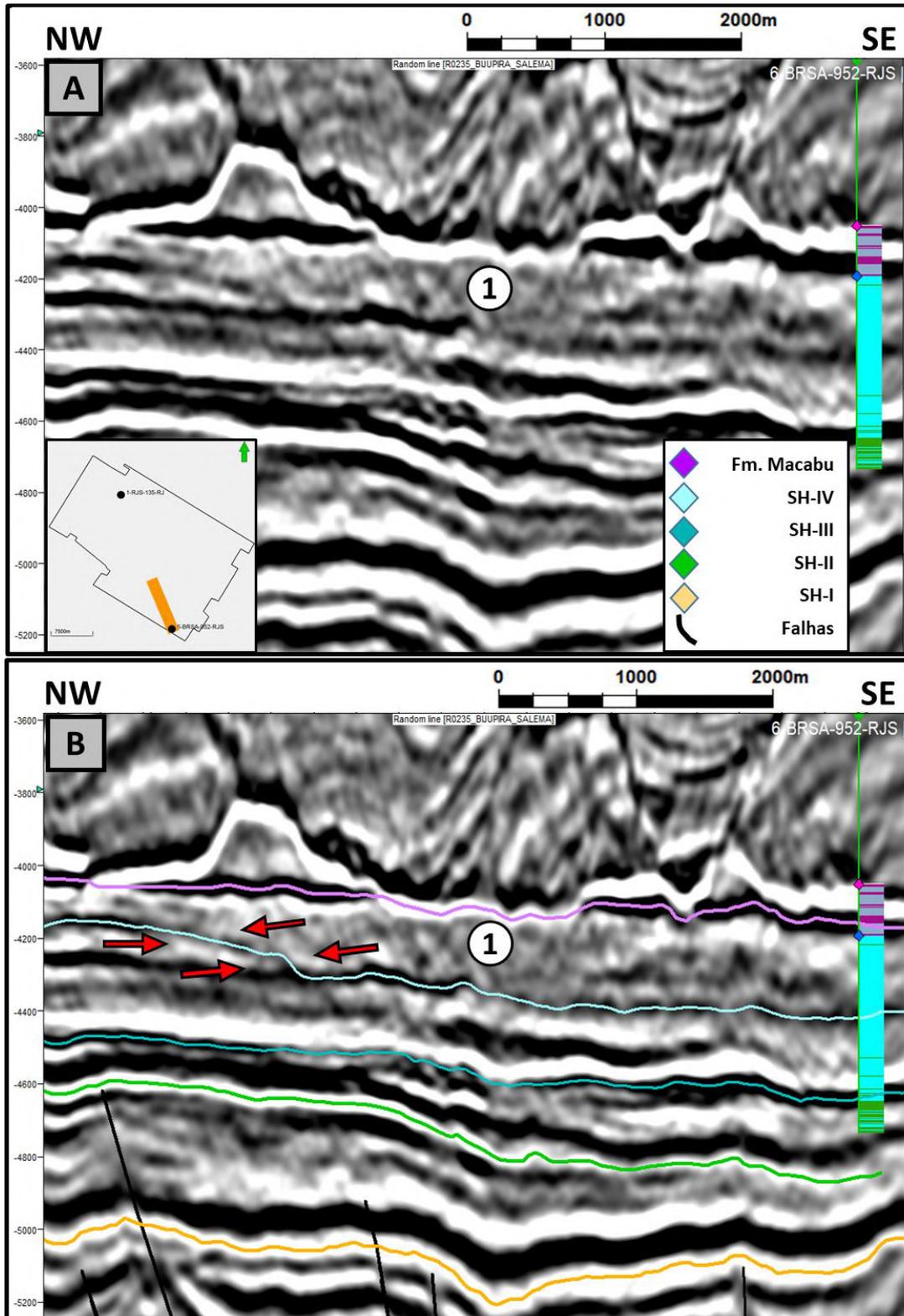


Figura 13 – (a) Recorte da seção sísmica Arbitrária 1 sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica Arbitrária 1, mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas no intervalo de estudo. Ênfase no número 1, apontando o topo da Formação Macabu (lilás) que sofreu inversão de polaridade e nas setas em vermelho, apresentando truncamentos contra o sismo-horizonte IV.

5.2 Sismofácies

Sismofácies A

A Sismofácies A ocorre exclusivamente na sismossequência 5 e é composta por refletores sísmicos que apresentam um padrão geométrico ondulado a subparalelo, com boa continuidade lateral e com a sua principal característica individualizante sendo as médias a baixas amplitudes e frequência dos refletores sísmicos (Tabela 1).

Essa unidade não apresenta configurações relevantes originadas a partir de falhas geológicas, com exceção à geometria ondulada dos refletores identificada na região central da área de estudo, onde a falha de maior magnitude - nesse trabalho, denominada de “falha principal” - deforma todo o intervalo Pré-sal, conforme observado na Figura 11. Especificamente na região do baixo estrutural sudeste, podem ser identificadas estruturas cônicas em alguns refletores sísmicos, chegando a espessuras de até 80 metros (Figura 14).

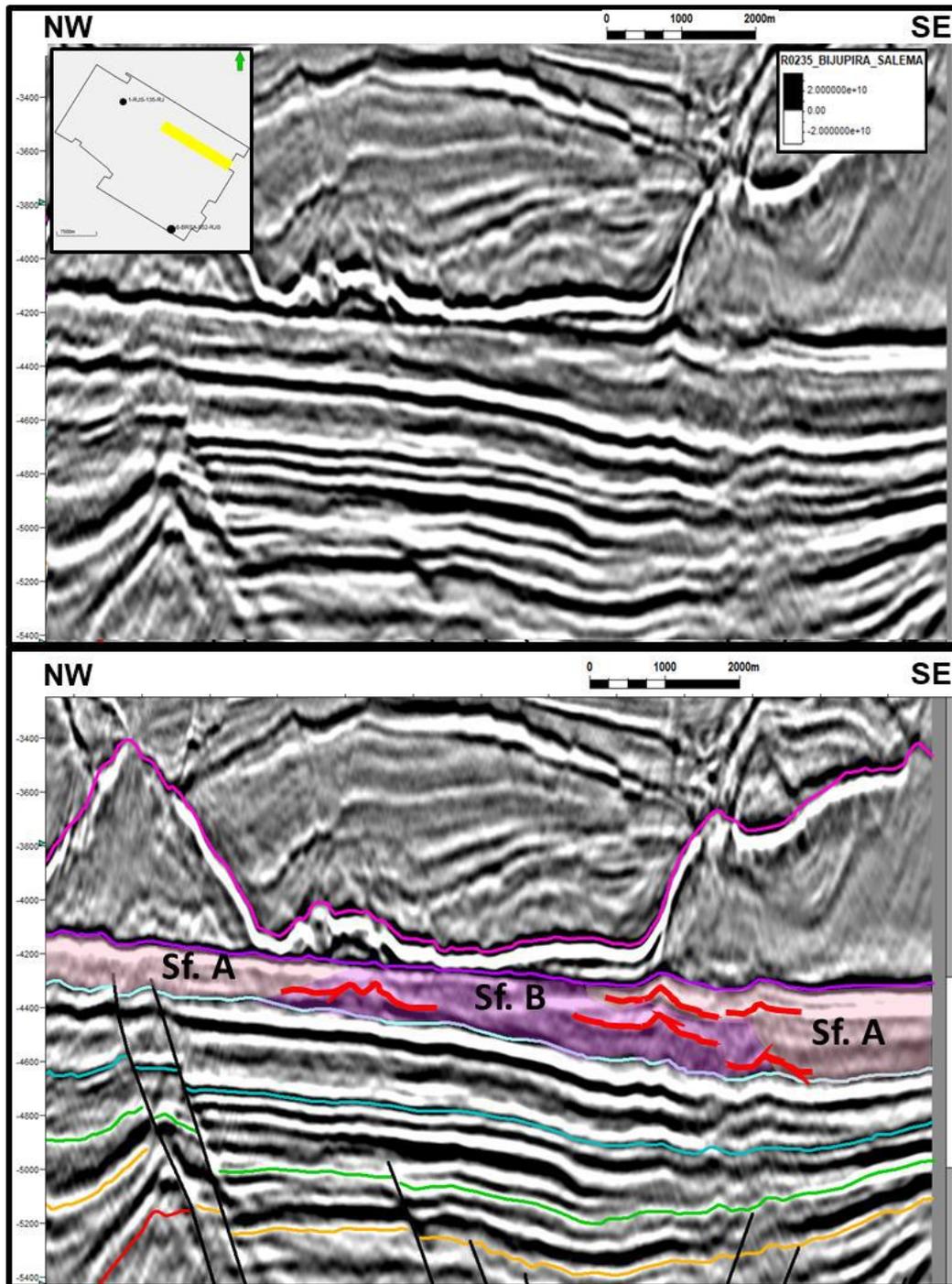


Figura 14 – (a) Recorte da seção sísmica *dip* 5819, sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica *dip* 5819 mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas. Ênfase nos refletores sísmicos pertencentes às Sismofácies A e B apresentando morfologias de pináculos (vermelho).

Sismofácies B

A Sismofácies B ocorre exclusivamente no intervalo da Formação Macabu, predominantemente na porção sudeste da área de estudo e intercalada com a Sismofácies A. Essa fácies apresenta amplitudes moderadas a baixas, baixa frequência de sinal, um padrão descontínuo a semi-contínuo e com configurações de reflexão contorcidas a sigmoidais (Tabela 1). Essa sismofácies também pode ocorrer em algumas porções a noroeste do poço 6-BRSA-952-RJS, interdigitada com a Sismofácies A à medida que se aumenta a profundidade do intervalo.

Por vezes, quando o gradiente paleotopográfico do topo da Formação Coqueiros se encontra mais acentuado, essa fácies apresenta clinofórmias sigmoidais e/ou onduladas sobre a discordância, com terminações de refletores internos *downlap* ou *toplap* (Figura 15). E, assim como na Sismofácies A, também podem ser identificados na região do baixo estrutural sudeste refletores com geometrias semelhantes a pináculos, concentrados mais na Sismofácies B (Figura 14).

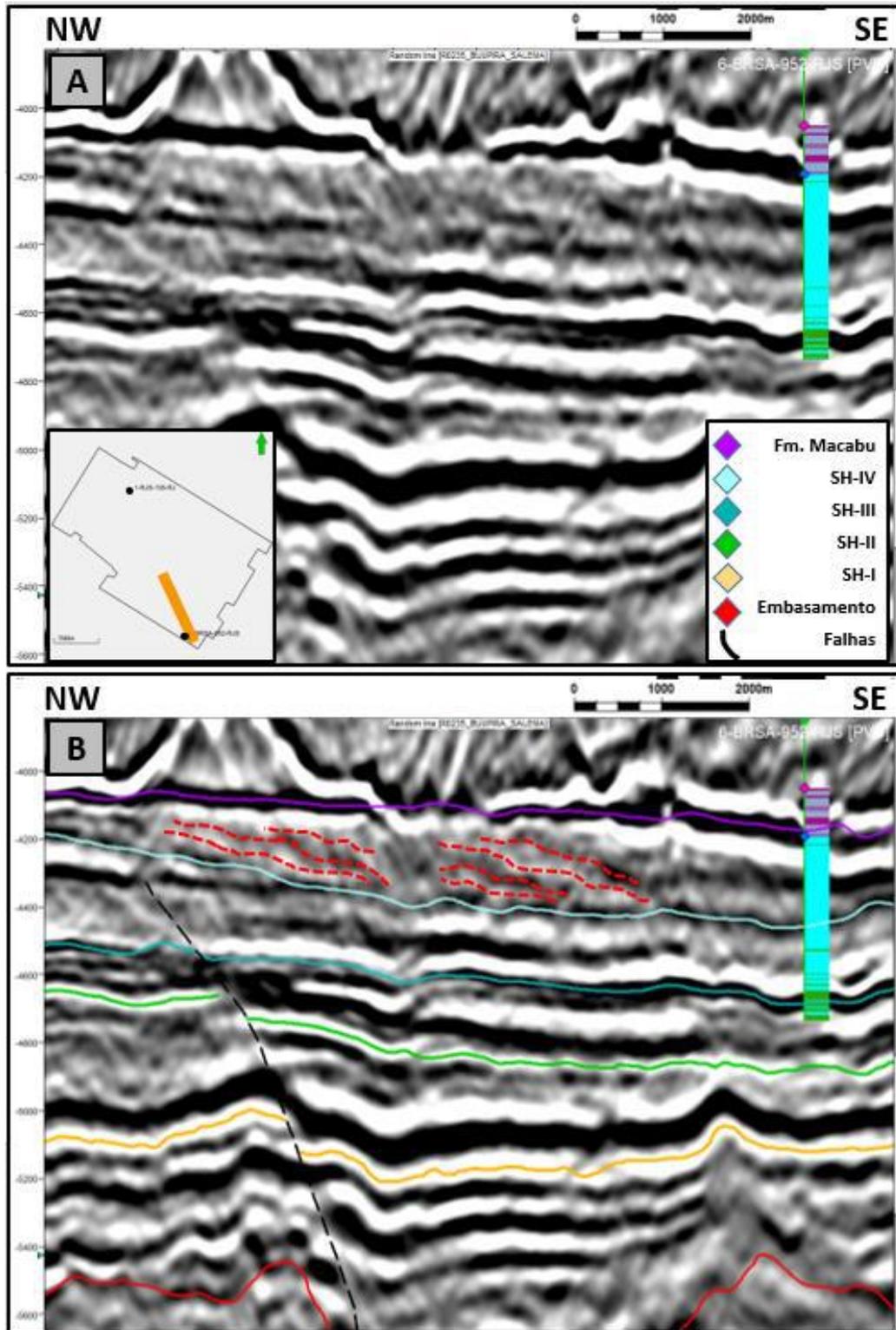


Figura 15 – (a) Recorte da seção sísmica Arbitrária 1, sem interpretação; (b) Recorte da seção sísmica Arbitrária 1 mostrando os horizontes sísmicos e falhas geológicas interpretadas. Ênfase nos refletores sísmicos pertencentes à Sismofácies B apresentando clinofomas (tracejado vermelho).

Sismofácies C

A Sismofácies C, por sua vez, ocorre sobretudo nas sismossequências 2, 3 e 4, e apresenta refletores sísmicos predominantemente paralelos a subparalelos, além de apresentarem altos valores de amplitude positiva e negativa (notável principalmente nos intervalos superiores da Formação Coqueiros) e uma ótima continuidade lateral (Tabela 1). Além disso, os refletores dessa sismofácies na porção sudeste do volume sísmico, por vezes, terminam em *onlap* contra superfícies discordantes (Figura 17) e podem apresentar feições de preenchimento prográdantes, assim como na porção noroeste, onde refletores na sismossequência 3 terminam em *onlap* contra o sismo-horizonte II em direção ao alto central, visível na Figura 16.

Quando os refletores dessa sismofácies estão associados a bordas de falha ou altos estruturais, apresentam um padrão geométrico de refletores divergente, encontrado sobretudo nas porções sedimentares mais basais na porção noroeste, com terminações em *toplap* contra os sismo-horizontes I e II (Figura 16).

Com a aplicação do atributo de Impedância Acústica Relativa, notou-se uma melhora na resolução vertical do dado e uma consequente facilidade na identificação das sismofácies, a partir do aumento da frequência do dado sísmico e da continuidade dos refletores sísmicos (Figura 17). A diferença da Sismofácies C dos demais horizontes foi destacada principalmente para as Sismofácies D e E, que ocorrem lateralmente à essa.

Essa sismofácies se difere da Sismofácies A principalmente por seus altos valores de amplitude no sinal sísmico.

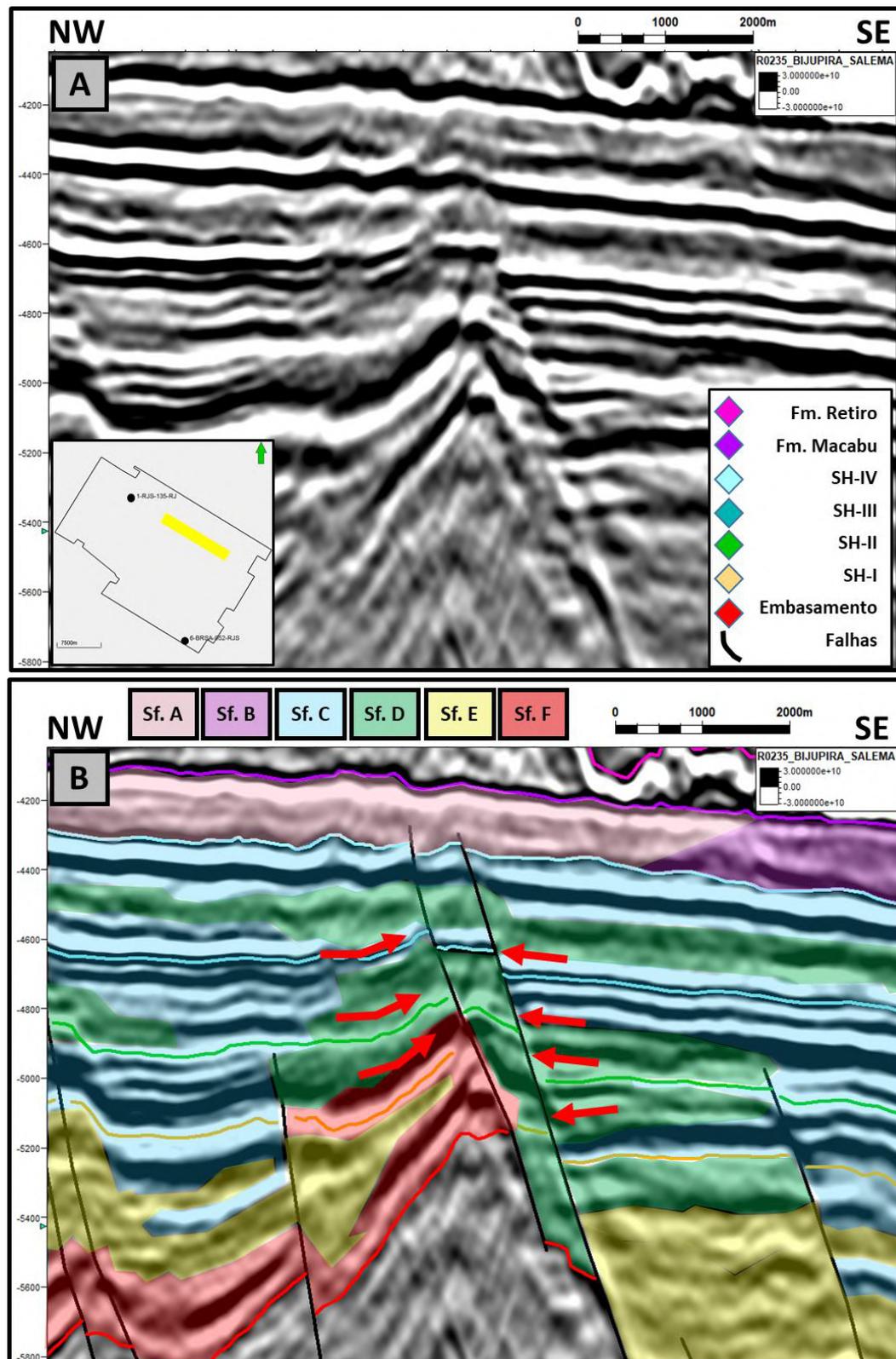


Figura 16 – (a) Seção sísmica *dip* 5819 sem interpretação; (b) Seção sísmica *dip* 5819 interpretada, mostrando os sismo-horizontes, sismofácies e falhas geológicas interpretadas. Ênfase nas setas em vermelho representando terminações de refletor: à noroeste, terminações em *onlap*, *toplap* e terminações em *pinch-out* contra o alto estrutural local e, à sudeste, uma discordância angular abrupta contra o plano de falha.

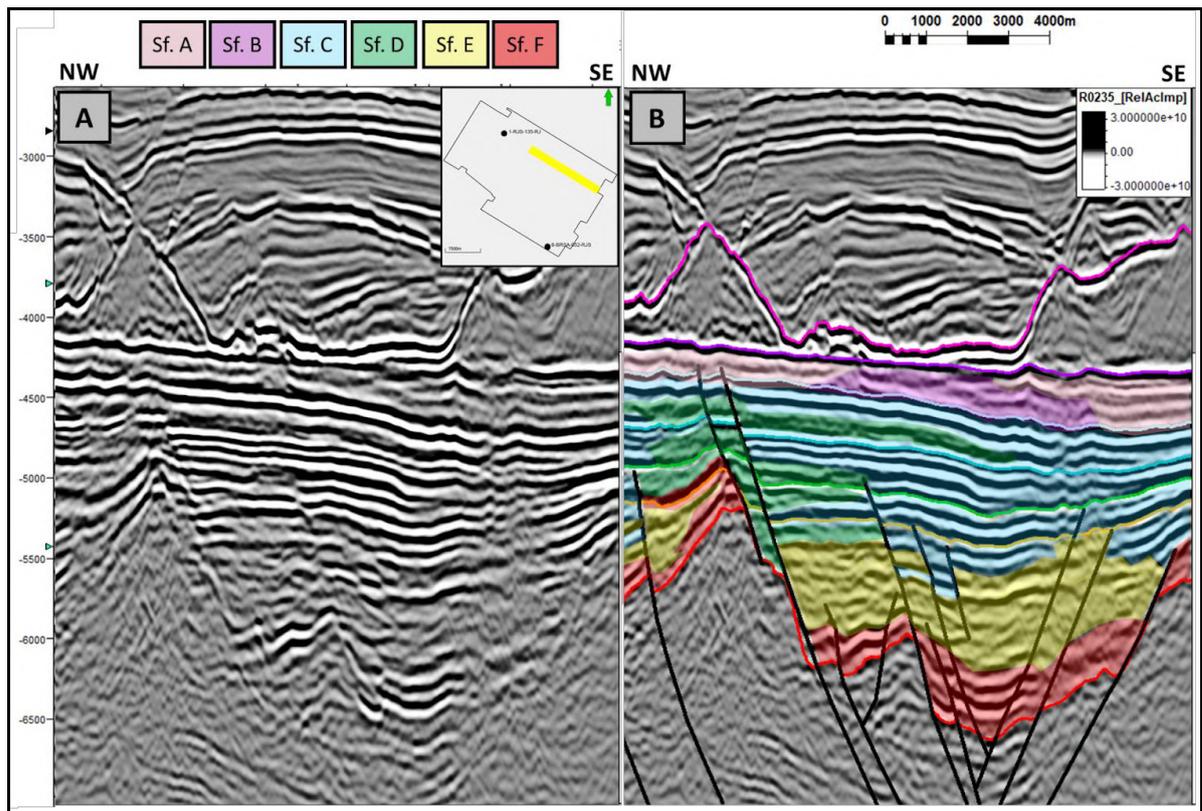


Figura 17 – (a) Seção sísmica *dip* 5819 com o atributo de Impedância Acústica Relativa aplicado, sem interpretação; (b) Seção sísmica *dip* 5819 com o atributo de Impedância Acústica Relativa aplicado, mostrando os horizontes sísmicos, falhas geológicas e sismofácies interpretadas no intervalo de estudo. Notar a resolução vertical dos refletores aumentada, devido ao aumento da frequência do dado sísmico, notável sobretudo na Sismofácies C (azul).

