

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRATIGRAFIA**

**CARACTERIZAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E  
SISMOFÁCIES DA FORMAÇÃO BARRA VELHA (PRÉ-SAL  
APTIANO), CAMPO DE TUPI, BACIA DE SANTOS - BRASIL**

**VITOR PINHEIRO SOMMER**

**ORIENTADOR – Prof. Dr. Juliano Kuchle**

Porto Alegre, 2022

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRATIGRAFIA**

**CARACTERIZAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E  
SISMOFÁCIES DA FORMAÇÃO BARRA VELHA (PRÉ-SAL  
APTIANO), CAMPO DE TUPI, BACIA DE SANTOS - BRASIL**

**VITOR PINHEIRO SOMMER**

ORIENTADOR – Prof. Dr. Juliano Kuchle

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Francyne Bochi do Amarante – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fernando Farias Vesely – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para a obtenção do  
Título de Mestre em Ciências

Porto Alegre, 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor: Carlos André Bulhões Mendes**

**Vice-Reitora: Patrícia Pranke**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber**

**Vice-Diretora: Tatiana Silva da Silva**

### CIP - Catalogação na Publicação

SOMMER, VITOR

CARACTERIZAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E SISMOFÁCIES DA  
FORMAÇÃO BARRA VELHA (PRÉ-SAL APTIANO), CAMPO DE TUPI,  
BACIA DE SANTOS - BRASIL / VITOR SOMMER. -- 2022.

73 f.

Orientador: JULIANO KUCHLE.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa  
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,  
2022.

1. PRÉ-SAL. 2. FORMAÇÃO BARRA VELHA. 3. ANÁLISE  
SÍSMICA. 4. RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS. 5. EVOLUÇÃO  
ESTRATIGRÁFICA. I. KUCHLE, JULIANO, orient. II.  
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Campus do Vale – Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia**  
**Porto Alegre – RS – Brasil.**  
**CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001**  
**Telefone: +55 51 3308-6329; Fax: +55 51 33086337**  
**E-mail: ensinoppgge@ufrgs.br**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Juliano Kuchle por todos ensinamentos e orientação, no qual tornou possível a realização deste trabalho mesmo em tempos pandêmicos.

Ao Prof. Luís Fernando De Ros por suas contribuições pertinentes na elaboração do artigo científico.

À minha família e namorada, os quais sempre estiveram ao meu lado dando atenção e carinho. Com certeza sem a paciência e motivação de vocês nada disso teria sido possível.

À UFRGS e especialmente ao PPGGEO, que forneceram os equipamentos e softwares necessários para a elaboração desta dissertação.

À CAPES pelo auxílio financeiro durante todo este período de pesquisa acadêmica.

E por fim, à ANP por ter disponibilizado os dados técnicos utilizados neste trabalho, graças ao programa de incentivo às universidades brasileiras.

Meu muito obrigado a todos!

---

## RESUMO

A descoberta de gigantes acumulações de petróleo na seção Pré-sal (sag) da Bacia de Santos, tem atraído enorme interesse nos depósitos carbonáticos lacustres Aptianos da Formação Barra Velha. Embora exista um volume significativo de publicações na seção do Pré-sal, ainda há uma compreensão limitada de sua evolução tectono-estratigráfica, assim como a ausência de um arcabouço stratigráfico coerente publicado para o Campo de Tupi, o maior e mais produtivo do Pré-sal. O objetivo deste trabalho é definir um arcabouço sismoestratigráfico no intervalo Pré-sal Aptiano do Campo de Tupi, utilizando 19 linhas sísmicas e microfotografias de lâminas delgadas de 13 poços. Foram identificadas quatro unidades sísmicas (US1, US2, US3 e US4) e duas sismofácies (SFA e SFB). O padrão deposicional das unidades sísmicas é de expansão contínua do espaço de acomodação, embora com erosão significativa no topo do US4. A SFA é composta principalmente por esferulitos de calcitas e lama de argilas-Mg, que constitui a base da sedimentação lacustre formada e/ou preservada em áreas preferencialmente relativamente mais profundas. A SFB corresponde a crostas de *shrubs* fasciculares de calcita, precipitados preferencialmente em áreas relativamente mais altas, e a depósitos intraclásticos de esferulitos e *shrubs* retrabalhados. A discordância pré-NeoAlagoas representa a base do intervalo de estudo. O topo é caracterizado por uma discordância regional que representa a lacuna temporal entre a unidade mais jovem (US4) e o início dos depósitos evaporíticos da Formação Ariri. Não foram identificadas discordâncias adicionais na Formação Barra Velha no campo de Tupi, caracterizando uma deposição continuamente expansiva em um padrão plano, tabular e *onlapping* sobre o Alto Externo, representando uma criação contínua de espaço de acomodação, sob baixa atividade tectônica.