Sismofácies D

A Sismofácies D ocorre nas sismossequências 1, 2, 3 e 4 e apresenta características como amplitudes baixas a moderadas, baixas frequências, continuidade dos refletores descontínua a semi-contínua, geometria externa de cunha ou lobada e configuração de refletores variando de caótica a contorcida (Figura 20). Essa fácies ocorre predominantemente nas sismossequências 2, 3 e 4, frequentemente justaposta a planos de falhas e de forma interdigitada com a Sismofácies C, truncando contra a mesma. Ela também ocorre na porção sul da área de estudo, associada aos altos paleotopográficos, variando para a Sismofácies C à medida que os refletores atingem maiores profundidades (Figura 18).

Outro fator descritivo da Sismofácies D se dá pela resposta sísmica que essa unidade apresenta ao aplicar-se o atributo *Sweetness*. A partir deste, foi possível diferenciar os pacotes sedimentares do intervalo Pré-sal que possuem altos valores de amplitude e baixos valores de frequência do sinal sísmico (apresentando altos valores do atributo em si) dos pacotes que possuem baixos valores de amplitude e altos valores de frequência sísmica (apresentando, por sua vez, baixos valores do atributo). A partir da Figura 19, nota-se que quase toda a Sismofácies D apresenta

baixos valores de frequência, interpretando, assim, essa característica como um diagnóstico dessa unidade.

As principais diferenças dessa sismofácies para a Sismofácies A são a descontinuidade lateral dos refletores sísmicos e arranjos internos desordenados, e para a Sismofácies B é a associação espacial com os planos de falhas, a geometria caótica a contorcida e a ausência da ocorrência na forma de geometrias progredientes e sigmoidais.

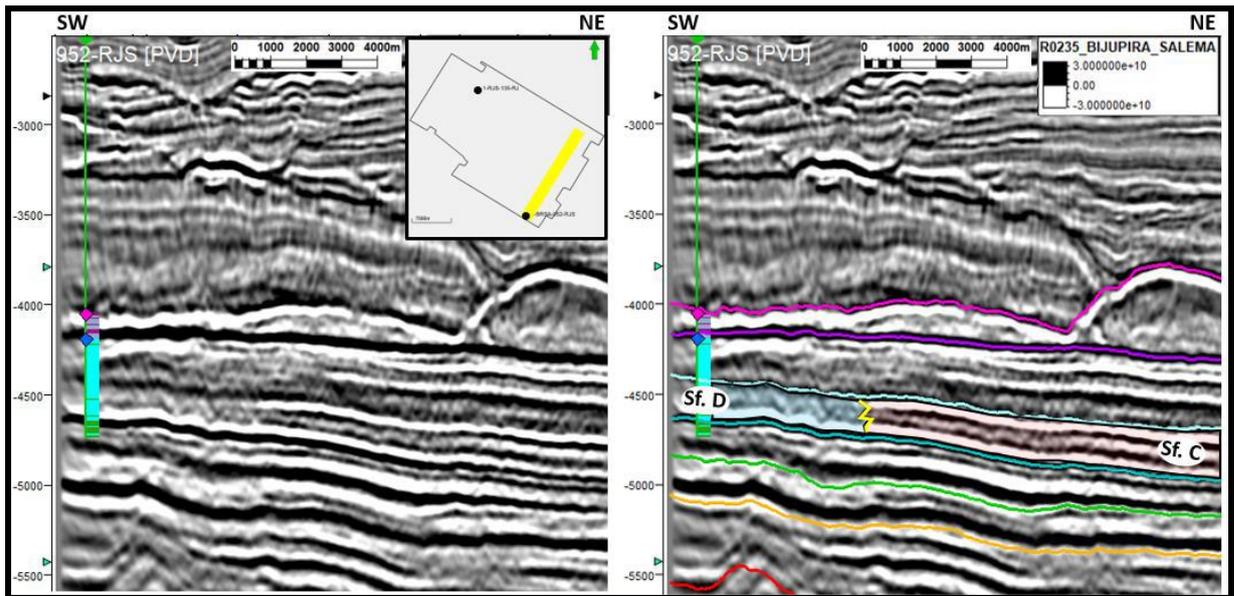


Figura 18 – Recorte da seção strike 4302 sem interpretação (à esquerda) e com interpretação (à direita), representando a variação da Sismofácies D (azul) no topo topográfico para a C (vermelha) sentido nordeste na sismossequência 4, ocorrendo de forma interdigitada.

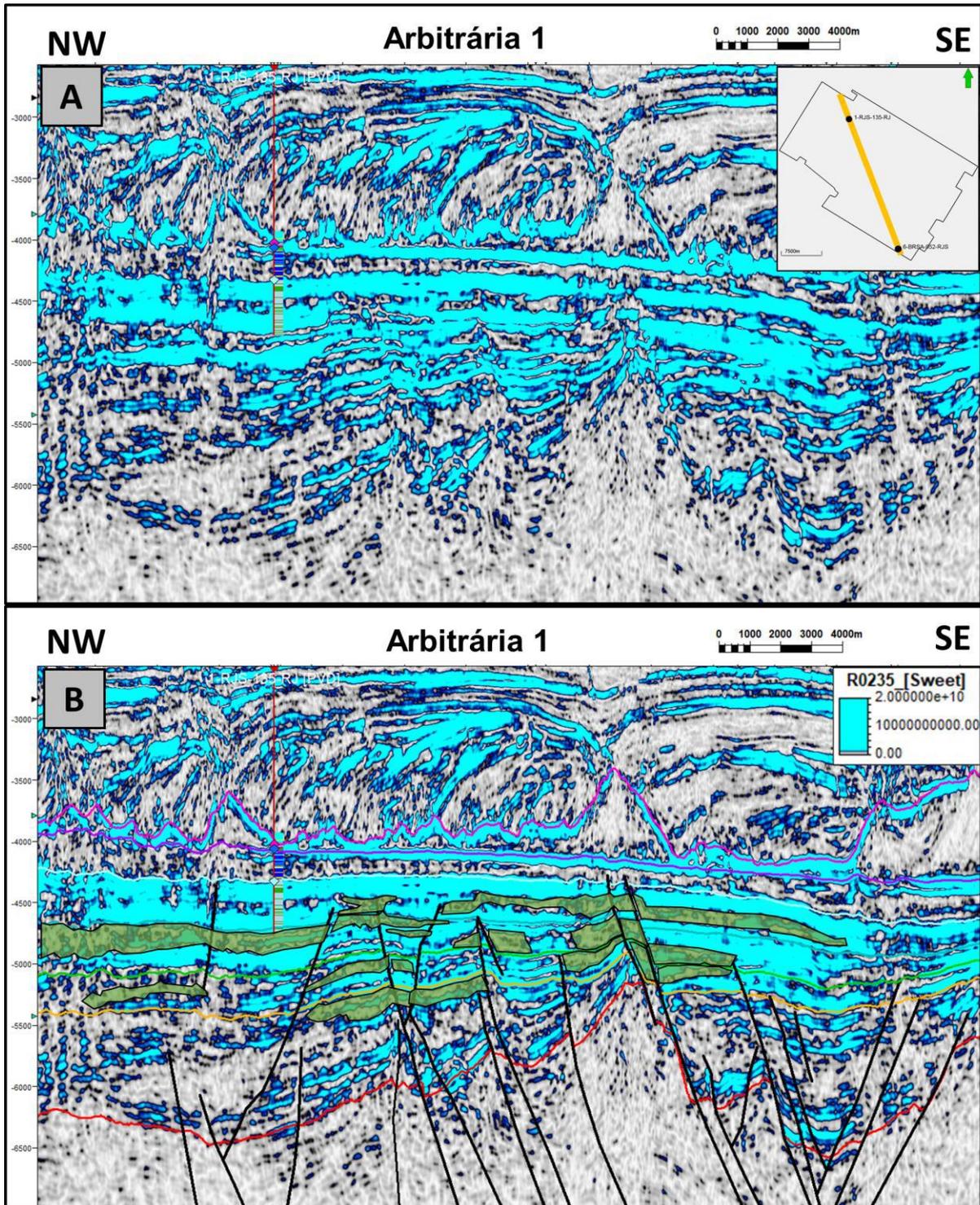


Figura 19 – (a) Seção sísmica *dip 5819* com o atributo *Sweetness* aplicado, sem interpretação; (b) Seção sísmica *dip 5819* interpretada com o atributo *Sweetness* aplicado, com ênfase na Sismofácies D interpretada na seção (verde), representando em quase toda a sismofácies baixos valores do atributo aplicado, devido aos baixos valores de frequência característicos dessa sismofácies, e no horizonte do embasamento acústico (vermelho), delimitando bem o início do empilhamento sedimentar.

Sismofácies E

Essa sismofácies é encontrada na porção basal do intervalo Pré-sal, na sismossequência 2 e principalmente na sismossequência 1, sobrepondo diretamente a Sismofácies F e em algumas porções superiores, contínua, com espessuras médias de 400 metros, sempre em geometria de cunha, limitada por dois refletores de sinal negativo e por vezes associadas a planos de falha (Figura 20).

A Sismofácies E apresenta uma geometria interna mal definida e descontínua, com continuidade lateral descontínua a semi-contínua, padrão de reflexão divergente e geometria externa predominantemente assimétrica, acunhando sempre no sentido contrário aos altos estruturais, com baixas amplitudes sísmicas, baixa frequência de sinal e de um padrão de sismofácies definido como contorcido ou lenticular (Figura 20).

A partir do atributo de Impedância Acústica Relativa, as terminações dos refletores contra essa sismofácies ficaram mais evidentes, assim como a geometria contorcida dos refletores (Figura 17). Em alguns pontos abaixo do sismo-horizonte I, a Sismofácies E varia seu padrão de configuração entre contorcido a caótico e, por vezes, é possível notar que este arranjo passava de subparalelo a ondulado, disposto sobre os blocos basculados do embasamento e seguindo essa superfície preferencialmente.

As principais diferenças dessa sismofácies para a Sismofácies A são a descontinuidade lateral dos refletores sísmicos e arranjos internos desordenados.

Sismofácies F

A Sismofácies F ocorre apenas na base da sismossequência 1, logo acima do embasamento por toda a área de estudo (Figura 17). Ela apresenta uma assinatura sísmica com altas amplitudes positivas e ótima continuidade lateral, paralela à geometria do embasamento acústico, apesar de frequentemente limitada por falhas.

Essa unidade é facilmente diferenciada da Sismofácies E pela diferença de amplitudes e frequência do sinal sísmico apresentado em cada uma e, principalmente, da diferença de continuidade lateral e terminações dos refletores sísmicos (Figura 17).

Sismo-fácies	Exemplo sísmico (escala = 200m)	Interpretação em desenho	Características sísmicas	Ocorrência
Sf. A			<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudes médias a baixas - Frequência média a alta - Contínua 	Sismossequência 5
Sf. B			<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudes médias a baixas - Frequência média - Descontínua a semi-contínua 	Sismossequência 5
Sf. C			<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudes altas - Frequência média a alta - Contínua 	Sismossequência 1 Sismossequência 2 Sismossequência 3 Sismossequência 4
Sf. D			<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudes baixas a médias - Frequência baixa - Descontínua 	Sismossequência 2 Sismossequência 3 Sismossequência 4
Sf. E			<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudes baixas - Frequência baixa a alta - Descontínua a semi-contínua 	Sismossequência 1 Sismossequência 2
Sf. F			<ul style="list-style-type: none"> - Amplitudes médias a altas - Frequência baixa - Descontínua a semi-contínua 	Sismossequência 1

Tabela 1 – Tabela esquemática com as sismo-fácies caracterizadas no presente estudo, demonstrando-as em fase normal (escala vertical em vermelho), interpretadas em desenho, suas características sísmicas e a ocorrência em cada sismossequência.

5.3 Sismossequências

A partir dos sismo-horizontes mapeados, foram definidas cinco sismossequências no intervalo de estudo, segmentadas entre si pelos horizontes limítrofes definidos (à exceção do topo da Formação Retiro) (Figura 32), cuja caracterização foi realizada a partir de mapas de contorno estrutural gerados para cada horizonte sísmico interpretado e mapas de isópaca para cada sequência. As sismossequências definidas são:

- Sismossequência 1, limitada pelo embasamento e sismo-horizonte I
- Sismossequência 2, limitada pelos sismo-horizontes I e II
- Sismossequência 3, limitada pelos sismo-horizontes II e III
- Sismossequência 4, limitada pelos sismo-horizontes III e IV
- Sismossequência 5, limitada pelo sismo-horizonte IV e base do sal

Sismossequência 1

A partir do mapa de contorno estrutural do embasamento acústico, nota-se que essa superfície varia de profundidades de 5000m até 6600m e está fortemente compartimentada na forma de hemi-grábens alongados na direção NE-SW, com mergulho perpendicular à esta direção para SE, segmentando e escalonando toda a região da área de estudo. Essa característica fica evidente em mapa quando a partir da principal falha na área de estudo, cujo plano está associado ao alto estrutural mais proeminente da área, segmentando-a em dois domínios diferentes, um a NW e outro a SE (Figura 20). Em consequência, ocorrem dois baixos estruturais na área de estudo, também na forma de calhas alongadas NE-SW, provavelmente atuando como as principais regiões de acomodação sedimentar nos intervalos basais do Pré-sal.

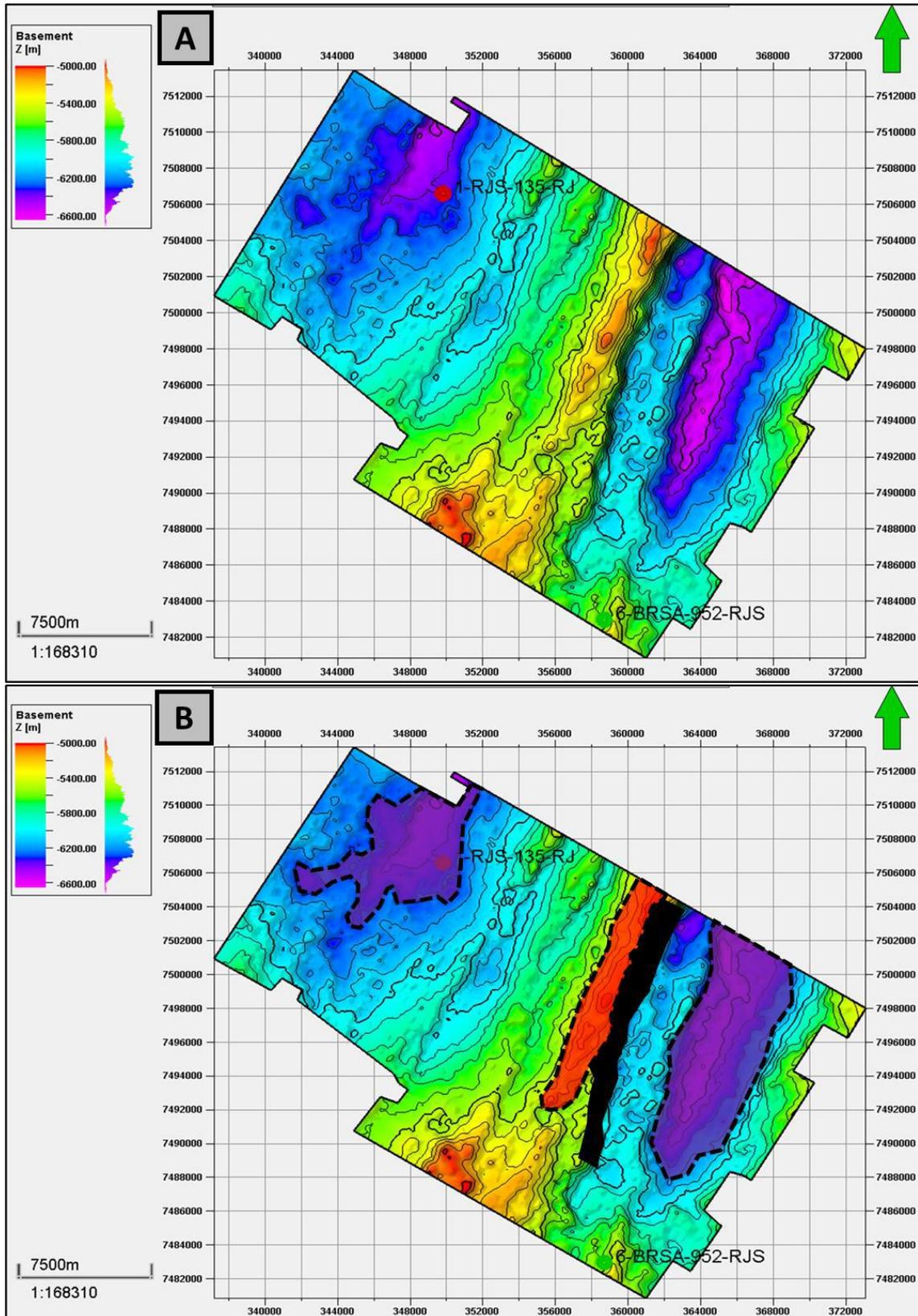


Figura 20 – a) Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento acústico com os poços utilizados; b) Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento acústico, com ênfase nos baixos estruturais identificados (roxo), no principal alto estrutural do embasamento (vermelho) e na principal falha da área de estudo (polígono preto).

Foi gerado, também, um diagrama de rosetas a partir de todas as falhas geológicas mapeadas na área de estudo que atingem a superfície do embasamento acústico (Figura 21). A partir desse diagrama, fica nítido o principal *trend* dessas falhas, de N15E a N30E com vergência para SE, sendo este concordante com as feições observadas no mapa do embasamento.

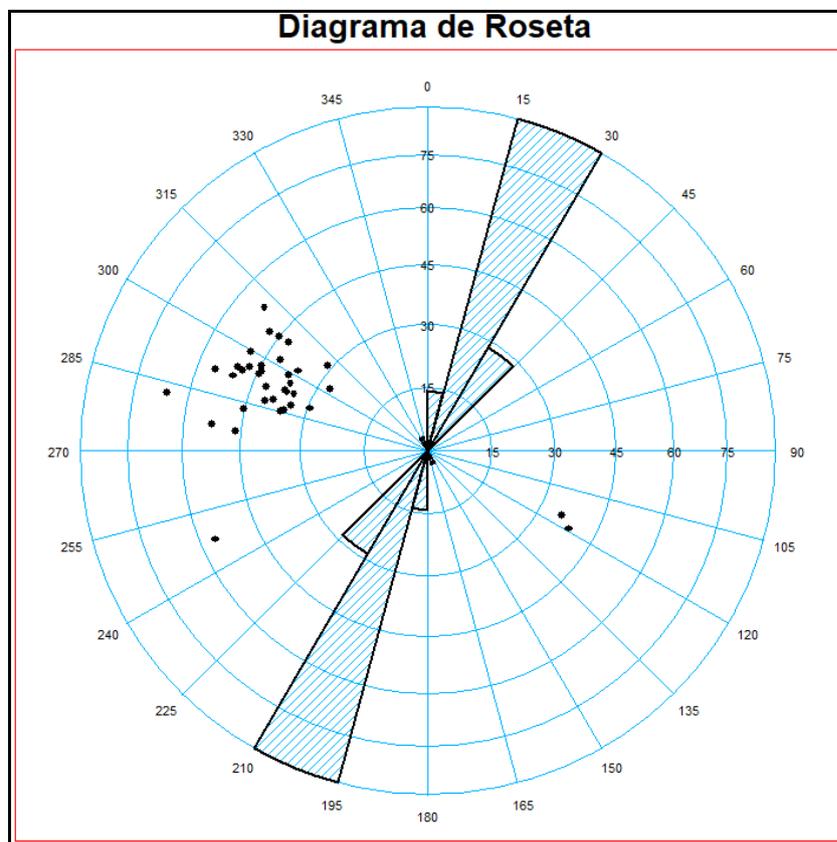


Figura 21 – Diagrama de Roseta representativo das principais falhas geológicas mapeadas na área de estudo, onde o *trend* preferencial das falhas é N15E a N30E com vergência para SE.

Já os mapas de contorno estrutural da sismo-horizonte I e de isópaca da sismossequência 1 (Figura 22 e Figura 23) apresentam uma mudança sutil no padrão topográfico do intervalo, com os dois baixos locais ainda em evidência assim como uma variação entre as maiores e menores profundidades do mapa, similares às encontradas na superfície do embasamento, chegando a contrastes de até 1200 metros. Por outro lado, nota-se um aumento topográfico na região central da área de estudo sentido noroeste, evidenciado pelo aplainamento das curvas de nível (Figura 22).

Tanto o mapa de contorno do sismo-horizonte I quanto o mapa de isópaca da sismossequência ainda apresentam similaridades com o mapa do embasamento acústico, herdando os principais altos e baixos topográficos principalmente na região do baixo da porção leste. Já na porção oeste do mapa de isópaca, pode-se notar que as variações de espessura são mais sutis, haja visto que as falhas que atuam nessa região apresentam menores rejeitos que as falhas na porção leste (Figura 23).

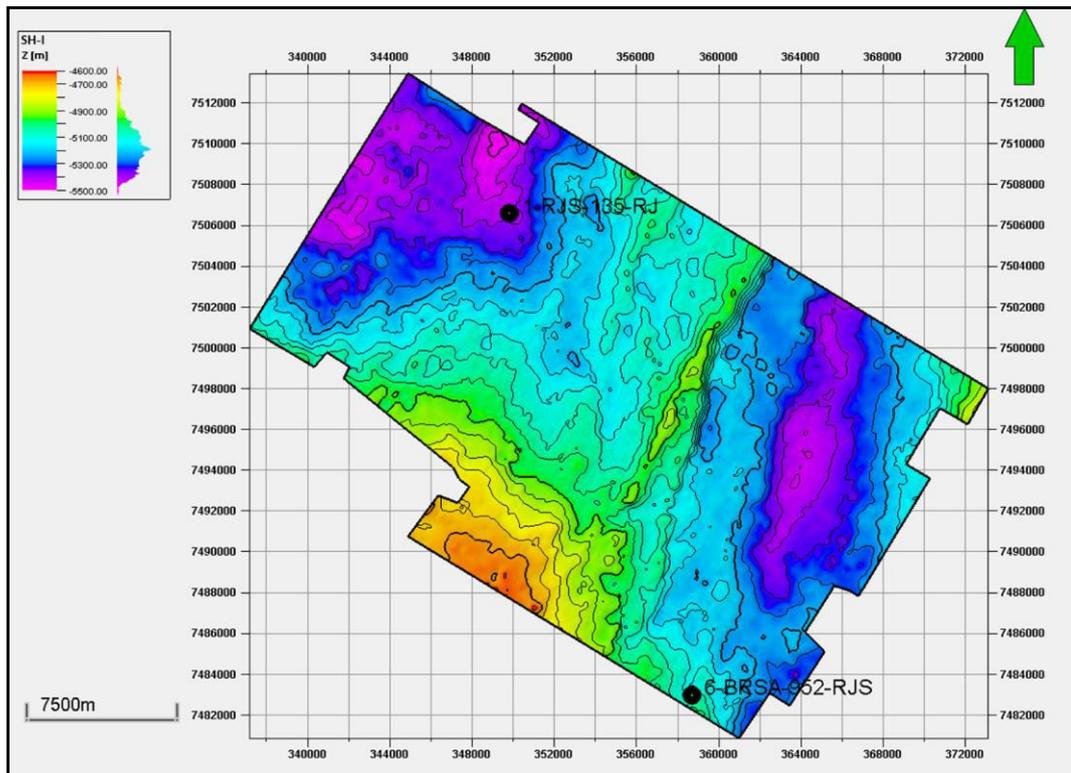


Figura 22 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte I com os poços utilizados, com os baixos estruturais em evidência pelas cores frias.

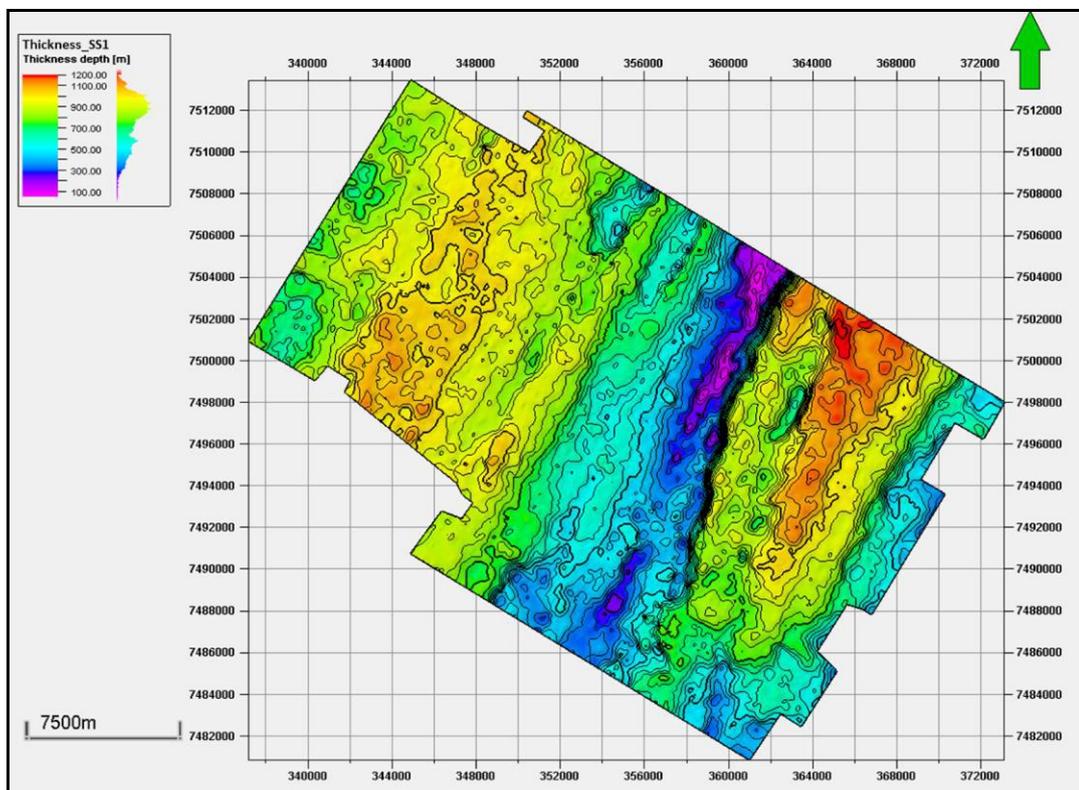


Figura 23 – Mapa de isópaca da sismossequência 1. Notar as maiores espessuras da sismossequência localizadas nos baixos estruturais, e as menores espessuras sobre o alto estrutural central.

Sismossequência 2

Assim como observado no mapa de contorno do sismo-horizonte I (descrito no item acima), à medida que se sobe na estratigrafia, nota-se uma mudança gradual no padrão paleotopográfico a partir do mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte II, com os dois baixos locais e o rejeito da falha principal ainda evidentes, mas com um aumento topográfico relativo das curvas de nível na região central, podendo indicar uma possível mudança preliminar na dinâmica de sedimentação ou um controle estrutural mais ativo na área de estudo (Figura 24).

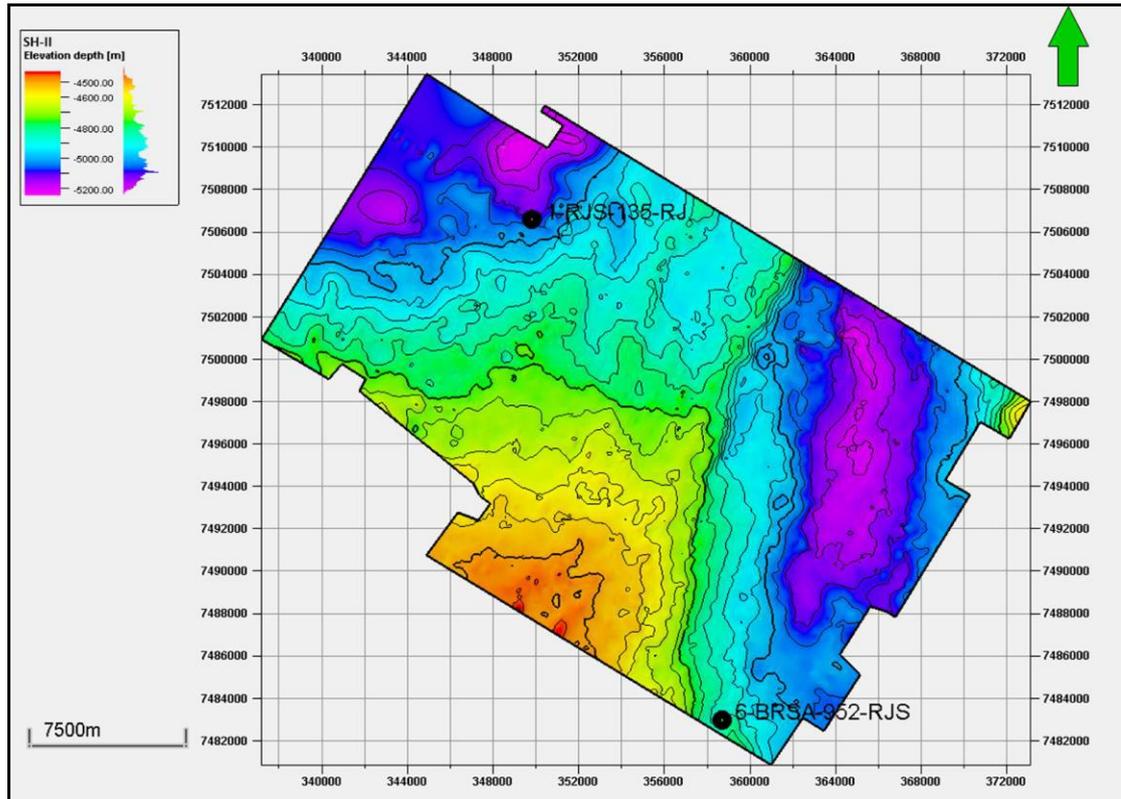


Figura 24 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte II com os poços utilizados, com os baixos estruturais e o rejeito da falha ainda evidentes, mas com um aumento topográfico relativo das curvas de nível na região central.

A maioria das falhas interpretadas que atingem o embasamento acústico cessa sua atividade abaixo do sismo-horizonte II (Figura 11), indicando que, a partir desse nível estratigráfico, a tectônica se mostra progressivamente menos atuante do que nos níveis mais basais.

Além disso, o sismo-horizonte II se destaca dos demais refletores por delimitar o intervalo Pré-sal em duas sequências distintas, em termos de sismofácies: uma porção basal, composta pelas sismossequências 1 e 2, com refletores sísmicos com menos continuidade lateral, moderadas a baixas refletividades e um padrão geométrico menos definido, e outra porção superior, composta pelas sismossequências 3, 4 e 5, apresentando refletores com boa continuidade lateral e sobretudo com fortes amplitudes, com uma alta refletividade e um padrão geométrico ondulado a plano-paralelo.

A partir da isópaca da SS2, esse aumento topográfico fica evidente nas maiores espessuras concentradas justamente na região central da área, em uma forma alongada na direção norte-noroeste. O padrão encontrado nessa isópaca é diferente de todos os outros gerados para as sismossequências, apresentando uma faixa contínua sentido NW-SE de maiores espessuras e sem conexão aparente com as feições do embasamento, como encontrado no mapa da SS1 (Figura 25). Por outro lado, a variação de espessuras ao longo do mapa ocorre discretamente, com exceção do caso citado acima e das regiões próximas à principal falha da área de estudo.

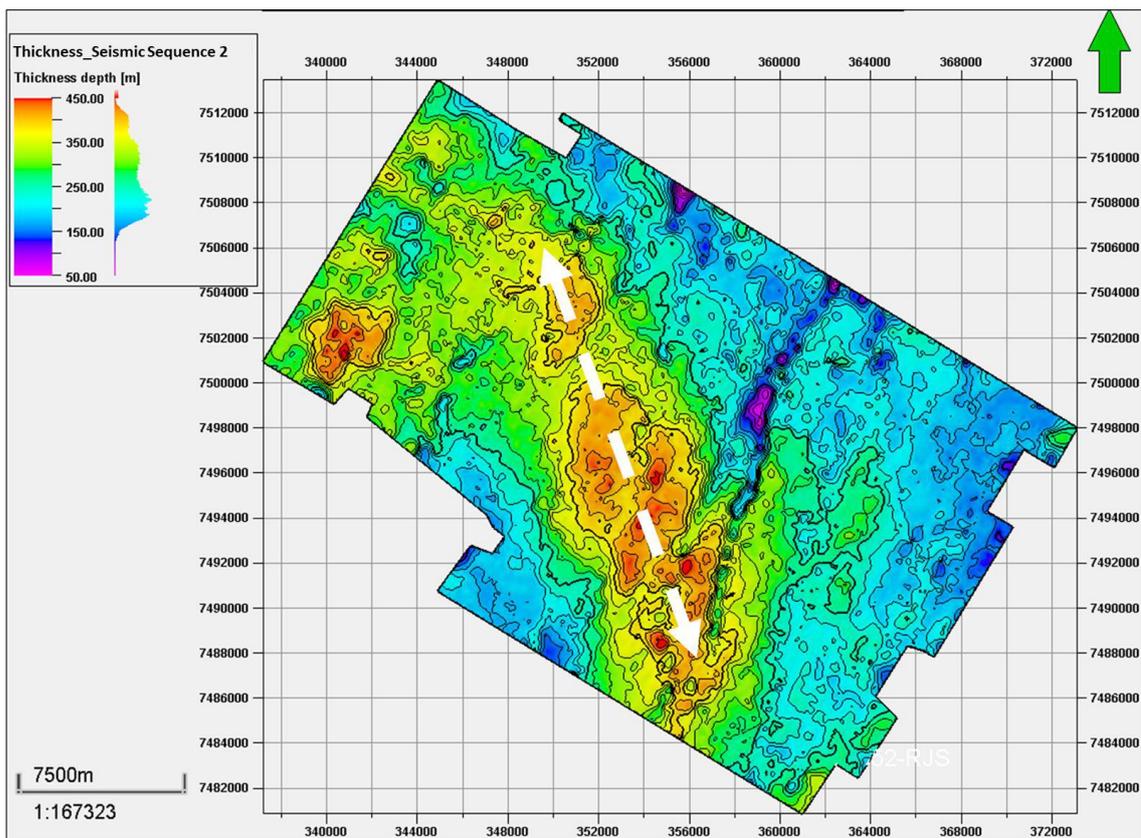


Figura 25 – Isópaca da sismossequência 2, com o alinhamento de maiores espessuras no sentido NW-SE, representado pela seta em branco. Observar a diferença do padrão das espessuras nesse mapa ao compará-lo com as demais isópacas geradas.

Sismossequência 3

À medida que se sobe na estratigrafia, a partir do mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte III, nota-se uma mudança gradual no padrão topográfico do intervalo, com o baixo estrutural mais a noroeste ficando cada vez mais discreto em comparação com o baixo a sudeste, assim como uma aparente diminuição da influência tectônica e da paleotopografia do embasamento na superfície, haja visto que as similaridades com a superfície do embasamento acústico são menores, salvo a exceção do alto central associado ao plano de falha principal (Figura 26).

As curvas de nível a leste do alto estrutural principal da área de estudo decrescem sentido leste-sudeste até aplainarem no baixo estrutural local, no sudeste da área (Figura 26), com a ocorrência majoritária da Sismofácies C nessa região (Figura 32). Por outro lado, na porção ocidental da área, as curvas de nível apresentam um comportamento similar ao mapa de contorno do sismo-horizonte II, ainda sob influência dos altos dos hemi-grábens e decrescendo em direção ao baixo estrutural local, ainda que de forma mais discreta. Essa feição também é identificada na isópaca da SS3, onde as maiores espessuras se concentram no baixo associado à principal falha, enquanto as menores espessuras estão localizadas na porção sul do mapa, assim como as porções mais rasas da superfície do sismo-horizonte III (Figura 27).

É válido frisar que, devido a problemas de imageamento e processamento sísmico, a interpretação do sismo-horizonte III ficou comprometida na parte do extremo noroeste da área de estudo, próxima ao poço 1-RJS-135-RJ, o que acarretou em um mapa de contorno e de espessura com um menor grau de confiabilidade do que os demais gerados nessa região. Logo, os dados dessa região não foram levados em consideração na avaliação do mapa de contorno estrutural e dos mapas de espessura das sismossequências 3 e 4.

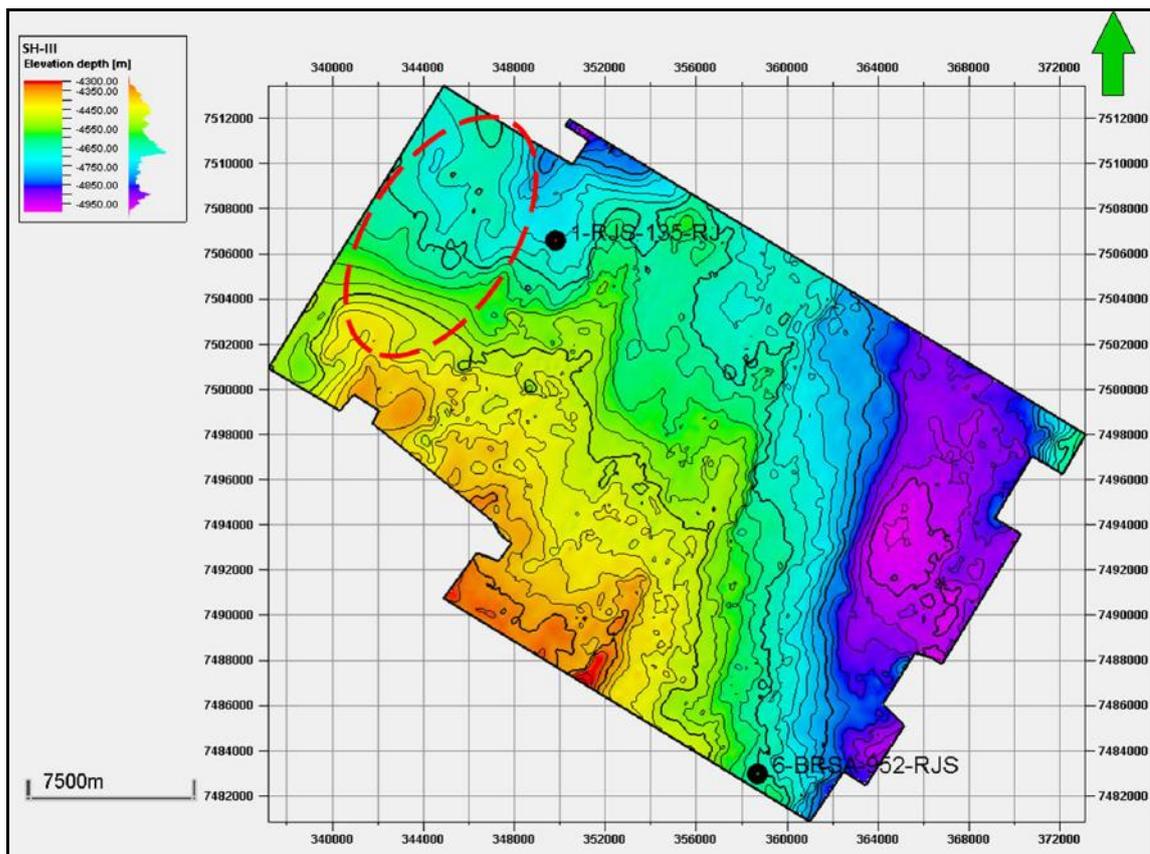


Figura 26 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte III com os poços utilizados, com o baixo estrutural a nordeste mais discreto e o baixo a sudeste em evidência. Notar as curvas de nível na porção leste decrescendo nessa direção, enquanto as curvas na porção ocidental do mapa decrescendo sentido norte. Ênfase na região de dificuldade de interpretação devido ao dado sísmico (polígono vermelho).

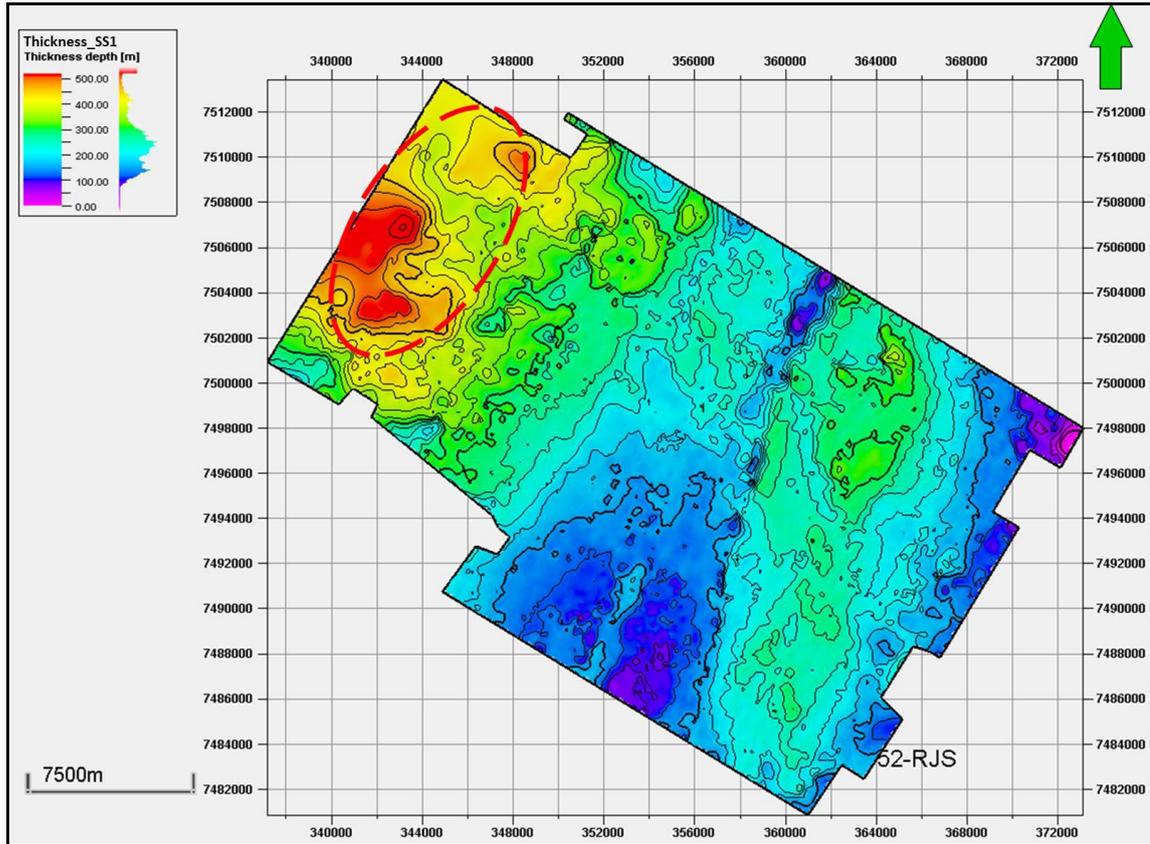


Figura 27 – Mapa de isópaca da sismossequência 3. Notar as maiores espessuras concentradas nos baixos estruturais. Ênfase no polígono tracejado, referente à região de dificuldade de interpretação devido aos problemas no dado sísmico.

Sismossequência 4

No mapa de contorno do sismo-horizonte IV (Figura 28), as curvas de nível decrescem predominantemente no sentido leste na porção oriental do mapa e no sentido norte na porção noroeste da área de estudo. Além disso, ainda é notável o baixo topográfico a sudeste bem delimitado, facilmente identificável a partir dos mapas de contorno e de espessura dessa unidade. Algumas falhas ainda atuam cortando esse horizonte em alguns pontos da área com rejeitos de até 40 metros, apesar de ainda serem valores considerados baixos se comparado com os rejeitos de intervalos mais basais (Figura 28 e Figura 32).

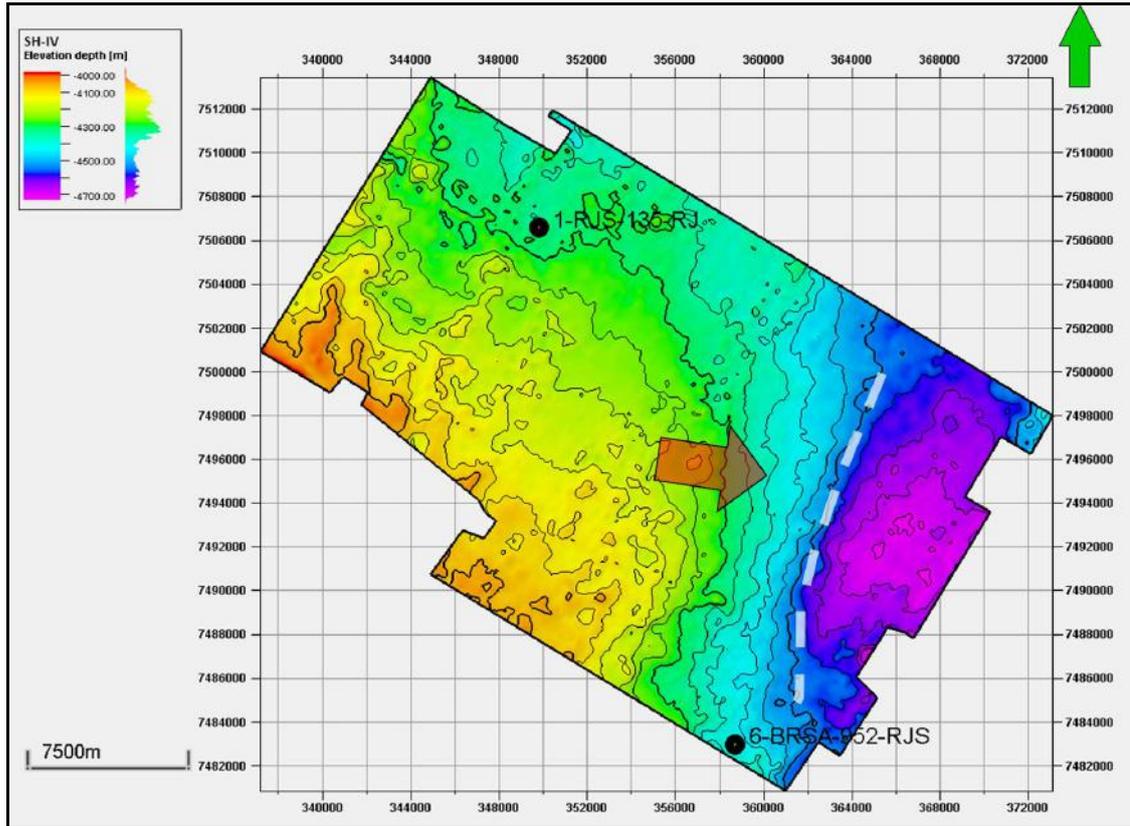


Figura 28 – Mapa de contorno estrutural do sismo-horizonte 4. Ênfase na seta (vermelha) indicando o baixo estrutural a sudeste e no plano de falha (branco) que segmenta a borda do mesmo baixo.