**Palavras-Chave:** Reservatórios Carbonáticos, Pré-sal, Formação Barra Velha, Campo de Tupi, Evolução Estratigráfica.

## ABSTRACT

The discovery of giant oil accumulations in the Pre-salt (sag) section of Santos Basin, has attracted huge interest on the lacustrine carbonate deposits of the Aptian Barra Velha Formation. Although for the significant volume of publications on the Pre-salt section, there is still limited understanding of its tectono-stratigraphic evolution, and lack of a coherent published stratigraphic framework for the Tupi Field, the largest and most productive Pre-salt accumulation. The aim of this work is to define a seismic-stratigraphic framework in the Aptian Pre-salt interval of the Tupi Field, using 19 seismic lines, and thin sections photomicrographs from 13 wells. Four seismic units (US1, US2, US3, and US4) and two seismic facies (SFA and SFB) were identified. The depositional pattern of the seismic units is of continuous expansion of the accommodation space, although with significant erosion at the top of US4. SFA is composed mostly by calcite spherulites and Mg-clays mud, which constitutes the background of lacustrine sedimentation formed and/or preserved in preferentially relatively deeper areas. SFB corresponds to crusts of calcite fascicular shrubs preferentially precipitated in relatively higher areas, and to intraclastic deposits of reworked spherulites and shrubs. The pre-NeoAlagoas unconformity represents the base of the study interval. The top is characterized by a regional unconformity which represents temporal gap between the youngest of the units (US4) and the start of the evaporitic deposits of the Ariri Formation. No additional unconformities were identified within the Barra Velha Formation in the Tupi Field, characterizing a continuously expansive deposition on a flat, tabular and onlapping pattern over the Outer High, representing a continuous accommodation creation, under low tectonic activity.

**Keywords:** Carbonate Reservoir, Pre-salt, Barra Velha Formation, Tupi Field, Stratigraphic Evolution.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - (A) Mapa de localização da Bacia de Santos. (B) Localização da área de estudo com as linhas sísmicas 2D e poços estudados. (Geodata/ANP 2021). ..... **13**
- Figura 2 - Carta estratigráfica da seção rifte e sag (pós-rifte) da Bacia de Santos. Modificado de Moreira *et al.*, (2007). (CAM = Fm. Camboriú., PIÇ = Fm. Piçarras, ITP = Fm. Itapema, BVE = Fm. Barra Velha, ARI = Fm. Ariri). ..... **15**
- Figura 3 - Modelo ilustrativo dos diferentes modelos de rifteamento. Modificado de Bosence (1998). ..... **16**
- Figura 4 - (A) Seção idealizada de uma seção sísmica de uma bacia rifte ideal, onde cada trato de sistemas tectônico pode ser identificado. (B) Seção vertical idealizada do centro da bacia, interpretada conforme a expressão de mudanças do controle tectônico no sistema deposicional. Modificado de Prosser (1993). ..... **18**
- Figura 5 - Modelo ilustrativo das superfícies e estratos da fase rifte. Modificado de Bosence (1998). ..... **19**
- Figura 6 - (A) Modelo estratigráfico idealizado de uma bacia rifte, incluindo os tratos de sistemas tectônicos, as tendências deposicionais e as superfícies limítrofes. (B) Expressão sísmica do modelo estratigráfico, acima idealizada, ilustrando as terminações estratais e as configurações de refletores. (Kuchle e Scherer, 2010)... **21**
- Figura 7 - Desenho esquemático que dos estágios evolutivos rifte (sin-rifte) e sag. Nota-se que ainda há topografia residual da fase rifte nas etapas iniciais e intermediárias da fase sag. (Amarante, 2021). ..... **23**
- Figura 8 - Padrões de terminação de refletores de limite superior (truncamento erosivo, *toplap* e concordante) e inferior (*onlap*, *downlap* e concordante) de uma sequência sísmica/sequência deposicional. Modificado de Michum e Vail (1977). ..... **24**
- Figura 9 - Tipos de geometria interna de sismofácies, dados em configurações paralela, caótica, transparente, divergente, progradante, *hummocky*, lenticular, segmentada e contorcida. Modificado de Mitchum e Vail (1977). ..... **25**

---

Figura 10 - Linha sísmica 0575 A) em fase normal com as superfícies de topo (azul) base (vermelho); B) com a interpretação das terminações dos refletores e as unidades sísmicas encontradas; C) com atributo *cosine of phase* e interpretação das duas sismofácies identificadas; D) diagrama cronoestratigráfico mostrando a interação temporal entre os eventos deposicionais das unidades sísmicas e sismofácies.....**30**