Em relação à isópaca, variações discretas são notáveis ao longo da área, com uma espessura média de 300 metros sendo o padrão encontrado por toda a área de estudo (Figura 29), sendo a segunda mais espessa sismossequência interpretada do intervalo de estudo. Isso também é notável em seção (Figura 32), onde é possível observar que a sequência mantém sua espessura no sentido NW-SE, variando apenas na região do alto estrutural central pela atividade de falhas.

Os valores que ultrapassam os 500 metros de espessura na porção noroeste se dão pelos problemas de processamento sísmico previamente abordados e não condizem com as reais espessuras da sequência nessa área.

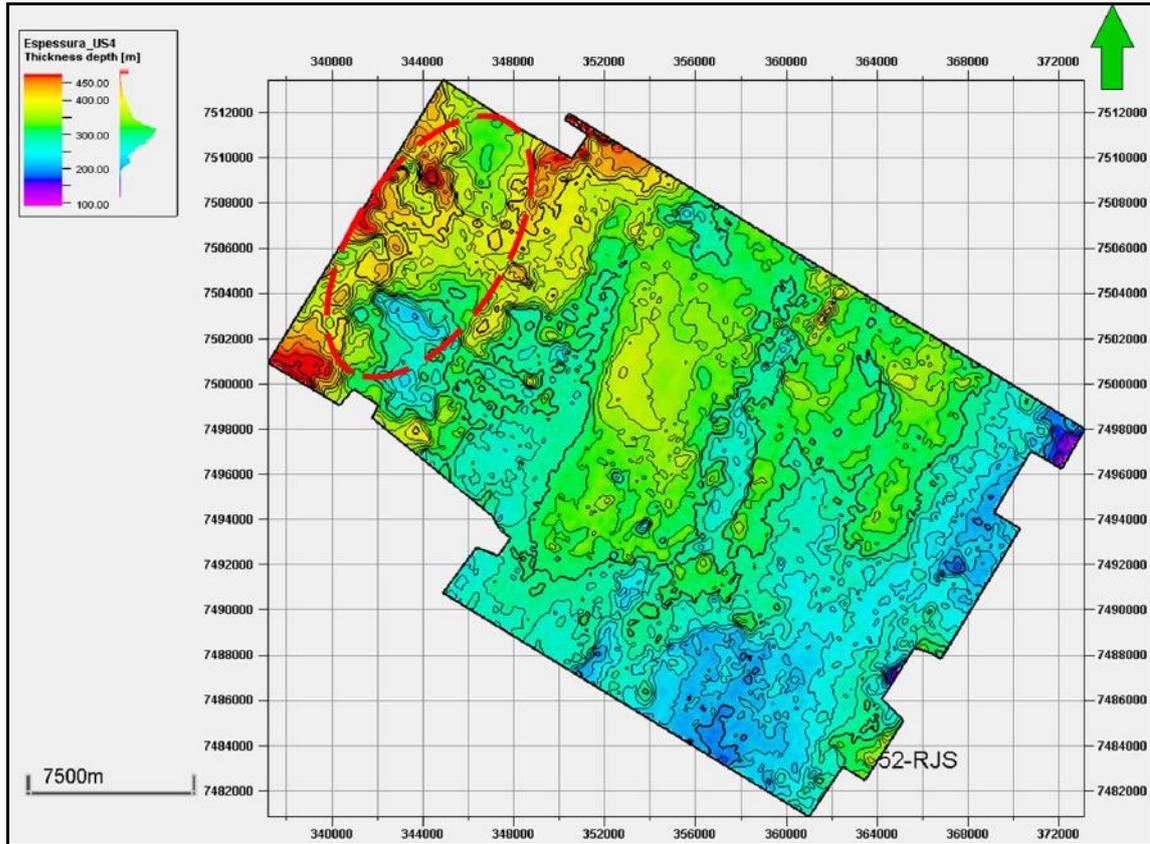


Figura 29 – Mapa de isópaca da sismossequência 4, com discretas variações de espessura ao longo da área, mantendo a espessura média de 300 metros. Ênfase no polígono (vermelho) referente à região com problemas no dado sísmico.

Sismossequência 5 (Formação Macabu)

No caso do mapa de contorno do topo da Formação Macabu, paleotopografia apresenta menores variações de profundidades (700 metros das menores às maiores cotas) e decresce predominantemente no sentido leste-nordeste, de forma homogênea por todo o mapa (Figura 30). Além disso, também é notável o baixo estrutural na porção oriental da área de estudo, ainda que mais discreto, similar ao das demais sismossequências.

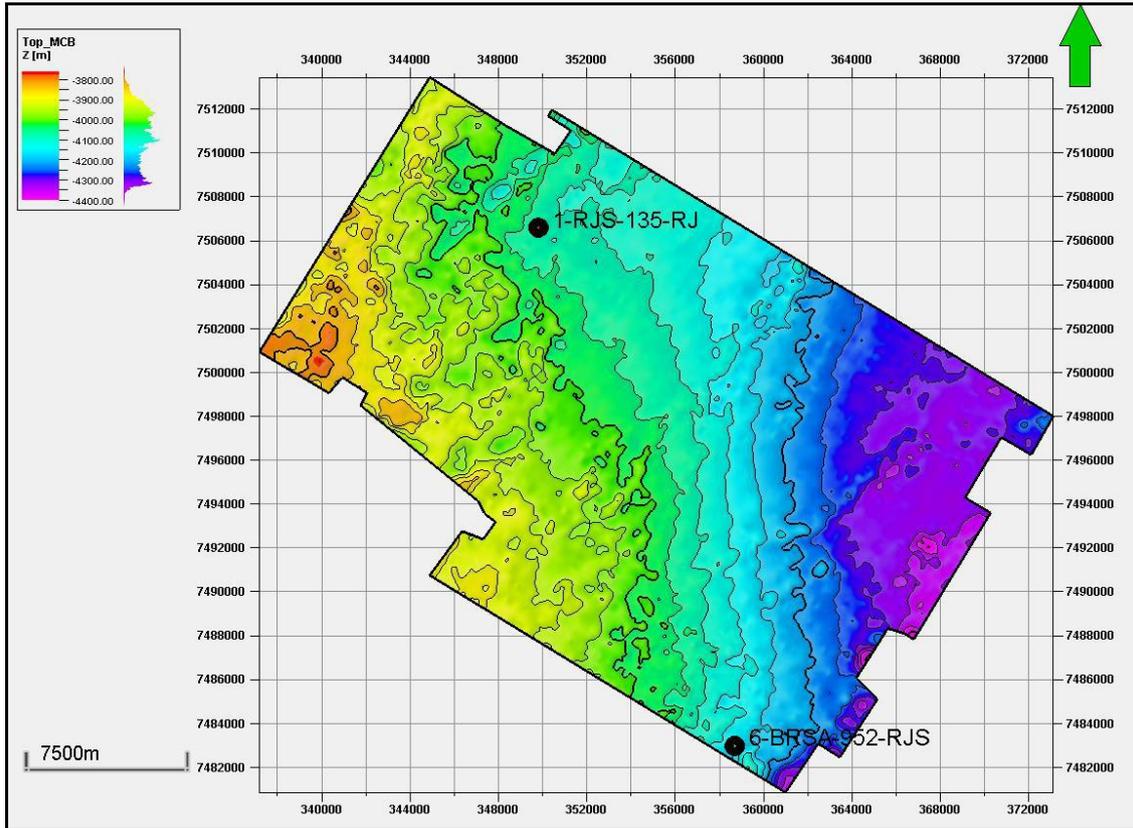


Figura 30 – Mapa de contorno estrutural do topo da Formação Macabu. Notar as curvas de nível decrescendo predominantemente sentido leste-sudeste e o baixo estrutural na porção oriental do mapa.

Nota-se que existe um espessamento significativo dessa sismossequência a sudeste, atingindo espessuras acima de 400 metros, feição notável tanto em mapa (Figura 31) quanto em seção (Figura 32). Esse espessamento está diretamente relacionado ao baixo estrutural da porção sudeste e associado com a ocorrência da Sismofácies B, provavelmente representando um depocentro local dessa unidade.

Além disso, a região centro-sul da área representa menores espessuras sedimentares se comparada às bordas da área de estudo, variando entre 150 e 100 metros de pacote sedimentar (Figura 31). Nessa região, a Sismofácies A ocorre com suas características padrão, sem grandes variações a não ser o adelgaçamento da unidade.

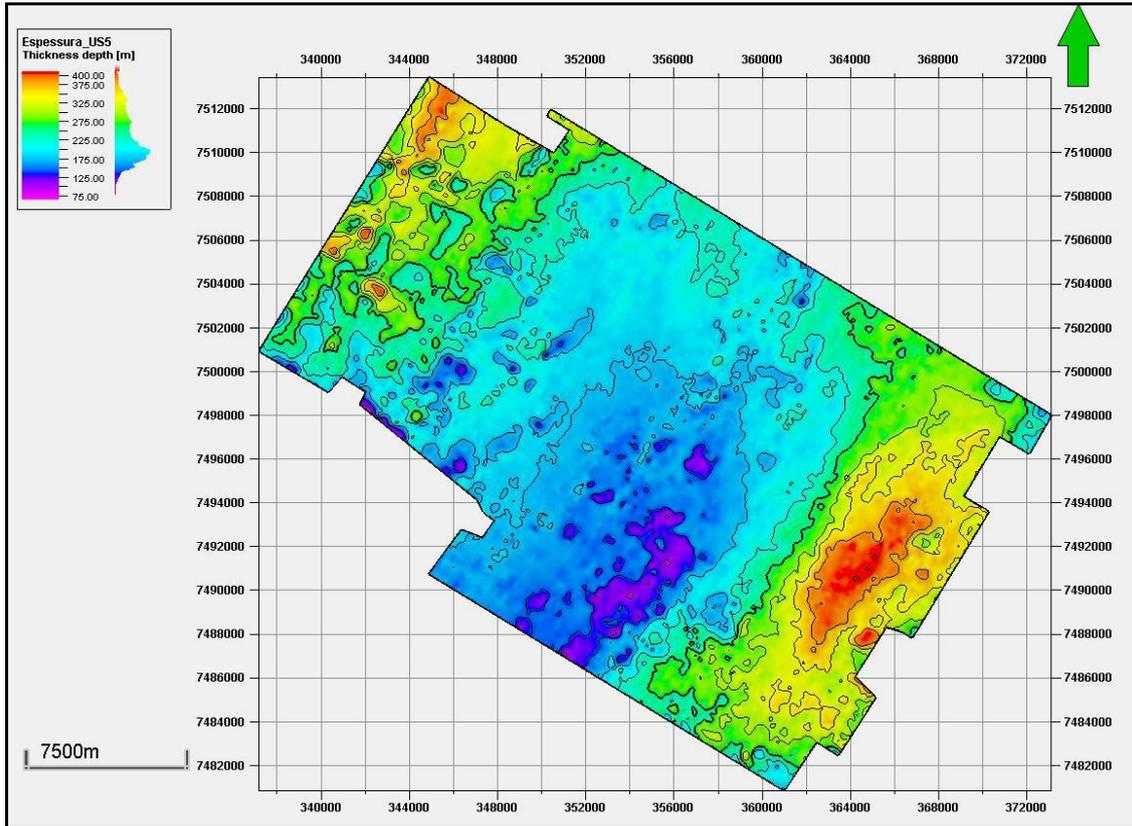


Figura 31 – Mapa de isópaca da sismossequência 5 (Formação Macabu), com as maiores espessuras concentradas nas extremidades sudeste e noroeste do mapa, assim como as menores concentradas na porção central.

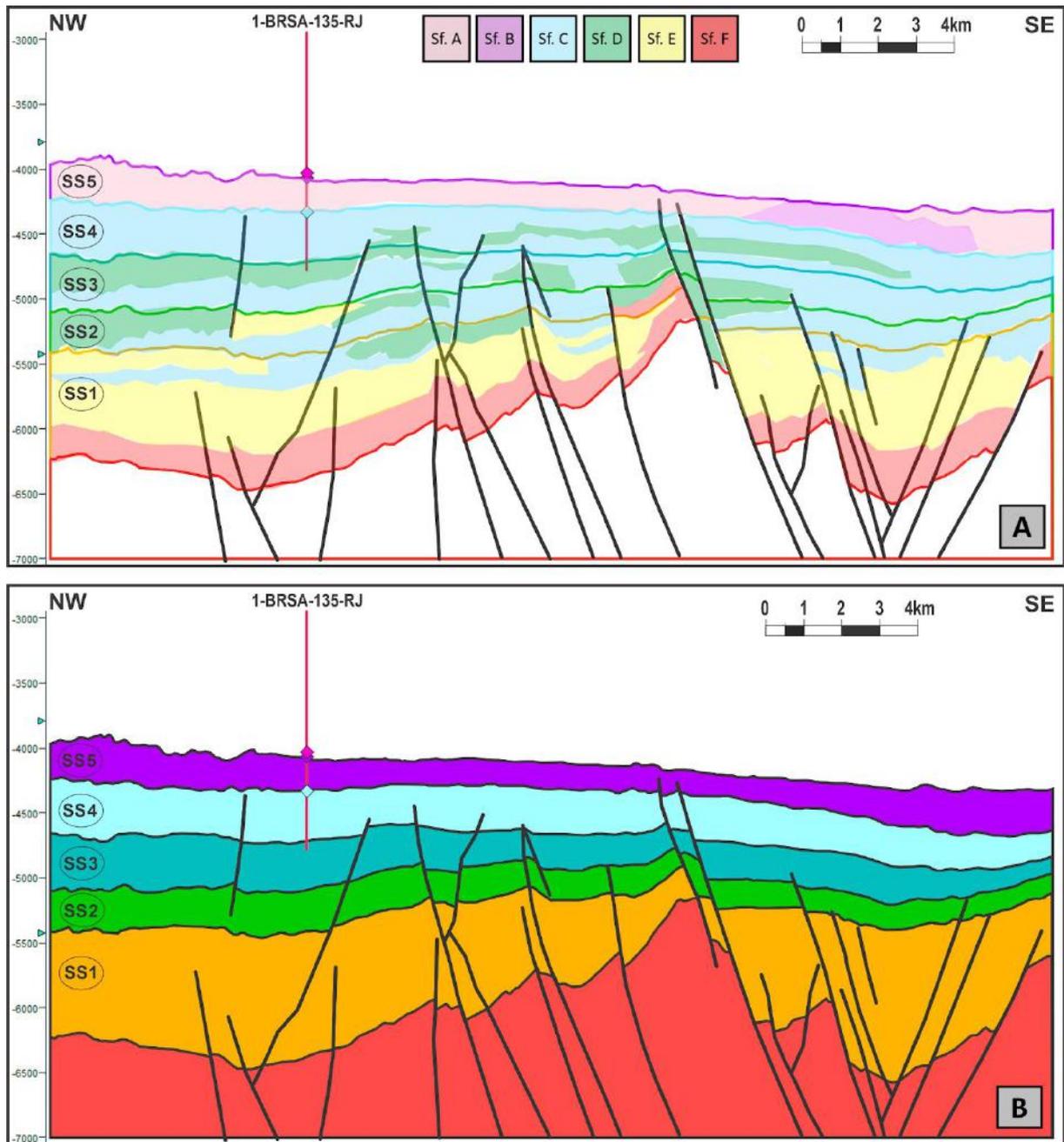


Figura 32 – a) Seção esquemática do intervalo Pré-sal a partir da linha *Dip* 5819, representando os sismo-horizontes e as sismofácies interpretadas; b) Seção esquemática do intervalo Pré-sal a partir da linha *Dip* 5819, representando o arcabouço estratigráfico composto pelas sismossequências interpretadas e coloridas com as respectivas cores dos horizontes de topo de cada unidade.

6 DISCUSSÕES

6.1 Caracterização de sismofácies

A principal característica da Sismofácies A estar associada às médias e baixas amplitudes e frequência dos refletores sísmicos provavelmente se dá pelos pacotes carbonáticos da Formação Macabu, cujas variações físicas internas são menos discrepantes e, por isso, não apresentam contrastes acústicos internos tão acentuados. O padrão de refletores subparalelo presente nessa sismofácies, segundo Mitchum *et al.* (1977a), geralmente indica unidades depositadas em uma taxa de deposição constante sob um regime de subsidência uniforme, ou uma configuração de bacia tectonicamente estável. Isso condiz com a frequência que essas unidades ocorrem ao longo do intervalo Pré-sal, se concentrando no topo do intervalo (Figura 33), onde entende-se que a influência tectônica é menos ativa e, conseqüentemente, menos atuante na deposição sedimentar. Além disso, partindo do princípio da continuidade lateral, essa sismofácies apresenta uma associação lateral direta com a sismofácies B, ocorrendo de forma cronocorrelata e singenética, compondo um mesmo ambiente deposicional.

A respeito dos refletores com morfologias montiformes presentes nas Sismofácies A e B (q.v. Figura 14), podem representar a geometria de bioconstruções carbonáticas de borda de plataforma ou rampas, elementos arquiteturais comuns em ambientes de sedimentação carbonática, como observado por Paumard *et al.* (2017). Moreira *et al.* (2007) também cita a ocorrência dessas estruturas na Formação Barra Velha, unidade cronocorrelata à Formação Macabu na bacia de Santos, assim como Muniz & Bosence (2015), que ao se referirem aos reservatórios do Macabu, mencionam que esses são “parcialmente microbialíticos”.

Já a Sismofácies B, por ocorrer exclusivamente nas regiões de maiores gradientes paleotopográficos da Formação Macabu, baseado em suas características sísmicas descritas, infere-se que sua gênese pode estar relacionada a sedimentos carbonáticos retrabalhados. Segundo Mitchum *et al.* (1977a), as clinofórmias sigmoidais (q.v. Figura 15), assim como sua configuração contorcida, sugerem que esta sismofácies foi depositada em um ambiente de talude ou plataforma externa, sob ação de agentes erosivos que retrabalharam os carbonatos em questão. A respeito dos refletores com morfologias montiformes, também presentes na Sismofácies B.

Tratando-se dos refletores de amplitude positiva com ótima continuidade lateral encontrados na Sismofácies C, segundo Mitchum *et al.* (1977a), os depósitos associados às unidades com essas características são geralmente depositados através de processos de baixa energia sobre um fundo plano em um ambiente lacustrino, o que é coerente dada a geometria das camadas e o contexto tectonossedimentar do intervalo em que ela ocorre. Além disso, as características da Sismofácies C se assemelham muito à Sismofácies 2 (SF2) definida no trabalho de Paumard *et al.* (2017), onde os autores interpretaram certos pacotes carbonáticos da plataforma de Yanada, Myanmar, como tendo sido depositados em um ambiente plataformal raso, limitado em sua borda por um recife de barreira (Figura 33). No caso da Sismofácies C, o limite de borda poderia ser o próprio alto estrutural central. Dessa forma, os refletores sísmicos com boa continuidade lateral

dessa sismofácies provavelmente representam pacotes sedimentares depositados em um ambiente lacustre raso, influenciado por correntes de tempestade e com migração de dunas subaquáticas gerando a deposição das coquinas, como proposto por Olivito & Souza (2020).

É importante salientar que, apesar da similaridade nos padrões de reflexão sísmica entre a Sismofácies 2, definida pelos autores, e a Sismofácies C, interpretada no presente trabalho, o modelo de ambiente deposicional de Paumard *et al.* (2017) não é correlato à Formação Macabu, uma vez que a plataforma de Yanada trata-se de um ambiente marinho e a Formação Macabu é interpretada, tomando como base Winter *et al.* (2007), como um contexto lacustre transicional.

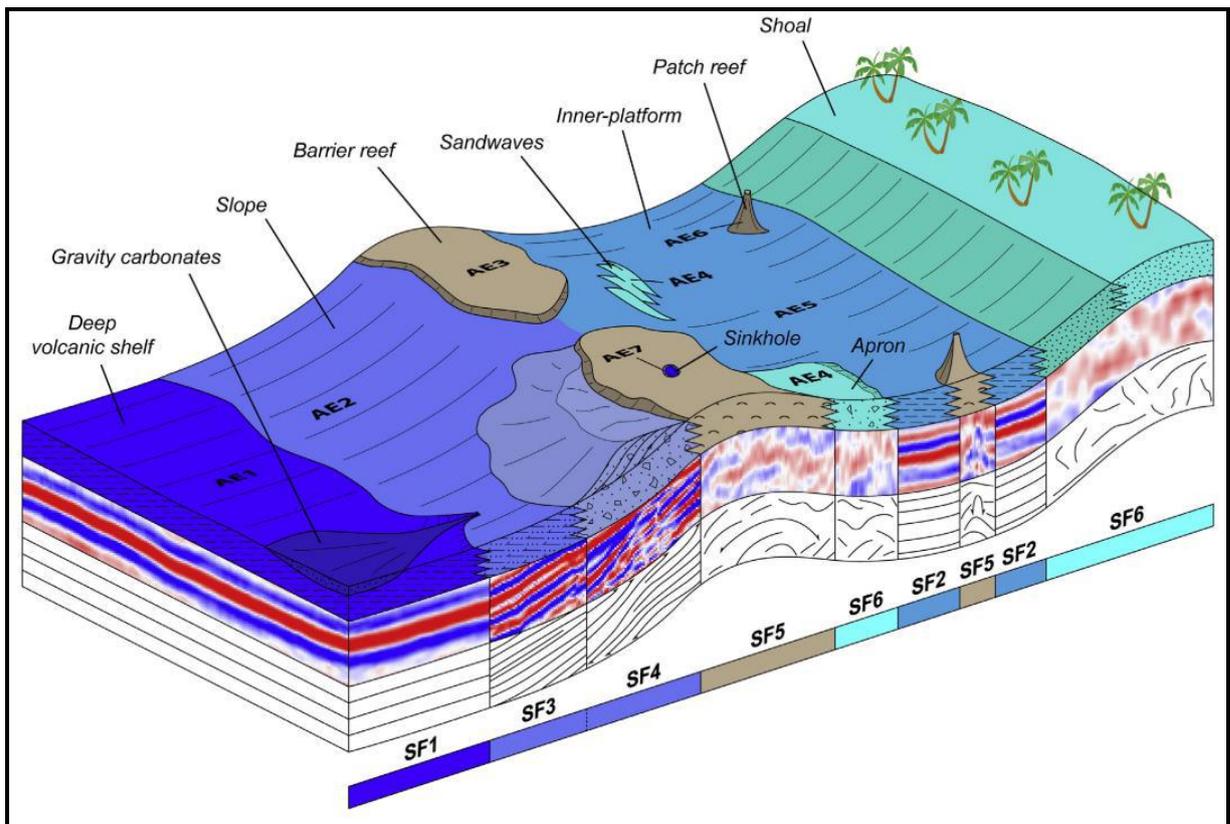


Figura 33 – Modelo conceitual 3D mostrando a interpretação dos principais ambientes deposicionais a partir da análise de sismofácies e elementos arquiteturais na plataforma de Yanada. Retirado de Paumard *et al.* (2017).

Ademais, as amplitudes sísmicas e contrastes de impedância acústica da Sismofácies C são elevados (Figura 16 e Figura 17) pelo fato dos pacotes de sedimentação fina, como os folhelhos, se intercalarem com as coquinas e carbonatos grossos, depositados em camadas com geometria de lençóis e gerando um maior contraste de impedância se comparado com outras sequências sedimentares no intervalo Pré-sal, como abordado por Winter *et al.* (2007).

Também é possível presumir, com o auxílio dos perfis geofísicos e perfil composto dos poços utilizados, que a ocorrência de refletores com altas amplitudes positivas reflete um volume de sedimentos argilosos nesse intervalo bem superior ao apresentado na Sismofácies A, apresentando picos de raios gama de até 140 gAPI na porção basal de ambos os poços (Figura 34). Olivito & Souza (2020)

propuseram que essa frequente intercalação de refletores positivos com refletores de altas amplitudes negativas pode ser explicada pelo modelo deposicional lacustre raso, onde a ação de correntes de tempestade atuando próximas à linha de costa do lago teriam erodido e depositado os sedimentos em sucessivos episódios e diferentes localidades.

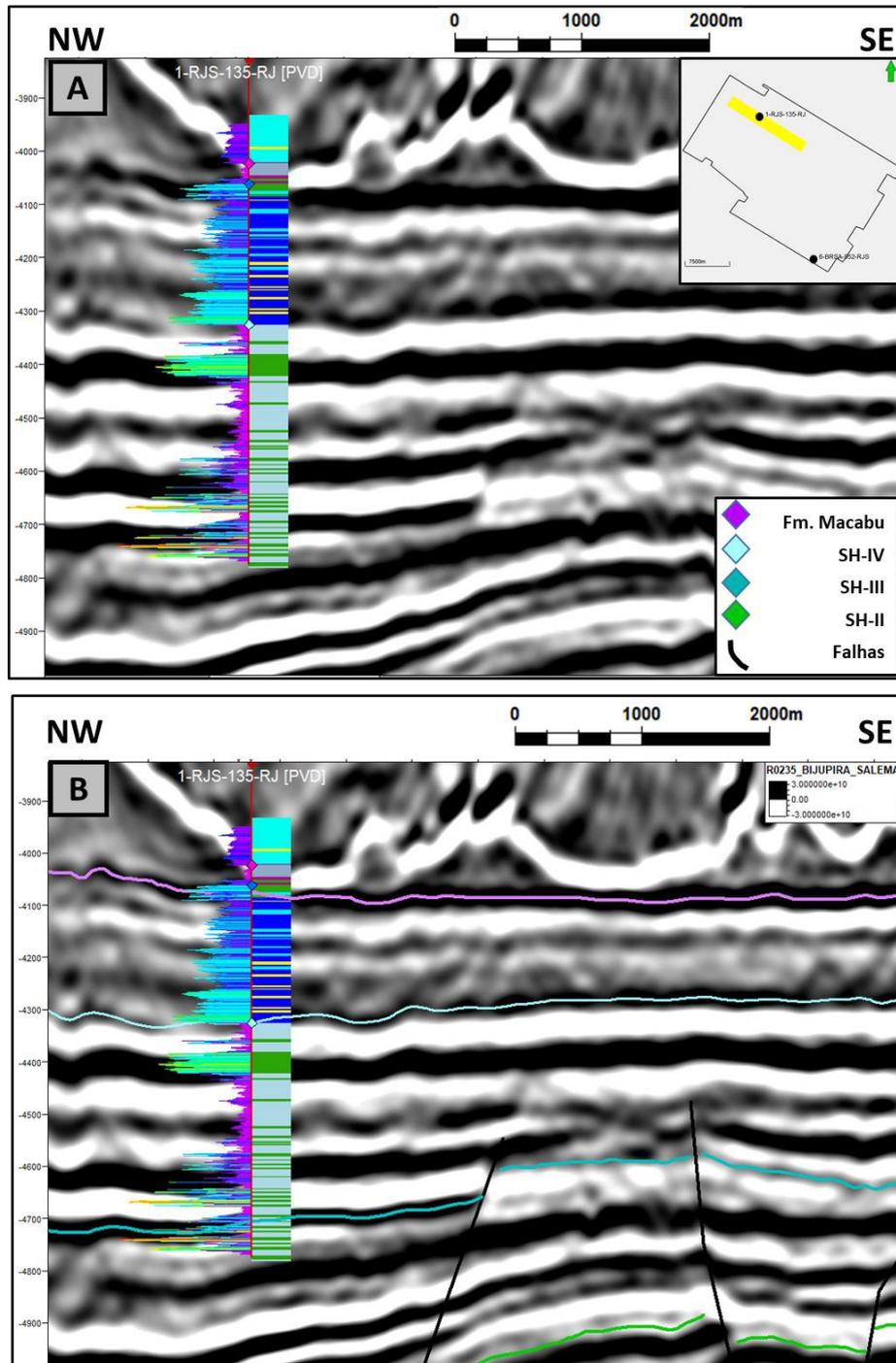


Figura 34 – (a) Recorte da seção sísmica *dip* 5819, sem interpretação, com o perfil litológico (direita) e de raios gama (esquerda), com valores de 0 a 150, plotados no poço; (b) Recorte da seção sísmica *dip* 5819 interpretada e com os perfis plotados no poço. Notar o pico dos raios gama referente ao refletor de forte sinal positivo (preto).

Nas sismossequências 2, 3 e 4, as terminações dos refletores internos da Sismofácies C ocorrem quase que exclusivamente quando associados a relevantes variações topográficas ou aos planos de falha (Figura 16), uma vez que a continuidade lateral dos refletores dessa sismofácies é uma característica-chave. Por outro lado, quando associada lateralmente com a Sismofácies D, geralmente ocorrem truncamentos. Uma possível justificativa dessa ocorrência poderia ser a reativação de falhas por pulsos tectônicos ao longo do intervalo, remobilizando e retrabalhando sedimentos na forma da Sismofácies D, ao passo que a Sismofácies C teria sido depositada em episódios de atividade tectônica mais branda.

Dessa forma, as baixas amplitudes e frequência sísmica encontradas na Sismofácies D, sua geometria contorcida e a ocorrência frequentemente associada a bordas de falhas ou altos topográficos, levam-se a crer que essa unidade está diretamente relacionada com a ocorrência de corpos aluviais ou lobos proximais, provavelmente geradas a partir do escorregamento de massas associadas a falhas sin-deposicionais, ou de retrabalhamento da linha de costa de lagos. Olivito & Souza (2020) comentam que oscilações no nível de base de lagos nesse contexto são frequentes e podem contribuir diretamente para o retrabalhamento de sedimentos, dando origem às geometrias encontradas nessa sismofácies.

Além do possível retrabalhamento dos sedimentos da Formação Coqueiros referentes à Sismofácies C pela reativação de falhas, de acordo com Winter *et al.* (2007), as coquinas da Formação Coqueiros também são frequentemente depositadas e retrabalhadas em altos topográficos, corroborando com a disposição espacial da Sismofácies D no intervalo de estudo.

Por fim, ao comparar a Sismofácies C com a D, fica evidente a concordância na diferenciação das sismofácies a partir da resposta do *Sweetness* (q.v. Figura 19), onde a Sismofácies C apresenta altos valores do atributo, e o inverso para a Sismofácies D. Em paralelo a isso, ao comparar a resposta do *Sweetness* na Sismofácies D com as Sismofácies A e B, conclui-se que a Formação Macabu também apresenta, de um modo geral, altos valores de frequência sísmica e baixa amplitude sísmica interna.

A Sismofácies E ocorre exclusivamente na sismossequência 1, sempre sobrepondo à Sismofácies F e sendo limitada no topo e base por dois horizontes de altas amplitudes negativas, além de ocorrer em um setor de baixos contrastes de impedância (Figura 32). Segundo Mitchum *et al.* (1977a), padrões de reflexões discordantes e descontínuas geralmente sugerem um arranjo desordenado das superfícies de reflexão, podendo indicar um ambiente de energia alta e variável. Essa característica pode estar relacionada à similaridade de litologias e suas respectivas propriedades físicas nesse intervalo basal que, segundo Winter *et al.* (2007), está ligado à deposição de sedimentos siliciclásticos proximais associados às bordas de falha em um contexto de rifte inicial.

Além disso, ao analisar a Figura 35, a geometria externa dessa sismofácies se assemelha muito a de leques aluviais encaixados em calhas e baixos estruturais do embasamento, sempre limitados por falhas normais e sotapostos à Sismofácies F.

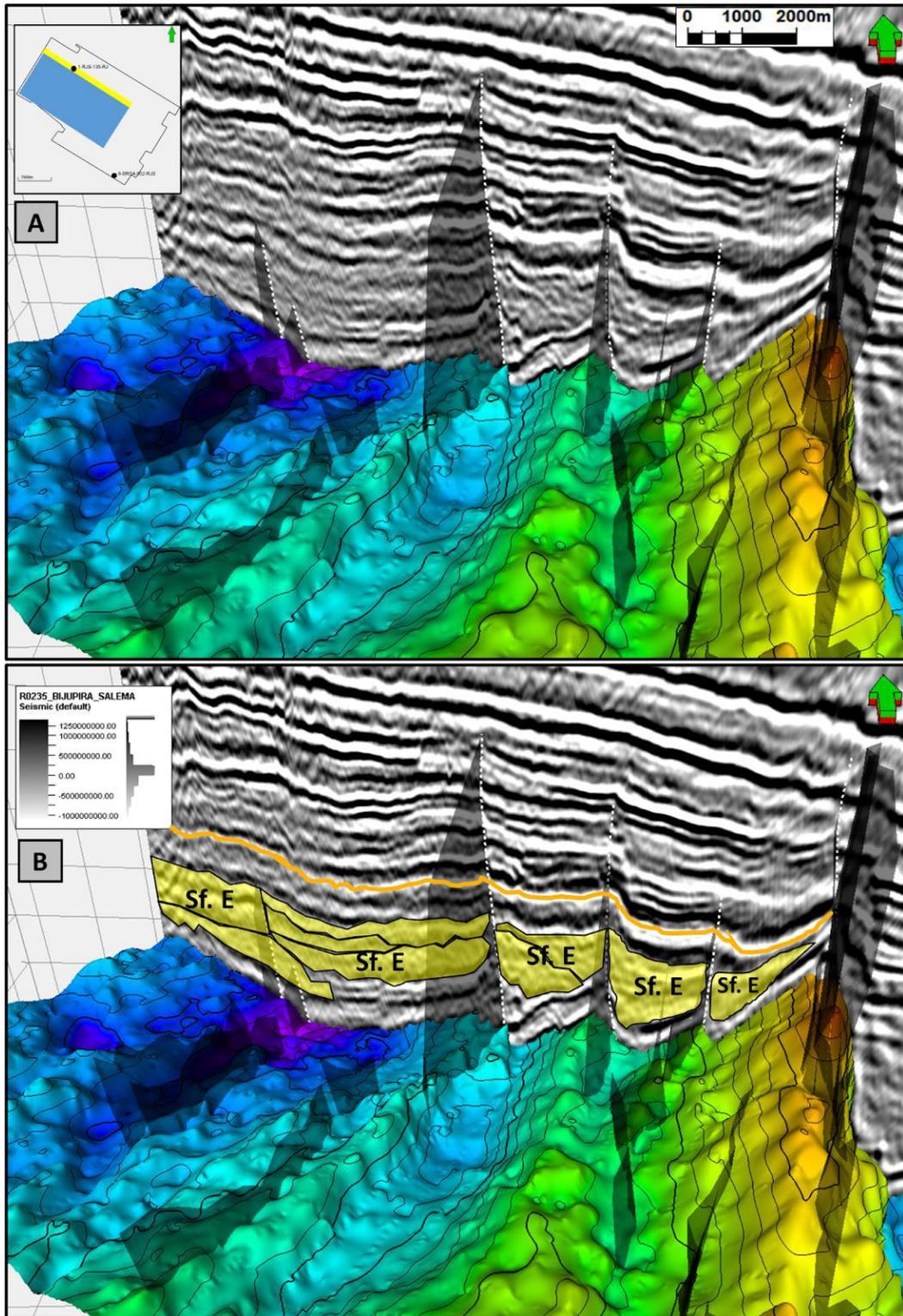


Figura 35 – a) Seção *Dip* 5819 em fase normal não interpretada, os planos de falha (preto) que segmentam a seção Pré-sal e, na base, porção centro-norte do mapa de contorno estrutural do embasamento acústico (em azul no mapa); b) Seção *Dip* 5819 com o sismo-horizonte I (laranja) e Sismofácies E (amarelo) interpretadas. Ênfase na geometria externa da sismofácies e nos espaços de acomodação identificáveis no mapa.

Uma vez que não foi possível diferenciar o embasamento cristalino da Formação Cabiúnas, considera-se que a Sismofácies F possa estar relacionada com essa unidade litoestratigráfica, sofrendo uma influência direta da mesma em termos genéticos. Outro fator que corrobora com essa suposição é a continuidade lateral dos refletores sísmicos que a compõem uma vez que é possível rastreá-los devido à sua fácil distinção sismofaciológica. Esses refletores positivos (preto) de fortes amplitudes parecem ter sido formados sincronamente, em um mesmo evento ou sucessivos eventos geológicos. Segundo Winter *et al.* (2007), a Formação Cabiúnas é composta por derrames basálticos e rochas vulcanoclásticas dispostas diretamente sobre o embasamento cristalino, condizente com a assinatura sísmica que essa sismofácies apresenta. Baseado nos estudos de margens de rifte de Gillard *et al.* (2016), assim como a Sismofácies E, essa sismofácies também pode ocorrer no estágio de rifte inicial de uma bacia sedimentar. Na Figura 36, pode-se notar que as primeiras rochas depositadas na margem Antártica-Australiana acompanham a topografia do embasamento, marcada por blocos falhados e composta por rochas magmáticas sobrepostas por sedimentos sin-tectônicos apresentando estruturas de crescimento.

Existe uma clara similaridade na geometria das Sismofácies E e F com a interpretação dos autores citados acima, porém, pela ausência de dados de poços na área de estudo que atinjam esse intervalo, não é possível tomar conclusões acerca das litologias que compõem essas unidades, propondo-se, assim, como próximos passos, a correlação dessas sismofácies com dados sísmicos e de poços próximos à área de estudo.

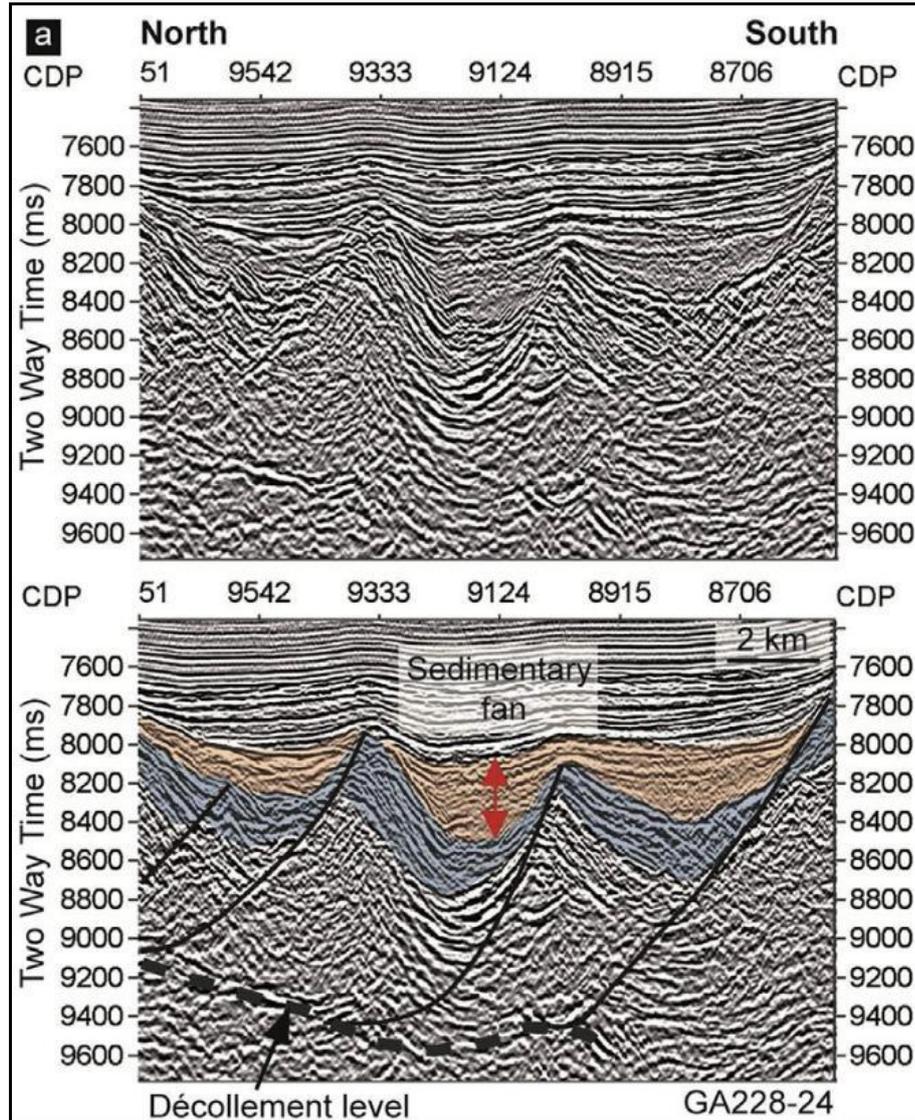


Figura 36 – Seção sísmica da margem passiva Antártica-Austrália, mostrando a relação genética de camadas vulcânicas escalonadas (azul) por falhas com o crescimento de estruturas sedimentares sobrejacentes (laranja). Notar a relação dos pacotes em questão com as Sismofácies F e E, respectivamente. Retirado de Gillard *et al.* (2016).

6.2 Caracterização das sismossequências

6.2.1 Controle estrutural na sedimentação

Ao analisar as seções sísmicas com as falhas geológicas interpretadas e o mapa de contorno do embasamento gerado, conclui-se que a principal característica estrutural da área de estudo é a segmentação estrutural do intervalo em regiões de dois baixos e um alto estrutural local centralizado, que secciona a área em duas porções distintas e afeta diretamente a deposição sedimentar até a Formação Retiro, principalmente nas sequências mais basais, evidenciado pela terminação dos refletores divergentes na sismossequência 1 em direção a esses dois depocentros na área de estudo (Figura 11).

A segmentação estrutural, evidenciada pelo diagrama de rosetas (q.v. Figura 22), se dá pela direção principal de falhas NE-SW que escalonam os blocos do embasamento e segmentam a área em uma série de hemi-grábens. A maioria das falhas possuem rumo N10E a N30E com vergência para SE. Esse trend preferencial é correlacionável ao processo de rifteamento da bacia de mesmo rumo que, segundo Guardado *et al.* (1989), é associado a esforços distensivos, formando uma série de horsts, grabens e hemi-grábens, limitados por falhas sintéticas e antitéticas de alto ângulo e rejeito.

Essa segmentação estrutural é fortemente evidenciada na seção *dip* 5819 (q.v. Figura 11), onde é possível notar o padrão escalonado do intervalo Pré-sal, fortemente influenciado pelas falhas. A cinemática é evidente principalmente nas sismossequências 1 e 2, onde a tectônica se encontra bem mais influente, com falhas mais frequentes, maiores rejeitos influenciando a continuidade dos refletores e as geometrias dos refletores concordantes com o escalonamento do embasamento.

Ao analisar a porção centro-sul da seção *dip* 5819 (q.v. Figura 16), nota-se que o padrão estrutural se assemelha muito às morfologias de sistemas de falhamentos internos a um hemi-gráben apresentados por Rosendhal *et al.* (1986), com a ocorrência de uma falha mestra e um sistema de falhas distributárias sintéticas e antitéticas (Figura 37).

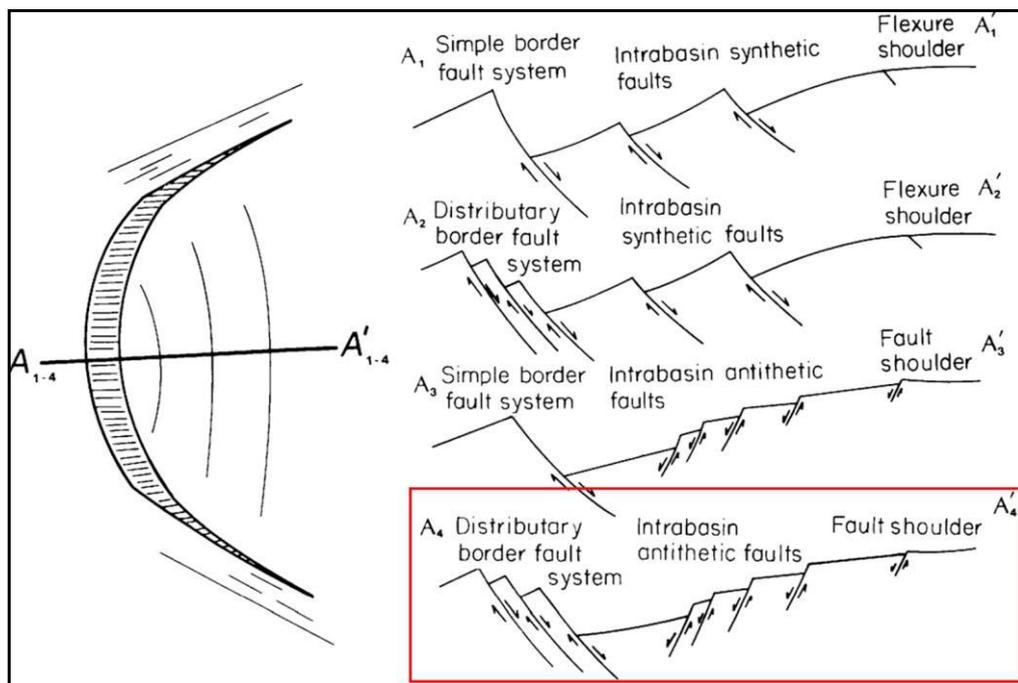


Figura 37 – Seções esquemáticas ilustrando variações morfológicas de sistemas de falhamentos encontrados em hemi-grábens em contexto de rifte. Ênfase na seção A4-A'4 (vermelho), ilustrando uma falha-mestra de borda associada a um sistema de falhas distributárias e falhas antitéticas. Modificado de Rosendhal *et al.* (1986).