---

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>13</b>
	3.1 Localização e Contexto Geológico.....	13
	3.2 Bacias Rifte.....	15
	3.3 Bacias Sag.....	21
	3.4 Sismoestratigrafia .....	23
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
	4.1 Revisão Bibliográfica .....	25
	4.2 Análise Sísmica .....	26
	4.3 Microfotografias de Lâminas Delgadas.....	27
	4.4 Integração de Dados.....	27
<b>5</b>	<b>SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>ARTIGO SUBMETIDO .....</b>	<b>38</b>
	1. Introduction.....	40
	2. Geological Setting .....	41
	3. Materials and Methods .....	43
	4. Results .....	45
	4.1. Top and Base of interval.....	46
	4.2. Reflections Terminations .....	47
	4.3. Seismic Units.....	48
	4.4. Seismic Facies .....	53
	4.5. Chronostratigraphic Chart.....	56

---

<b>5. Discussions</b> .....	58
5.1. Lithologic characteristics of the Pre-salt deposits .....	58
5.2. Depositional model for the Barra Velha Formation in the Tupi Field.....	64
<b>6. Conclusions</b> .....	64

---

## ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo “*Seismic stratigraphic framework and seismic facies of the Aptian pre-salt Barra Velha formation in the Tupi Field, Santos Basin, Brazil*”, submetida ao periódico *Journal of South American Earth Sciences*. Portanto, o conteúdo estará organizado da seguinte forma:

- a) Introdução do tema proposto para a dissertação de mestrado, resumindo a localização, objetivos, contexto geológico da área de pesquisa, o estado da arte sobre o assunto e os materiais e métodos utilizados.
- b) Resultados obtidos com as interpretações, discussões resultantes da análise dos dados obtidos na pesquisa e conclusões finais.
- c) Artigo intitulado “*Seismic stratigraphic framework and seismic facies of Aptian pre-salt Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazil*”, submetido ao periódico *Journal of South American Earth Sciences* (Qualis A3), desenvolvido pelo autor durante o desenvolvimento do mestrado.

## 1 INTRODUÇÃO

Os principais campos produtores de petróleo do Brasil estão localizados no intervalo pré-sal da Bacia de Santos, a cerca de 5000 metros de profundidade, com mais de 2000 metros de sal e uma lâmina d'água também de 2000 metros. A origem destes depósitos está relacionada com a quebra do supercontinente Gondwana e a posterior abertura do Oceano Atlântico durante o Cretáceo Inferior (Chang *et al.*, 2008). O campo de Tupi é o maior produtor de óleo e gás do Brasil, sendo responsável por mais da metade da produção do pré-sal brasileiro. O volume recuperável é de 8.3 bboe, muito acima dos 0.5 bboe que classifica um campo como gigante (Petrobrás, 2010). O campo está situado a cerca de 230 Km da costa do Rio de Janeiro e as principais rochas reservatórios são carbonáticas. Apesar da descoberta relativamente recente das acumulações de petróleo no pré-sal (2006), existe uma grande quantidade de dados levantados, tanto sísmicos quanto petrofísicos. Entretanto, ainda não existe um trabalho científico publicado sobre a evolução sismoestratigráfica no intervalo Aptiano do Campo de Tupi. Portanto, este trabalho possui grande interesse do setor para novos modelos geológicos relacionados ao intervalo produtor.

## 2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são: a) estabelecer um arcabouço sismoestratigráfico para o intervalo Aptiano da Formação Barra Velha (BVF), que corresponde aos principais reservatórios, reconhecendo superfícies e unidades internas, e seu significado geológico; b) definir as sismofácies a partir de texturas sísmicas e caracterização petrográfica, permitindo estabelecer os controles deposicionais sobre as rochas reservatórios do intervalo, para enfim; c) gerar um modelo geológico evolutivo para a Formação Barra Velha, estabelecendo assim um controle de processos e litologias resultantes ao longo do intervalo geológico de interesse que possa futuramente ser utilizado para a predição e que explique a qualidade e o controle do reservatório.

### 3 ESTADO DA ARTE

#### 3.1 Localização e Contexto Geológico

A Bacia de Santos está localizada na porção sudeste do Brasil, é limitada ao sul com o alto de Florianópolis e ao Norte com o alto de Cabo Frio. A bacia tem cerca de 350.000 Km<sup>2</sup> de área e abrange a costa dos estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 1).