Em contrapartida, nas seções strike (Figura 38), de direção NE-SW, nota-se que o horizonte do embasamento acústico ocorre de forma predominantemente horizontal, apresentando menores variações de profundidade e reforçando que o

principal trend estrutural da área é NE-SW, haja visto que o rumo dessas seções se dá paralelamente às principais falhas geológicas da área. Ainda assim, como apresentado na Figura 38, nota-se que existem algumas falhas menores com direção NW-SE e de mergulho para NE.

Na porção sudeste do alto estrutural local (q.v. Figura 16), podem ser identificados refletores de geometria plano-paralela nas sismossequências 2, 3 e 4, referentes à Sismofácies C, onde a terminação de refletores se dá na forma de uma discordância angular abrupta contra a falha principal. Já à noroeste do alto, nas mesmas sismossequências, é possível identificar refletores em que suas terminações são de *onlap* contra o alto estrutural, num estilo de terminação definida como *pinch-out*, indicando que, possivelmente, a sedimentação se deu de forma concordante à ativação dessas falhas (q.v. Figura 16).

Essa diferença de terminações dentro das mesmas sismossequências indica que a dinâmica da sedimentação desse intervalo se deu de formas distintas, na qual o alto estrutural atuou como uma barreira sedimentar entre as duas porções, seccionando os ambientes durante um mesmo intervalo temporal. Pelo fato dos refletores na porção sudeste ocorrerem na forma de uma discordância angular com o plano da falha principal, conclui-se que os mesmos teriam sido depositados anteriormente à deformação rúptil. Porém, devido à ausência de dados de poço nesse intervalo sedimentar, não é possível concluir acerca das litologias e suas relações com a interpretação estrutural do intervalo.

Ainda assim, como apresentado na Figura 38, notam-se algumas falhas com direção NW-SE de vergência para nordeste, que podem indicar alguma estruturação do embasamento do tipo rampa de transferência/revezamento (*relay ramps*), relacionada a falhas de alívio (*breaching faults*) em uma segmentação ortogonal, presente em ambientes de rifteamento, assim como apresentado nos modelos de McClay *et al.* (2005) (Figura 39). Porém, para concluir se de fato existem essas tensões ortogonais atuantes na área de estudo, estudos estruturais mais detalhados precisam ser realizados.

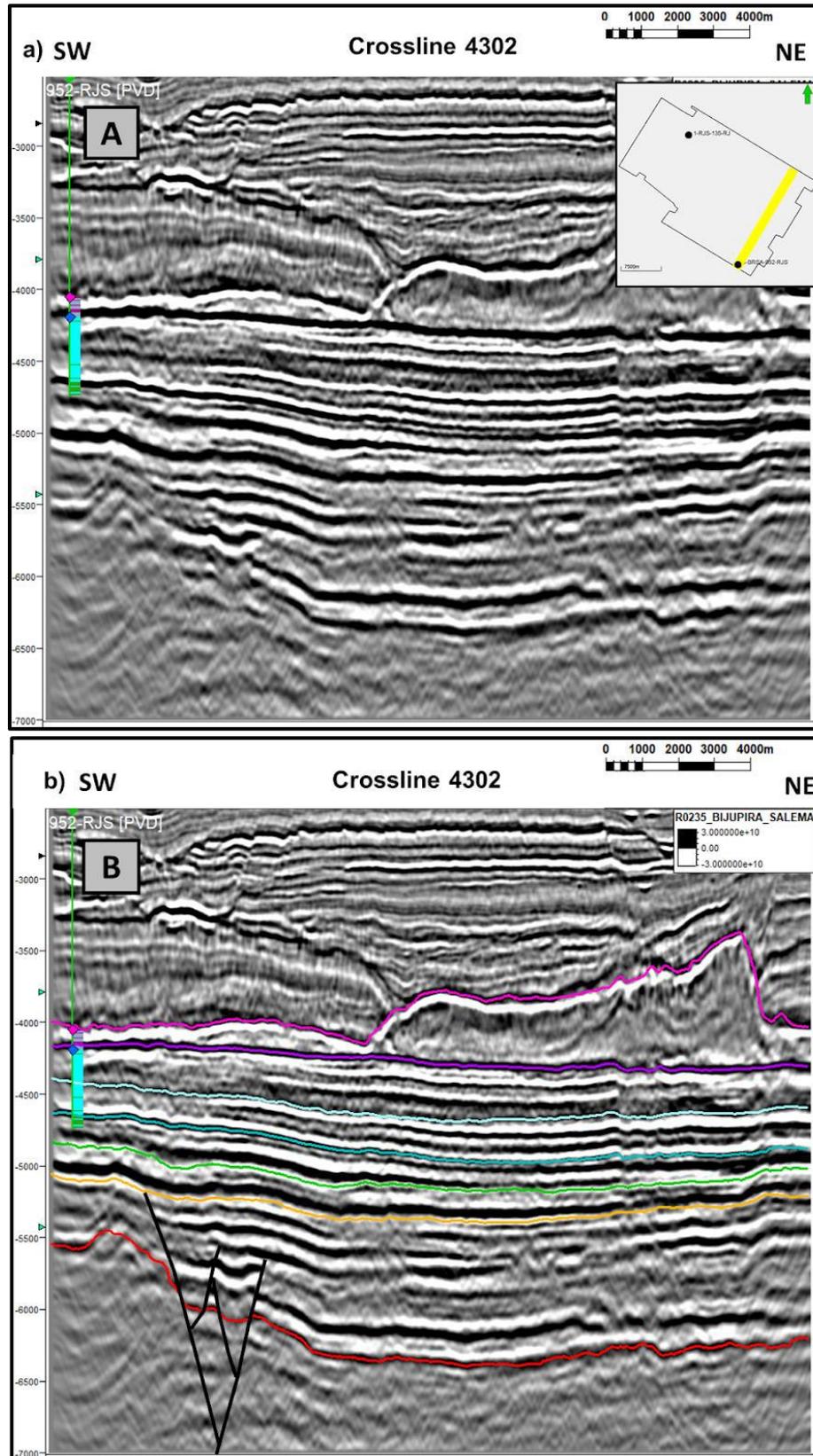


Figura 38 – (a) Seção sísmica *strike* 4302 sem interpretação; (b) Seção sísmica *strike* 4302 interpretada, mostrando o poço com perfil litológico, sismo-horizontes e falhas geológicas interpretadas. Notar o padrão plano-paralelo dos refletores sísmicos na direção NE-SW e a menor ocorrência de falhas ortogonais a essa seção.

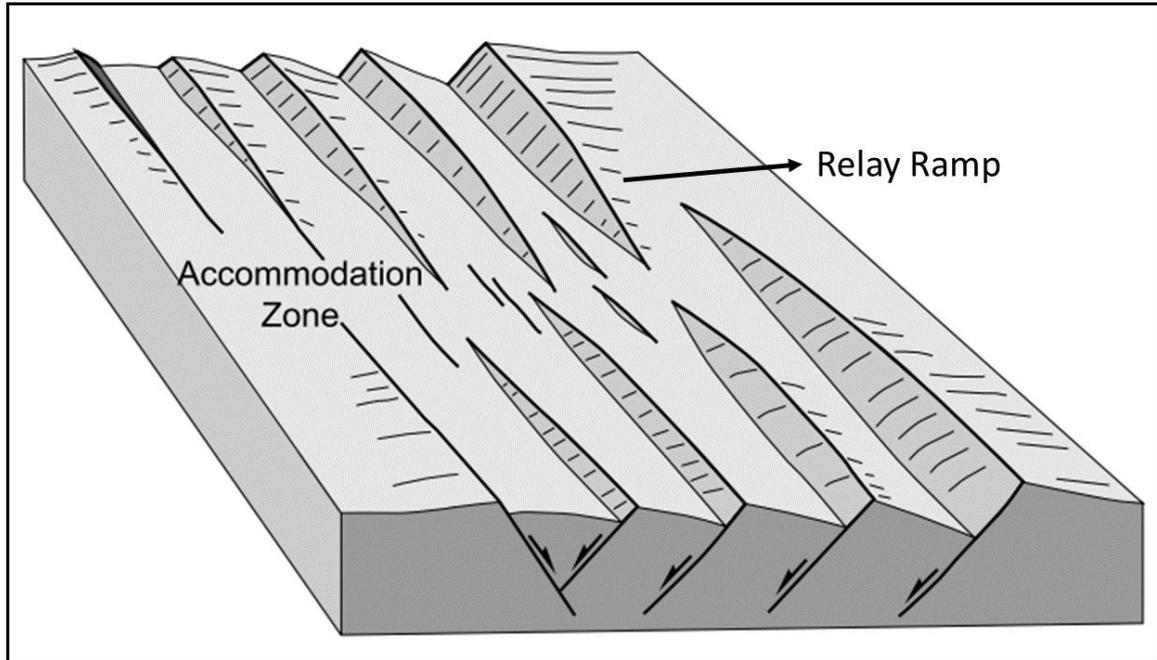


Figura 39 – Modelo conceitual esquemático de um sistema de rifte assimétrico com deslocamento de hemi-grábens. Notar o padrão escalonado de falhas, com a presença de estruturas do tipo rampa de transferência/revezamento (*relay ramps*), relacionada a falhas de alívio (*breaching faults*). Modificado de McClay *et al.* (2005).

Dessa forma, é possível apontar que as principais falhas da área de estudo são falhas deformadoras e, baseado na geometria e na interação da terminação dos refletores com o plano da falha principal, a sedimentação até o sismo-horizonte II pode ser classificada como Pré ou Sin-rifte. Além disso, haja visto que a tectônica continua ativa até a superfície do topo da Formação Coqueiros em determinadas falhas, conclui-se que não houve uma cessação completa das atividades até o Aptiano. Com isso, uma possível nomenclatura para os sismo-horizontes I e II poderia ser Discordância Rifte I e Rifte II, respectivamente, uma vez que esses horizontes representam discordâncias que delimitam sismossequências em um contexto de rifte ativo.

A questão acima pode ser suportada pelo esquema citado em Gillard *et al.* (2016) (Figura 40), onde os autores dissertam que uma mesma unidade litoestratigráfica pode receber diferentes nomenclaturas “crono-tectônicas”, a depender das relações sedimento-embasamento, da atuação de sistemas de falhas e sua relação com o tempo e espaço e da porção tectônica da bacia em que a unidade em questão está inserida. Portanto, salienta-se que as discussões conceituais aqui tomadas se resumem à conformação tectonossedimentar identificada na área de estudo exclusivamente, e não na configuração das unidades na bacia como um todo.

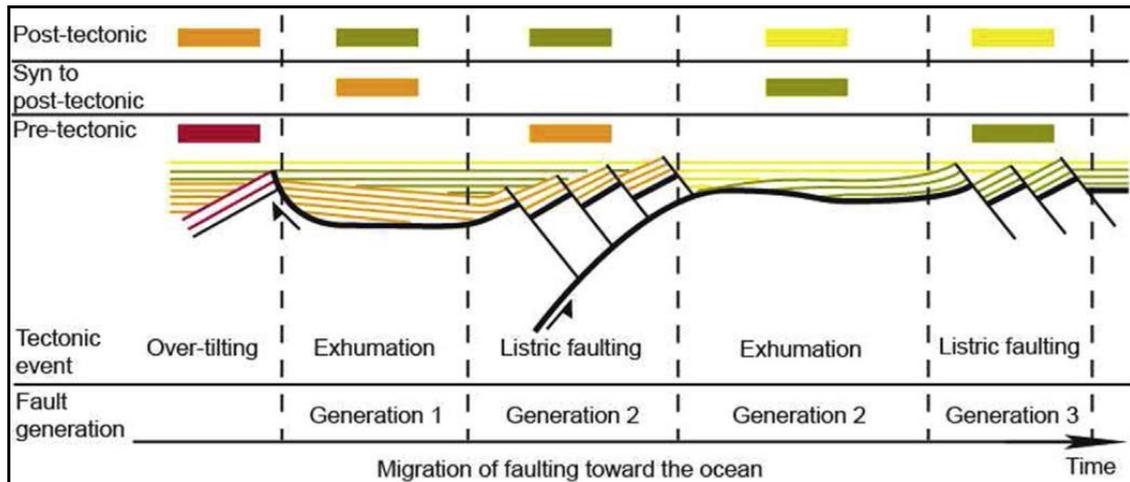


Figura 40 – Representação esquemática ilustrando as idades relativas de pacotes sedimentares definidas pela dinâmica de falhas ao longo de margens de rifte ativo, utilizado para dar embasamento às nomenclaturas de Discordância Rifte I e II, sugeridas para os sismo-horizontes I e II, respectivamente. Retirado de Gillard *et al.* (2016).

6.2.2 Evolução estratigráfica

Sismossequências 1 e 2

Baseando-se nas descrições de Winter *et al.* (2007), o sismo-horizonte I poderia ser associado à discordância Pré-Jiquiá na área de estudo. Essa discordância, segundo os autores, representa a discordância basal da Formação Coqueiros, que ocorre acima das Formações Itabapoana e Atafona e é representada por uma expressiva discordância e mudança litológica observada em sísmica. Essa classificação corrobora com as Sismofácies E encontrada abaixo dessa superfície em grande parte do intervalo de estudo, de geometria interna contorcida, descontínua e baixas amplitudes, que poderiam representar os sedimentos siliciclásticos das Formações Atafona e Itabapoana, em contraste com os refletores plano-paralelos da Sismofácies C, referentes à Formação Coqueiros.

Dessa forma, tendo em vista o possível contexto em que o sismo-horizonte III se insere, uma possível nomenclatura para o mesmo poderia ser “Discordância intra-Coqueiros” uma vez que, possivelmente, a base da Formação Coqueiros estaria abaixo dessa discordância. Porém, devido à ausência de dados de poço neste intervalo e de trabalhos similares a este na área de estudo, a relação entre as duas superfícies é inconclusiva, sobretudo por não haver dados cronoestratigráficos para suportar a correlação.

Segundo Bosence (1998), há um grande número de fatores controladores na estratigrafia de bacias rifte, porém a tectônica, o clima e o magmatismo são os agentes fundamentais que regem a deposição sedimentar (Figura 41). Dessa forma, leva-se a acreditar que os fatores climáticos se tornaram mais relevantes para a geração de aporte sedimentar e a sedimentação do que o tectonismo e o magmatismo a partir do sismo-horizonte II (ou “Discordância Rifte II”), haja visto que:

- As falhas são menos frequentes nas unidades acima dessa discordância;
- Não há indícios claros de ocorrência de rochas magmáticas no dado sísmico a partir desse intervalo;
- Há uma diferença notável nos padrões e ocorrência das sismofácies caracterizadas antes e após essa discordância;
- A conformação dos horizontes se torna paulatinamente mais plano-paralela a partir desse nível.

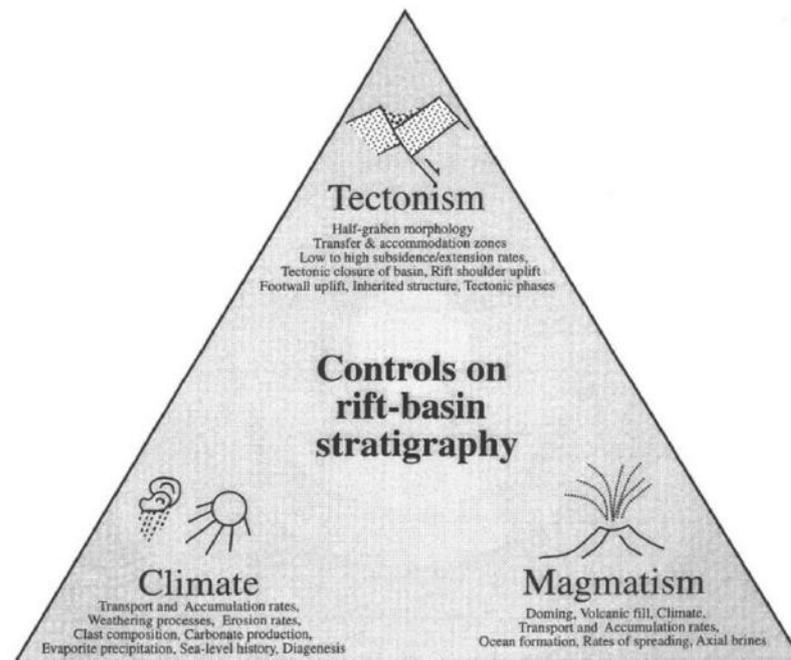


Figura 41 – Esquema representativo dos três principais fatores controladores da estratigrafia de bacias rifte. Retirado de Bosence (1998).

Dessa forma, o horizonte definido como “Discordância Rifte II” ocorre como um limite superior de pacotes sedimentares que sofrem alta influência tectônica na sua sedimentação e deformação. Acima dessa superfície, o intervalo de estudo seria o representativo da quiescência tectônica da área de estudo, com mínima influência de falhas na sedimentação e deformação dos estratos e maior ocorrência de refletores sísmicos plano-paralelos de ótima continuidade lateral, como visto nas sismofácies e mapas gerados.

Além disso, enquanto na porção noroeste o sismo-horizonte II não apresenta uma boa continuidade lateral e nem truncamentos evidentes, na porção sudeste os refletores sobrejacentes a ela truncam em *onlap* contra essa superfície, o que denota a possibilidade desse sismo-horizonte representar o término de um episódio erosional e o início de uma nova sucessão sedimentar (sismossequência), conforme a definição de sismossequências clássica de Mitchum *et al.* (1977a).

A Figura 11 ilustra a diferença de geometria dos refletores nas sismossequências no bloco central da área. Enquanto os refletores do topo da sismossequência 1 se encontram paralelos, na sismossequência 2 nota-se uma mudança de ângulo na geometria dos refletores, onde eles truncam em *downlap/onlap* contra o refletor negativo (branco) no meio da sequência. A variação

de espessura da isópaca da sismossequência 2 (q.v. Figura 26), presente nas regiões próximas à principal falha, poderia ser justificada por uma potencial erosão da unidade ou apresentado menor taxa de deposição sedimentar, devido à atividade tectônica. Já o aumento de espessura sob a forma de um lineamento no sentido NW-SE não apresentou claras justificativas para sua ocorrência, precisando ser melhor avaliada nos próximos passos desse trabalho.

Sismossequência 3

Ao avaliar o comportamento em mapa da espessura e superfície de topo desse intervalo, o mesmo aparenta constituir um pacote transicional entre a fase Rifte - representada pelas SS1 e SS2 - e uma fase de menor influência tectônica, com ocorrência majoritária de refletores plano-paralelos - representada pelas SS4 e SS5.

Dessa forma, ao detalhar a SS3, nota-se que o sismo-horizonte III, associado à Discordância intra-Coqueiros, ocorre como um limite superior do intervalo categorizado como o Rifte, o que leva a caracterizá-la, também, como a superfície-chave para o entendimento da redução da influência tectônica na área de estudo, uma vez que os pacotes sedimentares subjacentes à esta superfície são interpretados como intervalos que sofrem alta influência tectônica na sua sedimentação e deformação. Além disso, a partir da sismossequência 3, os refletores se conformam de forma plano-paralela, seguindo a geometria do sismo-horizonte II, e aparentemente sem influências notáveis de reativações tectônicas.

Como dito anteriormente, o sismo-horizonte III foi o mais basal do intervalo Pré-sal a ser perfurado e interpretado pelos poços 1-RJS-135-RJ e 6-BRSA-952-RJS e, de acordo com o perfil litológico, o intervalo perfilado referente a esse horizonte foi descrito como uma camada de folhelhos, corroborando com o resultado esperado baseado nos dados geofísicos interpretados (refletor plano-paralelo de amplitudes positivas e altos valores de raios gama nos perfis) e na bibliografia.

No ponto do poço 1-RJS-135-RJ, as amplitudes positivas apresentam seus mais altos valores na seção e, corroborando com os dados de poço disponíveis e na bibliografia referente a esse intervalo, essas características podem indicar um intervalo gerador de hidrocarbonetos (Figura 42). Dessa forma, é possível que esse horizonte sísmico represente um dos principais intervalos geradores da bacia, Buricica ou Jiquiá, porém, estudos mais aprofundados são necessários para definir essa suposição.

Além disso, a sismo-horizonte III ocorre na porção leste da área de estudo como uma superfície de discordância erosiva, onde os refletores subjacentes truncam em *onlap* sobre o baixo estrutural, seguindo a mesma lógica estratigráfica de início de ciclo deposicional do sismo-horizonte II nessa porção da área de estudo. Isso pode indicar que as sismossequências 2 e 3 representariam ciclos cronoestratigráficos similares em termos de dinâmica deposicional nessa porção do baixo estrutural, referentes a estágios finais da fase rifte na área.

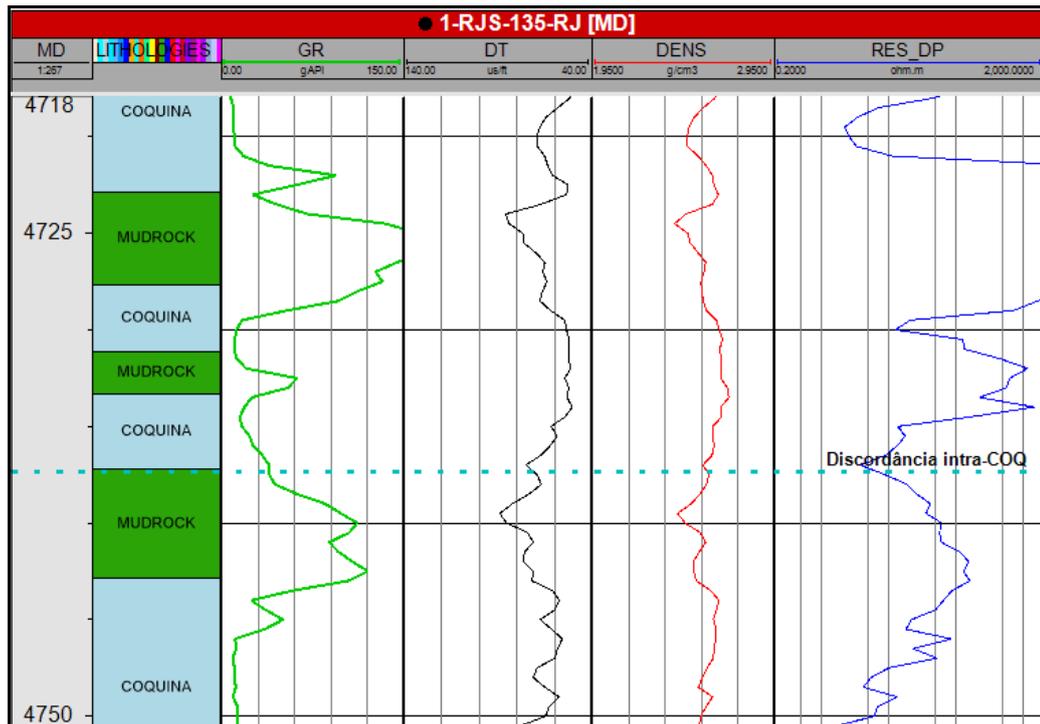


Figura 42 – Perfis geofísicos do poço 1-RJS-135-RJ, com ênfase no intervalo do sismo-horizonte III (pontilhado em azul). Notar o aumento das curvas de GR, DT e RES_DP logo após atingir a formação interpretada como folhelhos.

Sismossequência 4

Posicionada entre o sismo-horizonte III e o topo da Formação Coqueiros, a sismossequência 4 pode ser interpretada como representativa da porção superior da Formação Coqueiros na área de estudo.

Ao compará-la com os mapas gerados das demais unidades, a sismossequência 4 apresenta características bem diferentes das sequências subjacentes:

- Grau consideravelmente menor de influência pelo rejeito de falhas e da paleotopografia do embasamento acústico se comparado às sequências 1, 2 e 3;
- Maior ocorrência de refletores sísmicos plano-paralelos e de ótima continuidade lateral, referentes à Sismofácies C, ao longo de toda a sismossequência na área de estudo;
- Mapa de isópaca com pequenas variações totais de espessura.

Baseado nisso, pressupõe-se que essa sismossequência seria a seção sedimentar representativa da quiescência tectônica local. Os intervalos onde ocorrem a Sismofácies D poderiam estar associados às reativações de planos de falhas ou retrabalhamentos sedimentares em pequenos altos topográficos. Sendo assim, a superfície de topo (topo da Formação Coqueiros) dessa unidade poderia ser tratada como o topo do rifte da área de estudo.

Além disso, baseando-se na interpretação de um ambiente sedimentar lacustre proposto por Winter *et al.* (2007), nota-se que existe um predomínio de sedimentação no sentido sudeste, evidenciado pelas maiores espessuras na porção

Leste do dado e na terminação de alguns refletores sísmicos nessa Unidade progredindo em direção ao depocentro local.

Sismossequência 5

Analisando os marcadores de poço e as unidades litoestratigráficas, definiu-se que a unidade definida como sismossequência 5 é homônima à Formação Macabu, limitada em sua base pelo topo da Formação Coqueiros ou base da Formação Macabu, e no topo pelo topo da Formação Macabu ou base da Formação Retiro.

Baseado nos mapas gerados para esta sequência, conclui-se que a dinâmica deposicional se deu de forma homogênea, apresentando discretas variações de espessura na área de estudo, com as maiores variações relacionadas ao alto e baixo estrutural da porção centro-sul, sendo suficientemente atuantes na modificação da deposição local. No caso do alto estrutural central (Figuras 11 e 33), pressupõe-se que possa ter ocorrido um soerguimento do embasamento ou uma subsidência termal da porção à sudeste do mesmo, haja visto que o plano de falha principal é a única falha atuante na Formação Macabu em toda a área de estudo. Já o baixo estrutural a sudeste (Figuras 11 e 33), o declive acentuado aparenta estar diretamente associado ao soerguimento da região central, o que acabou basculando essa porção, gerando uma morfologia de plataforma local e propiciando a ocorrência de diferentes sismofácies das encontradas ao longo da Unidade.

Ao analisar a geometria dos refletores, nota-se que os horizontes plano-paralelos, aliados à ausência de falhas nesse intervalo estratigráfico, apontam uma sedimentação carbonática pós-tectônica que, segundo Winter *et al.* (2007), teriam sido depositados em um paleoambiente subaquoso e árido.

Seguindo o esquema-modelo proposto por Gillard *et al.* (2016) (Figura 40), a SS5 seria, comparativamente, a representação do intervalo pós-tectônico ou *sag* da área de estudo, uma vez que os refletores da base da Unidade truncam diretamente contra a superfície basal/topo da Formação Coqueiros mas apresentam poucos truncamentos internos na Unidade, tal como na porção noroeste da sismossequência 4, salvo em pontos onde há ocorrência da Sismofácies B.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como proposto inicialmente, foi possível identificar e discutir possíveis fatores condicionantes do preenchimento estratigráfico a partir da interpretação sismoestratigráfica do intervalo Pré-sal em um cubo sísmico 3D na bacia de Campos. O fluxo de trabalho proposto nos métodos permitiu a caracterização do intervalo Pré-sal em cinco sismossequências distintas, limitadas por seis sismo-horizontes e compostas por seis sismofácies. Com base nos conceitos de interpretação sísmica e sismoestratigrafia trazidos na bibliografia, foi possível caracterizar as seis sismofácies, baseando-se em seus principais parâmetros de reflexão, de modo a entender as relações de erosão e deposição ao longo das sismossequências, assim como as relações entre as sismofácies, de modo a compreender os padrões estratigráficos e discutir sobre a evolução estratigráfica das fases Rifte e Pós-Rifte na área de estudo.

A partir da caracterização de sismofácies, foram propostas interpretações estratigráficas para cada unidade definida. Sugere-se que a Sismofácies A representa carbonatos depositados em uma taxa de deposição constante sob regime de subsidência uniforme, enquanto a Sismofácies B pode estar relacionada a sedimentos carbonáticos retrabalhados. As feições montiformes encontradas em ambas as sismofácies podem representar bioconstruções carbonáticas de talude ou borda de plataforma, com sua ocorrência limitada à esta região de maior declive paleotopográfico. Já a Sismofácies C poderia representar uma intercalação de espessos pacotes de coquinas e folhelhos, depositados em um ambiente lacustre raso, bordejado por um recife de barreira, enquanto a Sismofácies D foi interpretada como remobilização e retrabalhamento de sedimentos em momentos de maior atividade tectônica. Por fim, as Sismofácies E e F podem representar estruturas sedimentares aluviais e rochas vulcânicas e vulcanossedimentares, respectivamente.

A respeito da ocorrência das sismofácies ao longo das unidades, na sismossequência 1, ocorrem sobretudo as Sismofácies E e F, com ocorrência das Sismofácies C no baixo estrutural sudeste e alguns pacotes da Sismofácies D no topo dessa unidade. Na sismossequência 2, ocorrem as Sismofácies C, D e E, sendo as duas últimas diretamente relacionadas aos planos de falha e ao alto estrutural central. Nas sismossequências 3 e 4, ocorrem as Sismofácies C e D, com a última quase sempre associada a altos paleotopográficos e a Sismofácies C aumentando sua ocorrência gradualmente, à medida que se sobe na estratigrafia. Por fim, na sismossequência 5, ocorrem exclusivamente as Sismofácies A e B, sendo a primeira dispersa por toda a área de estudo e a última concentrada espacialmente em porções de talude ou maior declive topográfico.

Os mapas de isópaca gerados demonstraram uma direta influência do embasamento na espessura das sismossequências 1 e 3, enquanto na sismossequência 4 a influência do embasamento e da atividade tectônica se tornam progressivamente menores na deposição e configuração estratigráfica, configurando-se como um pacote “transicional”, no que diz respeito à influência tectônica e climática. Na Formação Macabu, os mapas gerados apontam uma menor influência direta da tectônica, corroborando com a ideia dessa unidade

pertencer à fase Pós-Rifte, com exceção da falha principal, cuja presença possivelmente condiciona a porção sudeste a apresentar as maiores espessuras nessa unidade. Já o aumento de espessura na isópaca da sismossequência 2, sob a forma de um lineamento no sentido NW-SE, não apresentou claras justificativas para sua ocorrência, precisando ser melhor avaliada nos próximos passos desse trabalho.

A partir da interpretação sísmica, mapa de contorno do embasamento e diagrama de roseta gerados, conclui-se que a segmentação estrutural da área de estudo se dá pela direção principal de falhas NE-SW que escalonam os blocos do embasamento e segmentam a área em uma série de hemi-grábens. Esse *trend* preferencial é correlacionável ao processo de rifteamento da bacia de mesma direção que proposto por Guardado *et al.* (1989). O padrão estrutural de falhamentos é similar ao apresentado por Rosendhal *et al.* (1986), com a ocorrência de uma falha mestra e um sistema de falhas distributárias sintéticas e antitéticas. Além disso, a diferença de terminação de refletores dentro das mesmas sismossequências indica que a dinâmica da sedimentação desse intervalo se deu de formas distintas, na qual o alto estrutural atuou como uma barreira sedimentar entre as duas porções, seccionando os ambientes durante um mesmo intervalo temporal.

Foi proposta uma possível nomenclatura para os sismo-horizontes I e II como “Discordância Rifte I e Rifte II”, respectivamente, uma vez que esses horizontes delimitam sismossequências em um contexto de rifte ativo. O sismo-horizonte I pode também ser a expressão sísmica da discordância pré-Jiquiá na área de estudo, uma vez que essa é representada por uma expressiva discordância e mudança litológica observada em sísmica, de acordo com Winter *et al.* (2007). Foram propostas também as nomenclaturas de “Discordância intra-Coqueiros” para o sismo-horizonte III, uma vez que, possivelmente, a base da Formação Coqueiros pode estar abaixo dessa discordância, e a de “Discordância Topo do Rifte” para o sismo-horizonte IV/topo da Formação Coqueiros, tendo em vista que a sismossequência 4 foi interpretada como a seção sedimentar associada à quiescência tectônica local.

7.1 Próximos passos

Como recomendações para o aprimoramento e continuação deste trabalho, são propostos os seguintes pontos:

- Correlação de poços: tendo em vista a disponibilidade de dois poços na área de estudo, propõe-se a realização de correlação entre esses poços, de modo a analisar as variações petrofísicas, litológicas e de profundidade entre ambos e tentar estabelecer algum padrão para uma caracterização do intervalo mais criteriosa.
- Modelagem geológica e estrutural (1D e/ou 3D): tendo em vista a caracterização do intervalo em sismossequências e a disponibilidade de dados petrofísicos, a modelagem geológica e estrutural poderia auxiliar na construção de um arcabouço tectonossedimentar e na reconstrução estrutural da área de estudo, de modo a estabelecer melhores relações cronológicas e estratigráficas entre as unidades em questão.

- Análise regional: aquisição de seções sísmicas 2D que cubram uma área superior à do presente trabalho, de forma a poder avaliar mais regionalmente as particularidades tectonoestratigráficas do volume sísmico e melhor apurar as hipóteses de reconstrução e evolução geológica da área.
- Menor escala de trabalho: individualização do intervalo de estudo em mais sismofácies e sismossequências, de forma a gerar uma caracterização mais criteriosa e descritiva.
- Mapeamento da continuidade lateral das sismofácies: ao contrário dos sismo-horizontes, as sismofácies foram mapeadas apenas em algumas seções sísmicas, de forma que sua abrangência lateral não foi avaliada. Determina-se, como próximos passos, a realização dessa etapa, de modo a gerar mapas de contorno para cada sismofácies e a geração de *geobodies* para cada unidade.
- Sismossequência 2: avaliação mais criteriosa desse intervalo de estudo, de modo a compreender as maiores espessuras no sentido NW-SE que não seguem o padrão de isópaca das outras unidades como, por exemplo, a aplicação do *flattening* nos sismo-horizontes I e II, e a identificação da terminação dos refletores internos à estrutura em questão.
- Possível intervalo gerador: interpretação sísmica do refletor com altos valores de amplitude positiva e altos valores de raios gama, de forma a mapeá-lo ao longo da área de estudo e entender se há algum controle estrutural relacionado à sua ocorrência.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MASGARI AA-S, ELSAADANY M, ABDUL LATIFF AH, HERMANA M, HAMZAH UB, BABIKIR I, ADELEKE T, SOHAIL IMRAN Q, AL-BARED MAM. Seismic Sequence Stratigraphic Sub-Division Using Well Logs and Seismic Data of Taranaki Basin, New Zealand. **Applied Sciences**. 2021; 11(3):1226.

ALMEIDA, F. F. M., CARNEIRO, C. D. R., MIZUSAKI, A. M. P. 1996. Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. **Revista Brasileira de Geociências**, 26(3): 125–138.

ALVARENGA, R.S., IACOPINI, D., KUCHLE, J., SCHERER, C.M.S., GOLDBERG, K. 2016. Seismic Characteristics and Distribution of Hydrothermal Vent Complexes in the Cretaceous Offshore Rift Section of the Campos Basin, Offshore Brazil. **Marine and Petroleum Geology**. 74 (12-25).

ASMUS, H.E., GOMES, J.B., PEREIRA, A.C.B., 1971. Integração geológica regional da Bacia do Espírito Santo. Anais vol. 3, 235–252. **Congresso Brasileiro de Geologia**, 25. São Paulo, SBG

BAUMGARTEN, C.S.; DUTRA, A.J.C.; SCUTA, M.S.; FIGUEIREDO, M.V.L; SEQUEIRA, M.F.P.B., 1988. Coquinas da Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos: evolução da geologia e de desenvolvimento. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro, v.2, n.1, p. 27-36.

BARNES, A., 2016. Handbook of Poststack Seismic Attributes. (A. Barnes, Ed.) Tulsa: **Society of Exploration Geophysicists**.

BASTOS, G., BASTOS, I. P., 2017. Bacia de Campos - Sumário Geológico e Setores em Oferta - 14ª Rodada. Superintendência de Definição de Blocos/SDB, **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 18 p

BULHÕES, E.M., DE AMORIM, W. N., 2005. Princípio da SismoCamada Elementar e sua aplicação na Técnica Volume de Amplitudes (tecVA). In: **9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. European Association of Geoscientists & Engineers.

CAINELLI, C., & MOHRIAK, W.U. 1999. General evolution of the eastern Brazilian continental margin. **The Leading Edge**, p. 800-804.

CASTRO, R.D., PICOLINI, J.P. 2014. Principais aspectos da geologia regional da Bacia de Campos. In: Kowsmann, R.O., editor. Geologia e Geomorfologia. **Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats**, v. 1. p. 1-12.

CATUNEANU, O., 2006. Principles of Sequence Stratigraphy. **Elsevier**, Amsterdam. 375 pp

CHANG, H.K., KOWSMANN, R.O., FIGUEIREDO, A.M.F., BENDER, A.A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the east Brazil rift system - an overview *Tectonophysics*, 213, pp. 97-138

CHOPRA, S., MARFURT, K.J., 2007. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. **Society of Exploration Geophysicists** - Geophysical Developments Series, Tulsa – USA, 11: 463p.

DIAS, J.L.; SCARTON, J.L.; ESTEVES, F.R.; CARMINATTI, M.; GUARDADO, L.R. 1990. Aspectos da evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (coords). Origem e Evolução das Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro: **Petrobrás**, p. 333-360.

GILLARD, M., AUSTIN, J., & MANATSCHALI, G. 2016. Fault systems at hyper-extended rifted margins and embryonic oceanic crust: Structural style, evolution and relation to magma. **Marine and Petroleum Geology**, 76, 51–67.

GUARDADO, L.R.; GAMBOA, L.A.P.; LUCCHESI, C.F. 1989. Petroleum geology of the Campos basin, Brazil: a model for producing Atlantic type basins. In: EDWARDS, J.D., SANTOGROSSI, P.A. Divergent/Passive Margin Basins. Tesla: **AAPG Memoir**, 1989. v.48, p. 3-79.

GUARDADO, L.R.; SPADINI, A.R.; BRANDÃO, J.S.L.; MELLO, M.R. 2000. Petroleum system of the Campos Basin. In: Mello M.R. & Katz B.J. (eds.) Petroleum systems of South Atlantic margins: **American Association Petroleum Geologists Memoir**, 73: 317-324

MCCLAY, K.R., DOOLEY, T., WHITEHOUSE, P.S. & ANADON-RUIZ, S. 2005. 4D analogue models of extensional fault systems in asymmetric rifts: 3D visualisation and comparisons with natural examples. In: Dore, A.G. & Vining, B.A. (eds) Petroleum Geology: North West Europe and Global Perspectives – Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference. **Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series**, 6, 1543– 1556

MITCHUM JR., R.M., VAIL, P.R. & THOMPSON III, S. 1977a, 'Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis', In: Payton, C.E. (ed.), Seismic Stratigraphy applications to hydrocarbon exploration – **Memoir 26, American Association of Petroleum Geologists**, Tulsa, Oklahoma, Part 2, pp. 53-62.

MITCHUM JR., R.M., VAIL, P.R. & SANGREE, J.B. 1977b, 'Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences', In: Payton, C.E. (Ed.), Seismic Stratigraphy applications to hydrocarbon exploration – **Memoir 26, American Association of Petroleum Geologists**, Tulsa, Oklahoma, Part 6, pp. 117-133.

MIZUSAKI, A.M. 1986. Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos – caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal do Rio de Janeiro**.

MOHRIAK, W.U., 2003. Bacias sedimentares da margem continental brasileira. In: Bizzi, L.A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R.M.; Gonçalves, J.H. (eds.) Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Brasília: **CPRM**, 2003 Cap.III, p. 87-165.

MOHRIAK, W.U., SZATMARI, P., ANJOS, S.M.C., 2008. Sal: Geologia e Tectônica. Exemplos nas Bacias Brasileiras. **Editora Beca**, São Paulo.

MOREIRA, J. L. P.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M.A.P Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobras** 15, p 531–549, 2007.

MUNIZ, M. C. & BOSENCE, D. W. J. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (Offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. **Geological Society**, London, Special Publications, 418, p 221– 242, 2015.

OLIVITO, J. P. R., & SOUZA, F. J. (2020). Depositional model of early cretaceous lacustrine carbonate reservoirs of the Coqueiros formation-northern Campos Basin, southeastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, 111, 414–439.

PETERS, E. J. Advanced Petrophysics: Geology, Porosity, Absolute Permeability, Heterogeneity, and Geostatistics. 1. ed. **Austin: Live Oak**, 2012. v.1.

RANGEL, H.D.; MARTINS, F.A.L.; ESTEVES, F.R.; FEIJÓ, F.J., 1994. Bacia de Campos. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro, v.8, n.1, p.203-217.

RIDER, M.H. 2002, The geological interpretation of well logs, 2nd Ed, Sutherland, Scotland: **Rider-French Consulting**.

ROSENDAHL, B. R.; REYNOLDS, D. J.; LORBER, P. M.; BURGESS, C. F.; MCGILL, J.; SCOTT, D.; LAMBIASE, J. J. and DERKSEN, S. J., 1986. Structural expressions of rifting: lessons from Lake Tanganyika, África. In: FROSTICK, L. E.; RENAUT, R. W.; REID, I., TIERCELIN, J. J. (Ed.) **Sedimentation in the African Rifts**. **Oxford: Geological Society**, v.25, p. 29-43.

SABOIA, R. H., 2022. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. Superintendência de Desenvolvimento e Produção/SDP, **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 34 p.

SCHALLER, H., 1973. Estratigrafia da Bacia de Campos, **Congresso Brasileiro de Geologia**, Aracajú, 1972. SBG. V. 3

SCHINELLI, M. C. 2013. Material didático para o curso de interpretação sísmica para geólogos. **ABGP**, Rio de Janeiro-RJ, Brasil (Apostila).

SEVERIANO RIBEIRO, H.J.P. 2001, Estratigrafia de sequências: fundamentos e aplicações, São Leopoldo, RS: **Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos**.

TANER, M. T., SCHUELKE, J. S., O'DOHERTY, R. and BAYSAL, E., 1994, Seismic attributes revisited: **64th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts**, 94, 1104-1106.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P; KEYS, D.A. (1976) Applied Geophysics. **Cambridge University Press**, Cambridge, 860 p.

THOMAZ-FILHO, A., A. M. P. MIZUSAKI, E. J. Milani & P. CESERO. 2000. Rifting and magmatism associated with the South America and Africa break up. **Revista Brasileira de Geociências**, 30(1): 17–19.

VAIL, P.R.; TODD, R.G.; SANGREE, J.B., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 5: Chronostratigraphic significance of seismic reflections. In: Payton, C.E. (Ed.), In: **Seismic Stratigraphy—Application to Hydrocarbon Exploration**, vol. 26. **American Association of Petroleum Geologists Memoir**, pp. 99–116.

WINTER, W.R. JAHNERT, R.J.; FRANÇA, A.B., 2007. Bacia de Campos. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 511-529.

APÊNDICE A – REFERENCIAL TEÓRICO

Fez-se necessária uma estudo dos referenciais teóricos de forma a ter uma melhor compreensão das atividades a serem realizadas e dos resultados e discussões desenvolvidos ao longo deste trabalho, no que diz respeito à poços de petróleo (petrofísica), sísmica e interpretação sismoestratigráfica (terminação de refletores, configuração de refletores e sismofácies ou fácies sísmica).

Poço

Os dados de poço são essenciais para a verificação e calibração da interpretação geológica realizada com os dados sísmicos, visto que a sísmica representa um dado indireto de observação em subsuperfície. Segundo Peters (2012), petrofísica é o estudo de propriedades físico-químicas das rochas e suas interações com os fluidos. Dessa forma, a perfilagem de poço é baseada na obtenção de parâmetros físicos das rochas, durante ou após a perfuração do poço.

As propriedades petrofísicas medidas são utilizadas para interpretar características como litologia, conteúdo de fluido, porosidade, volume de água e de argila, velocidade intervalar, etc. Para auxiliar a interpretação sísmica, por exemplo, também podem ser utilizados perfis geofísicos de raios-gama (GR) e acústico (DT), de modo a contribuir na interpretação geológica e correlação de dados (RIDER, 2002). No caso do presente trabalho, os principais perfis geofísicos utilizados foram os de raios gama, sônico e densidade.

O perfil de raios gama (*gamma ray log* ou GR) mede a radioatividade natural das rochas emitida pelos elementos instáveis ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K em conjunto. A radioatividade medida é expressa em graus API (American Petroleum Institute). A maioria das rochas sedimentares apresentam radiação gama natural, sendo as rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos e calcilutitos) as mais radioativas, devido ao alto conteúdo de potássio (K) presente em minerais como filossilicatos e feldspatos potássicos e, por vezes, ao alto teor de urânio (U) associado à matéria orgânica. Essa diferença de radioatividade permite que a ferramenta de GR diferencie as litologias perfiladas entre folhelho e “não folhelho”. Além disso, outras aplicações para o GR seriam a correlação de poços, identificação generalizada de litologias (presença ou ausência de argila) e quantificação do volume de argila (*Vshale*) (RIDER, 2002).

O perfil sônico (*sonic log*, DT ou DTC) mede o tempo de trânsito de um pulso acústico entres dois pontos fixos de uma formação no poço, chamados de transmissores e receptores. A unidade do perfil sônico se dá por microssegundos por pés (us/ft), ou seja, quanto menor o valor medido, maior é a velocidade de propagação da onda naquele intervalo litológico. Por isso, o perfil sônico também pode ser definido como a medição da vagarosidade da onda acústica. De um modo geral, as altas velocidades estão associadas a litologias como carbonatos, evaporitos, basaltos e rochas siliciclásticas compactadas, enquanto as velocidades médias associam-se a arenitos e baixas estão relacionadas com folhelhos. As aplicações do perfil sônico vão desde a calibração poço-sísmica (relação tempo

sísmico-profundidade) a inferências quanto ao grau de fraturamento, porosidade, compactação e cimentação de um intervalo rochoso (RIDER, 2002).

O perfil de densidade (*density log* ou RHOB) é obtido por uma ferramenta que bombardeia radiação gama para a formação. Dessa forma, a quantidade de radiação refletida representa os valores de densidade da formação (*bulk density*), logo, quanto maior a radiação refletida, maior a densidade medida da rocha. A unidade de medida do perfil de densidade se dá pela massa por volume (g/cm³), e tem como algumas de suas aplicabilidades a interpretação geológica, o apoio à calibração poço-sísmica, a estimativa de porosidade e a identificação de zonas de hidrocarbonetos (quando em análise conjugada ao perfil de Neutrão) (RIDER, 2002).