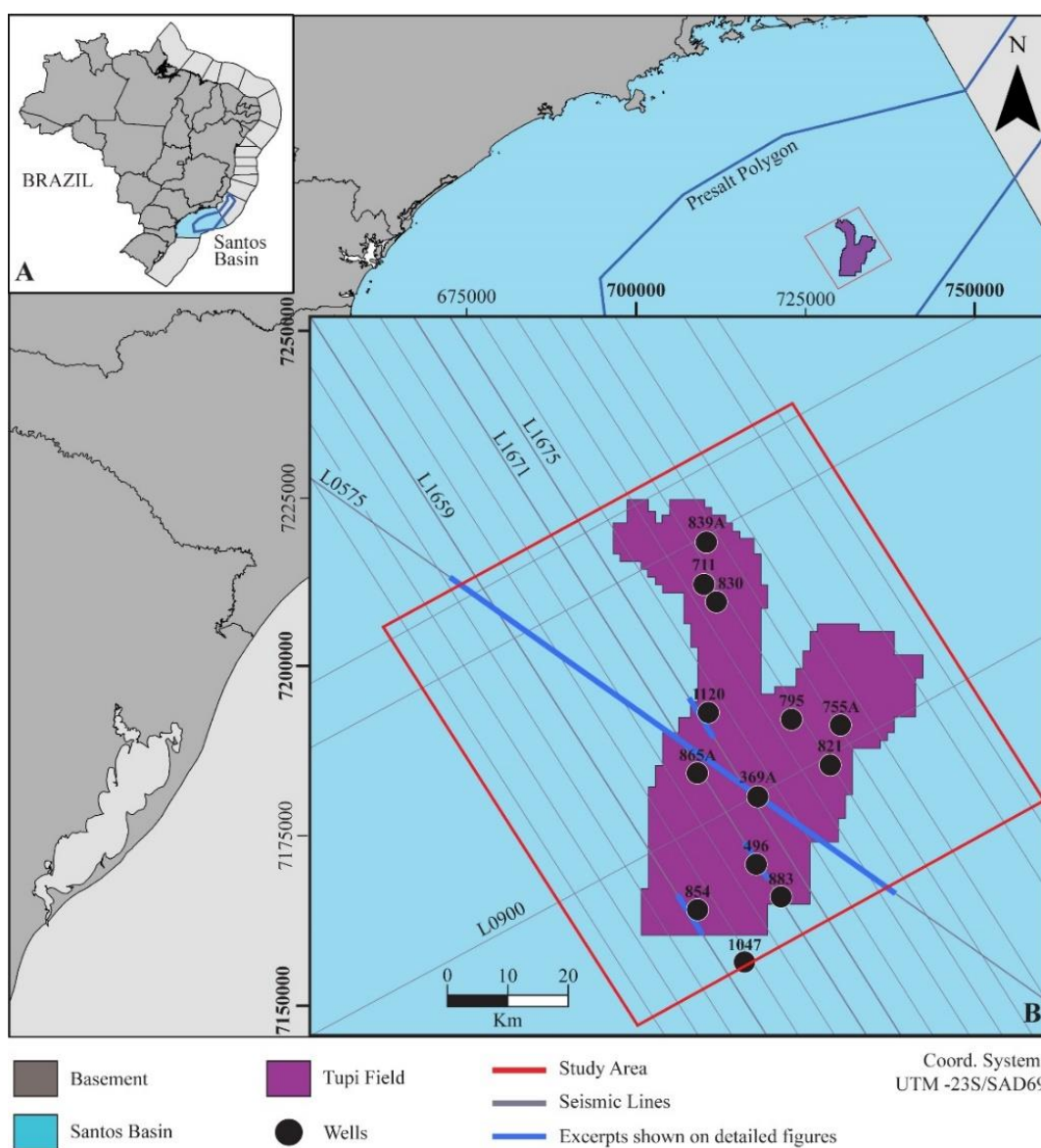


Figura 1: (A) Mapa de localização da Bacia de Santos. (B) Localização da área de estudo com as linhas sísmicas 2D e poços estudados. (Geodata/ANP 2021).

Os depósitos da Bacia de Santos têm origem no processo de rifteamento do supercontinente Gondwana (Triássico-Cretáceo) e posterior abertura do Oceano Atlântico (Cretáceo-recente). O preenchimento da bacia ocorre de acordo com o estágio tectônico atuante, sendo dividido em sequência sin-rifte I, II e sag (Chang *et al.*, 1992; Brumbaugh *et al.*, 1994; Henry *et al.*, 1995; Quirk *et al.*, 2013). As sequências sin-rifte I e II são controladas por subsidência mecânica. A primeira é composta por rochas vulcânicas da Formação Camboriú, sendo considerada o embasamento econômico da bacia. Enquanto a segunda é caracterizada por um ambiente fluviolacustre, responsável pela deposição das rochas geradoras da Formação Piçarras e os carbonatos bioclásticos da Formação Itapema (Figura 2) (Karner & Driscoll, 1999; Chang *et al.*, 2008).

A fase sag é controlada por uma subsidência termal precedendo o rompimento litosférico e que se desenvolveu logo após à subsidência mecânica, gerando uma depressão lateralmente extensa e contínua. Estima-se que essa configuração tenha se estendido de Santos (Sul) até Pernambuco (Norte), assim como nas bacias Africanas (Karner & Driscoll, 1999; Dias, 1998; Rangel & Carminatti, 2000; Unternehr *et al.*, 2010; Lentini *et al.*, 2010; Saller *et al.*, 2016). A enorme deposição evaporítica da fase sag é influenciada pelo clima seco e árido, e pelos altos vulcânicos, como a Dorsal de São Paulo, que restringiu a circulação de água marinha do Sul (Demercian, 1996). Essa transição do ambiente fluviolacustre para o marinho restrito indica uma mudança na sedimentação química das argilas magnesianas da Formação Barra Velha, para os evaporitos da Fm. Ariri (Pereira & Feijó, 1994). Com isso, a Fm. Barra Velha, constituída por estromatólitos e carbonatos microbianos, representa um dos melhores reservatórios do pré-sal, enquanto a Fm. Ariri, composta por anidrita e halita, atua como capeadora do sistema petrolífero (Figura 2). (Figura 2).