Sísmica

A sísmica de reflexão é um dos principais dados utilizados em estudos em subsuperfície, especialmente na indústria de energia. O método sísmico consiste na utilização de ondas elásticas compressionais, geradas artificialmente por fontes emissoras como *airguns* que são refletidas ao entrar em contato com as diferentes interfaces (litologias) presentes em subsuperfície e registradas por meio de geofones ou hidrofones - estes dispersos ao longo da lâmina d'água, quando a aquisição ocorre *offshore* - gerando, assim, refletores sísmicos, através do contraste de impedância acústica das camadas, definida como o produto entre a velocidade e a densidade do meio (TELFORD *et al.*, 1976). As reflexões sísmicas são, por definição, o registro do tempo de ida e volta de ondas sísmicas geradas artificialmente na superfície e refletidas nas interfaces físicas das rochas em subsuperfície, que podem corresponder a superfícies razoavelmente isócronas, de caráter deposicional, ou erosivo (VAIL *et al.*, 1977b).

Essas superfícies (ou refletores sísmicos), por sua vez, demarcam limites de contrastes de impedância acústica entre dois meios (pacotes rochosos) fisicamente distintos entre si. É importante ressaltar que os refletores nem sempre correspondem a contatos litológicos já que, muitas vezes, os contatos entre litologias são gradacionais, mascarando uma interface nítida e ocasionando em respostas sísmicas ambíguas ou mais sutis. Por outro lado, os refletores que apresentam uma boa continuidade lateral são excelentes para a demarcação de horizontes sísmicos, assim, sendo possível estabelecer superfícies estratigráficas que separam intervalos com impedâncias acústicas distintas (SHERIFF, 2002).

Interpretação sismoestratigráfica

A sismoestratigrafia é um método de interpretação estratigráfica indireto feito com base em dados sísmicos, aplicando-se à subdivisão, correlação e mapeamento de rochas sedimentares (MITCHUM *et al.*, 1977a). Por meio dessa metodologia, as terminações e configurações dos refletores sísmicos são interpretados como padrões de estratificação de pacotes litológicos, o que permite uma ampla visualização das feições deposicionais e estratigráficas e, assim, uma melhor compreensão de eventos tectonossedimentares durante a evolução de uma bacia (SEVERIANO RIBEIRO, 2001).

Um dos princípios básicos da sismoestratigrafia é o de considerar que as reflexões sísmicas seguem linhas de tempo síncronas, em oposição às unidades litoestratigráficas, que são definidas com base nas variações litológicas e, muitas vezes, não respeitam as linhas de tempo, se apresentando diácronas. As interfaces geradoras das reflexões entre dois pacotes com contraste acústico correspondem, principalmente, às superfícies estratais e discontinuidades estratigráficas (SEVERIANO RIBEIRO, 2001).

Sismossequências ou unidades sísmicas são sequências deposicionais que podem ser observadas através de dados sísmicos, representadas por um grupo ou pacote de refletos sísmicos geneticamente relacionados e limitados. Conforme ilustrado na Figura A-1, essas sequências são delimitadas, em sua base e topo, por erosões ou hiatos registrados como grandes inconformidades e suas conformidades correlatas que podem ser correlacionadas regionalmente (MITCHUM *et al.*, 1977a). As sismossequências possuem um grande significado temporal, podendo representar mudanças no padrão de empilhamento, alterações no ambiente de sedimentação ou um hiato deposicional.

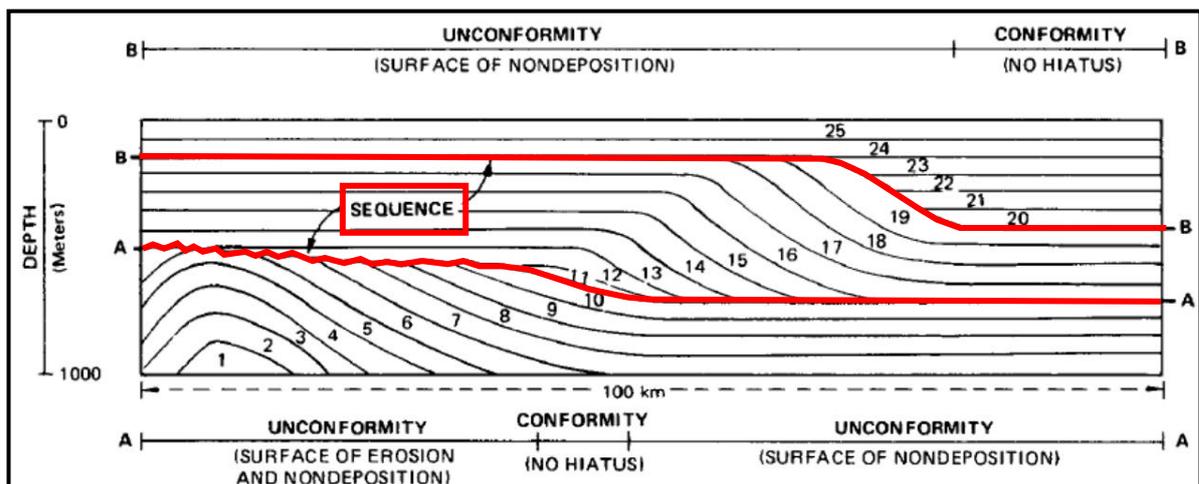


Figura A-1 – Esquema representando inconformidades e sismossequências em seções sísmicas. Ênfase nas superfícies limitantes de topo e base da sismossequência. Modificado de Mitchum *et al.* (1977a).

Terminação de refletos

Os padrões de terminações de reflexões são definidos como a relação geométrica entre os estratos e a superfície estratigráfica em que terminam. Essas relações (Figura A-2) podem ser encontradas de maneira concordante ou discordante e normalmente são mais bem observadas em maiores escalas (CATUNEANU, 2006; SEVERIANO RIBEIRO, 2001).

De modo geral, os refletos sísmicos são classificados entre os que apresentam terminações superiores (de topo) e inferiores (de base). As terminações são classificadas, de acordo com Vail *et al.* (1977b) e Mitchum *et al.* (1977a), da seguinte forma:

Os de limites superiores são marcados por truncamentos erosionais e *toplaps*.

Truncamentos erosionais – trata-se da terminação de um estrato contra uma superfície erosional sobreposta (Figura A-3). Implica no desenvolvimento de uma inconformidade angular ou feição erosiva acentuada, resultante da remoção do seu limite deposicional original. Existem, também, os truncamentos estruturais, feições que podem ser geradas por falhas geológicas, halocinese e estruturas ígneas, por exemplo.

Toplap – corresponde à terminação de estratos inclinados que truncam, mergulho acima, em uma superfície menos inclinada (Figura A-3). Ocorrem em decorrência de uma pequena taxa de erosão ou da não-deposição naquele intervalo, por meio do *bypass* deposicional. São feições geralmente locais e não-correlatas em escala regional.

Limites inferiores, por sua vez, são marcados por *onlaps*, *downlaps* e *offlaps*.

Onlap – forma-se quando um estrato, inicialmente horizontal, trunca contra uma superfície inclinada ou quando um estrato com certa inclinação termina, mergulho acima, contra uma superfície de maior inclinação (Figura A-3). Geralmente ocorre na base das sucessões sedimentares e registra o início do ciclo de sedimentação. Essas feições também podem ser classificadas como *onlap* costeiro - quando em ambientes costeiros ou fluviais - ou *onlap* marinho - quando em ambientes marinhos propriamente ditos.

Downlap – ocorre quando um estrato inicialmente inclinado termina, mergulho abaixo, contra uma superfície originalmente horizontal ou inclinada, com as terminações apontando para baixo (Figura A-3). Pode também ser chamada de *baselap* - utilizado quando não é possível distinguir o *downlap* de um *onlap* - e marca a base de uma unidade sedimentar. Sua gênese pode estar relacionada tanto com a regressão normal como com a regressão forçada.

Offlap – pode ser encontrado em uma sequência de estratos inclinados em que cada intervalo é sucedido lateralmente por unidades progressivamente mais jovens (Figura A-3). É produto da queda do nível de base e, portanto, sua presença indica a ocorrência de regressão forçada.

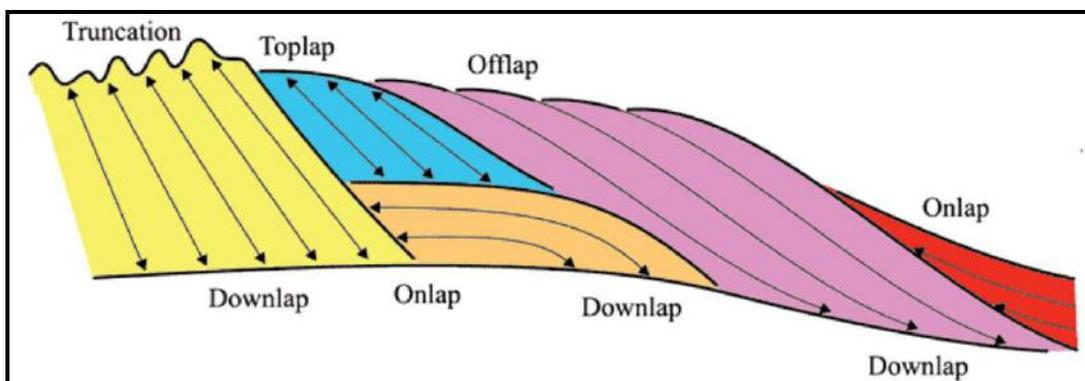


Figura A-2 – Padrões de terminação de refletores dentro de uma sequência sísmica idealizada. Retirado de Catuneanu (2006).

Sismofácies (fácies sísmica)

Além da análise de terminações dos refletores, o reconhecimento de sismofácies é fundamental para a caracterização de sequências deposicionais. Assim, sismofácies ou fácies sísmicas são definidas como unidades tridimensionais, bem definidas no espaço, compostas por um conjunto de reflexões sísmicas cujos parâmetros inerentes - isto é, seus atributos físicos - as diferem das fácies adjacentes, sobrejacentes e subjacentes. Trata-se da resposta a diversos fatores físicos e geológicos registrados nas reflexões e, através de sua análise, busca-se reconhecer padrões e compreender as relações existentes para se chegar à interpretação e entendimento dos aspectos geológicos envolvidos (SEVERIANO RIBEIRO, 2001; MITCHUM *et al.*, 1977a).

Segundo Mitchum *et al.* (1977a), na interpretação das fácies sísmicas ou sismofácies, são descritos determinados parâmetros e padrões de reflexão, observados numa sismossequência ou sismossequência (Figura A-3). Dentre os principais parâmetros, destacam-se a configuração interna, geometria externa e continuidade lateral dos refletores, velocidade intervalar, frequência dos estratos/reflexões e suas amplitudes. Segundo esses autores, a continuidade dos refletores tem relação com a continuidade da deposição sedimentar; as amplitudes têm relação com a velocidade, espessura e a diferença de densidade entre as camadas, enquanto a frequência sísmica está ligada à distância entre os refletores sísmicos e das relações de espessura estratal, além das variações de velocidade da onda acústica ao interagir com diferentes litologias (Figura A-4). Os principais atributos das sismofácies utilizados na caracterização e as possíveis interpretações geológicas que podem ser feitas estão expressas na Tabela A-1.

No que diz respeito aos fatores supracitados, o padrão interno das reflexões é o de maior relevância na caracterização de sismofácies, visto que está diretamente relacionado à estratificação, a variações eustáticas, aos processos deposicionais e erosionais, e por isso seu entendimento é fundamental para a compreensão e interpretação geológica do objeto de estudo.

De acordo com os exemplos da Figura A-5, as configurações paralelas/subparalelas (item A) indicam uma taxa de deposição uniforme dos estratos, sobre uma superfície estável ou uniformemente subsidente; enquanto a configuração divergente (item B) pode corresponder a uma variação em área na taxa de deposição, inclinação progressiva do substrato ou dos dois fatores simultaneamente. As configurações progradantes (item C), ocorrem em áreas onde os estratos superpõem-se lateralmente, constituindo-se em superfícies inclinadas chamadas de clinofomas, podendo ocorrer em diversos tipos de ambientes, como sistemas deltaicos e bacias marinhas (Mitchum *et al.*, 1977a). Os padrões das clinofomas se diferenciam em função de fatores como variações na taxa de deposição e profundidade da lâmina d'água.

Os padrões das clinofomas oblíquas são classificados em:

a) oblíqua tangencial, quando o mergulho do *foreset* diminui gradualmente na sua porção inferior, se tornando mais suave no *bottomset*;

b) oblíqua paralela, quando a terminação mergulho abaixo se dá em alto ângulo contra a superfície inferior da sequência.

Esse padrão identifica condições de relativo aumento do suprimento, juntamente com pouca ou nenhuma subsidência e nível do mar estacionário, indicando águas rasas e alta energia de deposição.

No padrão oblíquo, o ângulo de mergulho é relativamente alto, e as terminações de mergulho acima são em *toplap* e mergulho abaixo em *downlap*.

Seguindo os exemplos na Figura A-3, as configurações caóticas (item D) consistem em reflexões discordantes e descontínuas, sugerindo um arranjo desordenado das superfícies de reflexão, podendo indicar um ambiente de energia alta e variável. Já as configurações transparentes (item E) são intervalos com ausência de reflexão, podendo indicar litologias homogêneas (como por exemplo corpos de sal ou rochas metamórficas/embasamento) ou intensamente deformadas. As demais configurações ilustradas (*hummocky*, lenticular, contorcido, segmentado, item F) apresentam refletores descontínuos e irregulares com terminações não sistemáticas (MITCHUM *et al.*, 1977a; SEVERIANO RIBEIRO, 2001).

As geometrias e padrões externos, por sua vez, podem fornecer informações importantes sobre as sismofácies como a sua forma tridimensional e a extensão areal da feição. A Figura A-5 ilustra algumas das geometrias externas das sismofácies: em lençol (*sheet*), lençol drapeado (*sheet drape*), cunha (*wedge*), banco (*bank*), lente (*lens*), preenchimento de canal (*channel fill*), calhas (*trough fill*), bacia ou talude (*basin or slope front fill*) ou montiformas (*mounds*) (MITCHUM *et al.*, 1977a).

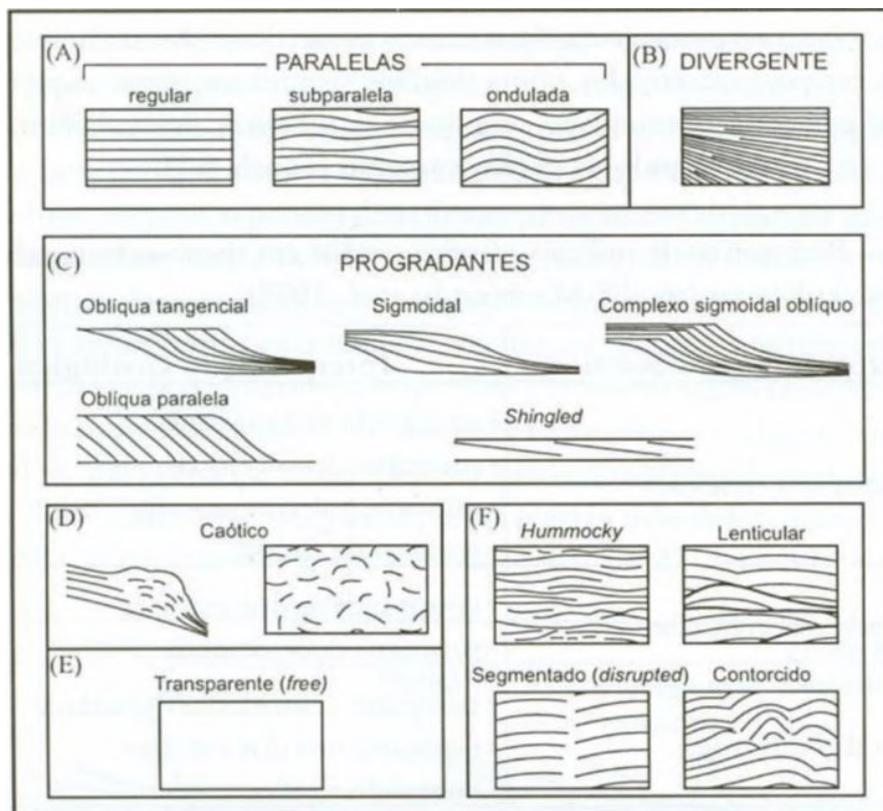


Figura A-3 – Padrões de configuração de refletores sísmicos. Modificado de Mitchum *et al.* (1977a).

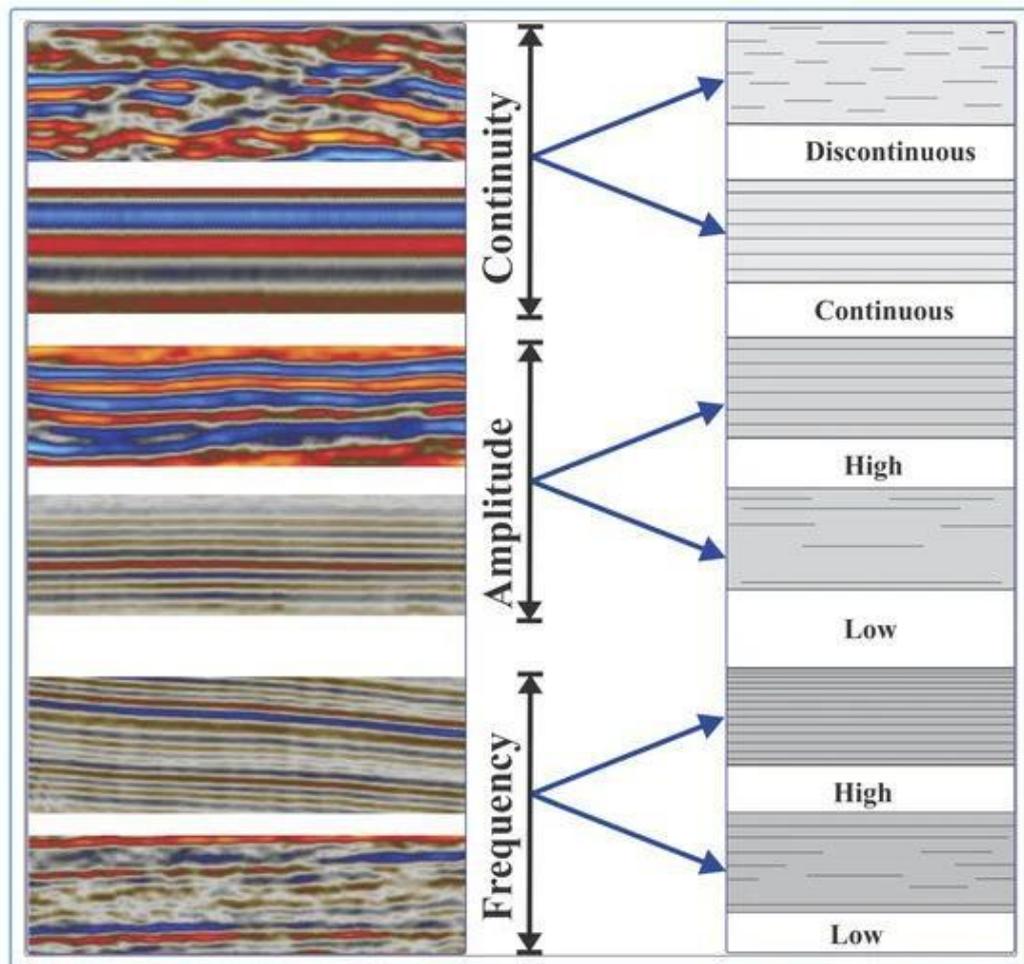


Figura A-4 – Diferenças de valores de continuidade, amplitude e frequência sísmica encontradas em sismofácies distintas. Retirado de Al-Masgari *et al.* (2021).

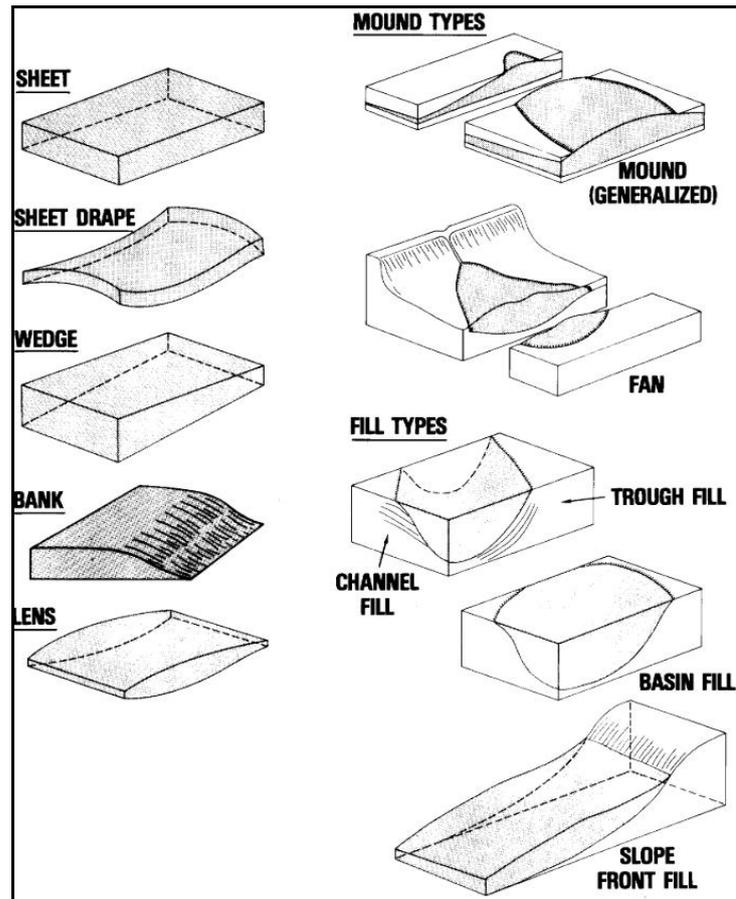


Figura A-5 – Principais configurações externas das sismofácies. Retirado de Mitchum *et al.* (1977a).

Parâmetros	Interpretação Geológica
Configuração de refletores	<ul style="list-style-type: none"> • padrão de estratificação; • processos deposicionais; • erosão e paleotopografia; • contato de fluidos.
Continuidade de refletores	<ul style="list-style-type: none"> • continuidade dos estratos; • processos deposicionais.
Amplitude dos refletores	<ul style="list-style-type: none"> • contraste de velocidade (densidade); • espaçamento dos estratos; • conteúdo fluido.
Frequência das reflexões	<ul style="list-style-type: none"> • espessura dos estratos; • conteúdo fluido.
Velocidade intervalar	<ul style="list-style-type: none"> • estimativa de litologia; • estimativa de porosidade; • conteúdo fluido.
Formas externas e associação areal das fácies sísmicas	<ul style="list-style-type: none"> • ambiente deposicional; • fonte sedimentar; • sítio geológico.

Tabela A-1 – Parâmetros de caracterização de sismofácies e as interpretações geológicas por elas fornecidas. Retirado de Severiano Ribeiro (2001) *apud* Mitchum *et al.* (1977a).