A sequência drifte é composta por rochas siliciclásticas da Formação Florianópolis, sobreposta por carbonatos Albianos da Formação Guarujá, sendo considerados de ambiente marinho nerítico, hipersalino com pouca circulação de água (Chang *et al.*, 2008). Num evento transgressivo, a Formação Itanhaém recobriu os depósitos anteriores com sedimentos clásticos e carbonáticos.

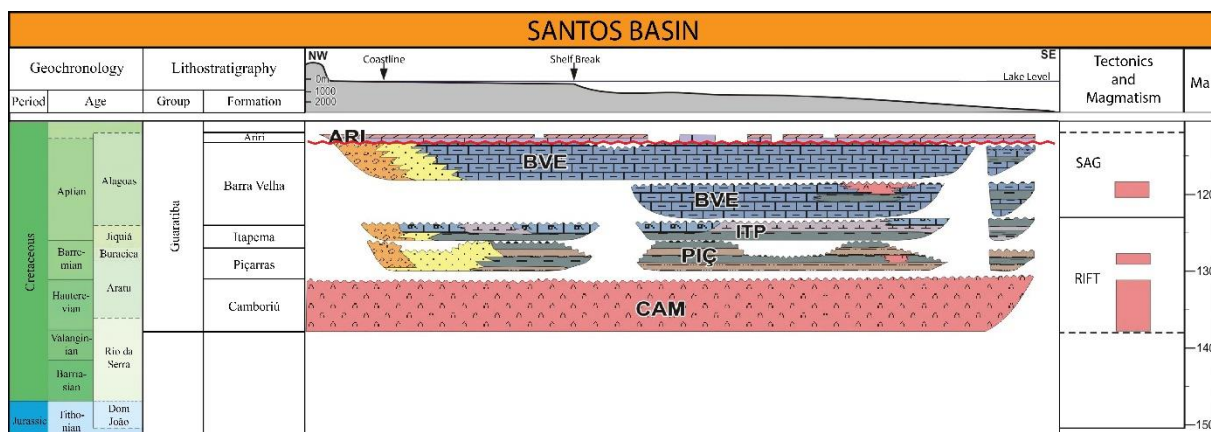


Figura 2: Carta estratigráfica da seção rifte e sag (pós-rifte) da Bacia de Santos. Modificado de Moreira *et al.*, (2007). (CAM = Fm. Camboriú., PIÇ = Fm. Piçarras, ITP = Fm. Itapema, BVE = Fm. Barra Velha, ARI = Fm. Ariri).

### 3.2 Bacias Rifte

As bacias rifte são depressões crustais geradas por subsidência mecânica e controladas por fatores tectônicos, climáticos e sedimentares. Os riftes são classificados em ativos e passivos. O rifte ativo apresenta o estiramento crustal como produto de uma pluma mantélica e magmatismo. O rifte passivo apresenta o magmatismo como produto do estiramento crustal. Este último apresenta ainda três modelos diferentes de evolução: cisalhamento puro, cisalhamento simples e deformação heterogênea (Figura 3).

No modelo de cisalhamento puro (McKenzie, 1978) a bacia rifte é simétrica, devido ao estiramento uniforme da crosta em resposta ao cisalhamento puro homogêneo. Essa simetria é controlada por duas falhas de borda que mergulham em direções opostas, e seu estágio inicial evolutivo é relacionado à resposta de extensão e afinamento crustal, seguido por um longo período de subsidência termal (Figura 3-A).

Já no modelo de cisalhamento simples (Wernicke e Burchfiel, 1982; Wernicke, 1985) é gerado uma estrutura de meio gráben, controlado por uma superfície de descolamento de baixo ângulo, com blocos rotacionados em resposta ao afinamento crustal. A bacia neste modelo é separada em proximal e distal por um alto do

embasamento. Na porção proximal ocorre a sedimentação desde o início do afinamento, enquanto a porção distal é afetada pela expansão termal, gerando soerguimento e erosão (Figura 3-B). A segunda fase de subsidência da bacia é termal, resultado do resfriamento das camadas e atingindo uma área maior que a fase anterior (McKenzie, 1978).

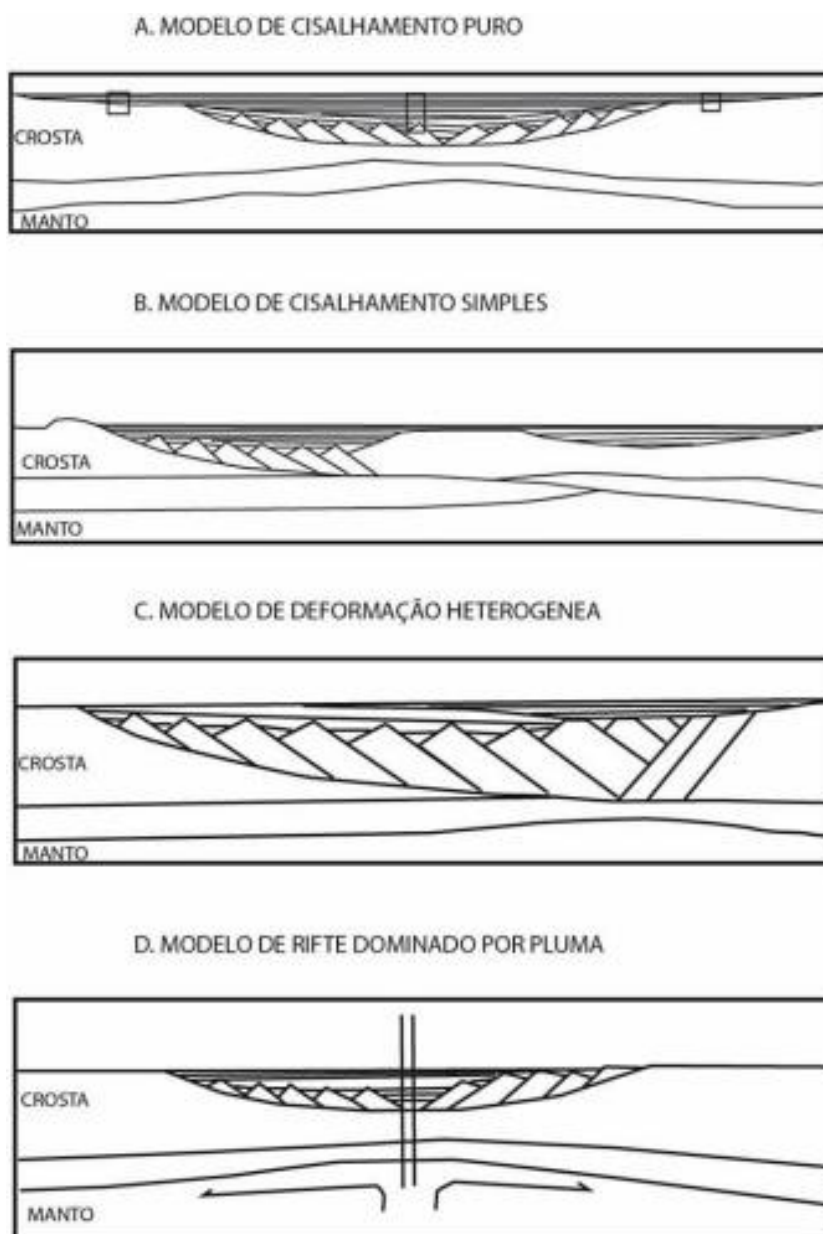


Figura 3: Modelo ilustrativo dos diferentes modelos de rifteamento. Modificado de Bosence (1998).



O modelo de deformação heterogênea (Coward, 1986) envolve a rotação dos blocos crustais sobre uma superfície de descolamento de baixo ângulo, em direção oposta ao rifte (Figura 3-C). Após o soerguimento e erosão, uma nova subsidência é implantada pelo resfriamento termal da bacia.

O modelo de rifte ativo (Braun and Beamont, 1989) estabelece que plumas astenosféricas são responsáveis pela anomalia térmica na região, resultando em descompressão e fusão crustal (Figura 3-D). Neste caso a subsidência termal é incipiente devido aos efeitos termais remanescentes do magmatismo (Bosence, 1998).

A evolução tectono-estratigráfica das bacias rifte possui alguns modelos evolutivos, dentre os quais Prosser (1993), Bosence (1998) e Kuchle e Scherer (2009) se destacam e serão detalhados a seguir.

O modelo de Prosser (1993) é dividido em quatro estágios tectono-estratigráficos, nomeados de tratos de sistemas tectônicos (TST), uma vez que a tectônica é o principal controlador da sedimentação (Figura 4). O TST de início de Rifte é apresenta pequenas bacias isoladas como resposta ao primeiro movimento de falha normal. A geometria externa da assinatura sísmica tem forma de cunha com refletores internos descontínuos em padrão *hummocky*. Como a taxa de sedimentação acompanha a subsidência, o pacote dos refletores é agradacional.

O TST de Clímax de Rifte mostra uma mudança no padrão de empilhamento de agradacional para retrogradacional, mostrando que a taxa de criação de espaço de acomodação é maior que o aporte sedimentar. Os refletores sísmicos possuem padrão divergente, com geometria interna caótica próximo à falha de borda.

O TST de Pós-Rifte Imediato é marcado pelo fim do tectonismo ativo, onde a subsidência mecânica vai dando espaço para a subsidência termal devido ao resfriamento litosférico. O padrão de empilhamento é agradacional com componente progradacional e raseamento lateral em direção ao topo. Os refletores sísmicos são paralelos (*onlap* com a falha de borda) e semi-contínuos.

O TST de Pós-Rifte Tardio é caracterizado pelo aplainamento gradual e lento da topografia gerada pelas falhas, gerando um afinamento dos sedimentos em direção ao topo. Os refletores sísmicos são mais contínuos do que na fase anterior.

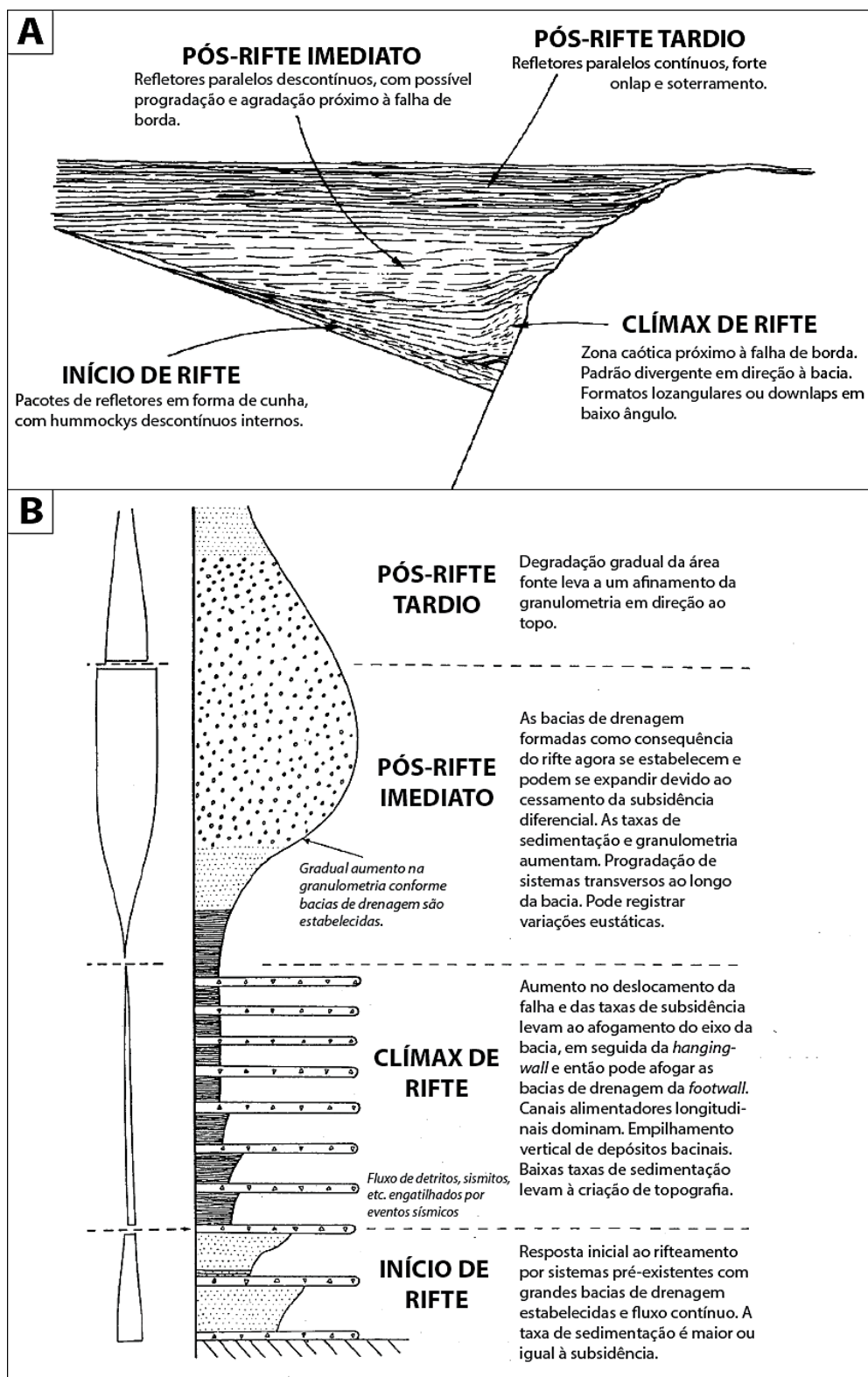


Figura 4: (A) Seção idealizada de uma seção sísmica de uma bacia rifte ideal, onde cada trato de sistemas tectônico pode ser identificado. (B) Seção vertical idealizada do centro da bacia, interpretada conforme a expressão de mudanças do controle tectônico no sistema deposicional. Modificado de Prosser (1993).

O modelo de Bosence (1998) compartimenta toda a seção rifte em pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte, conforme os diferentes estágios tectônicos e as superfícies regionais que os delimitam (Figura 5). De acordo com o autor, a fase rifte é marcada pela discordância sin-rifte na base e pós-rifte no topo, sendo restrita apenas à fase sin-rifte, pois apresenta uma evolução muito diferente dos outros estágios.

A fase sin-rifte, portanto, é caracterizada por uma subsidência mecânica regional nas cristas e no centro, gerando um espaço de acomodação não totalmente preenchido, devido à taxa de suprimento sedimentar sendo menor do que a subsidência. Os refletores sísmicos possuem padrão divergente, devido à intensa movimentação tectônica durante este período. A fase pós-rifte é marcada por deposição em regime de subsidência térmica, controlada pelo resfriamento litosférico. A área afetada neste tipo de subsidência é muito maior do que gerada pela subsidência mecânica. Os refletores sísmicos possuem estratos plano-paralelos e horizontais, mostrando um contexto deposicional de quiescência tectônica.

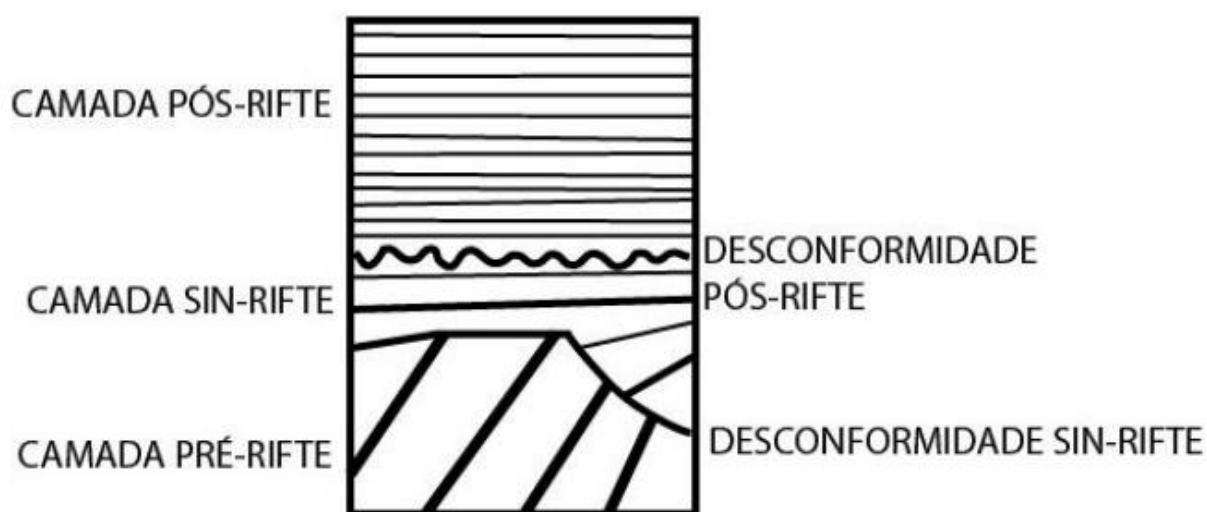


Figura 5: Modelo ilustrativo das superfícies e estratos da fase rifte. Modificado de Bosence (1998).

O modelo evolutivo de Kuchle e Scherer (2009) utiliza a interpretação sismoestratigráfica baseada nos conceitos da estratigrafia de sequências nas bacias rifte. Eles usam os tratos de sistemas tectônicos de Prosser (1993) para dividir a seção

sin-rifte de Bosence (1998), que é delimitada na base pela discordância sin-rifte e no topo pela discordância pós-rifte (Figura 6).

O TST de Início de Rifte é caracterizado por uma extensa bacia rasa continental gerada pelo início do estiramento crustal onde, na base, encontra-se a discordância sin-rifte (DSR). Os refletores sísmicos têm baixa continuidade e apresentam padrão plano-paralelo.

O TST de Desenvolvimento de Meio-Gráben é representado pelo início da formação de meio-gráben. A base do pacote é correlata com uma discordância na borda da bacia e é denominada Superfície de Desenvolvimento de Meio-Gráben. Os refletores sísmicos são descontínuos e apresentam geometria externa suavemente em cunha, com padrão interno plano-paralelo ou levemente divergente.

O TST de Clímax do Rifte representa o momento de maior atividade tectônica da bacia, com o máximo desenvolvimento da falha de borda, com elevada taxa de criação de espaço de acomodação e baixo pacote sedimentar. Os refletores sísmicos são caóticos, descontínuos e de amplitude variável próximos à falha de borda, além de possuírem geometria externa em forma de cunha e diversos truncamentos internos.

O TST de Final do Rifte é marcado pela diminuição da atividade tectônica, diminuição do espaço de acomodação e recuo do sistema lacustre. Nesta fase as cristas são erodidas e atuam como área-fonte para o meio-gráben.

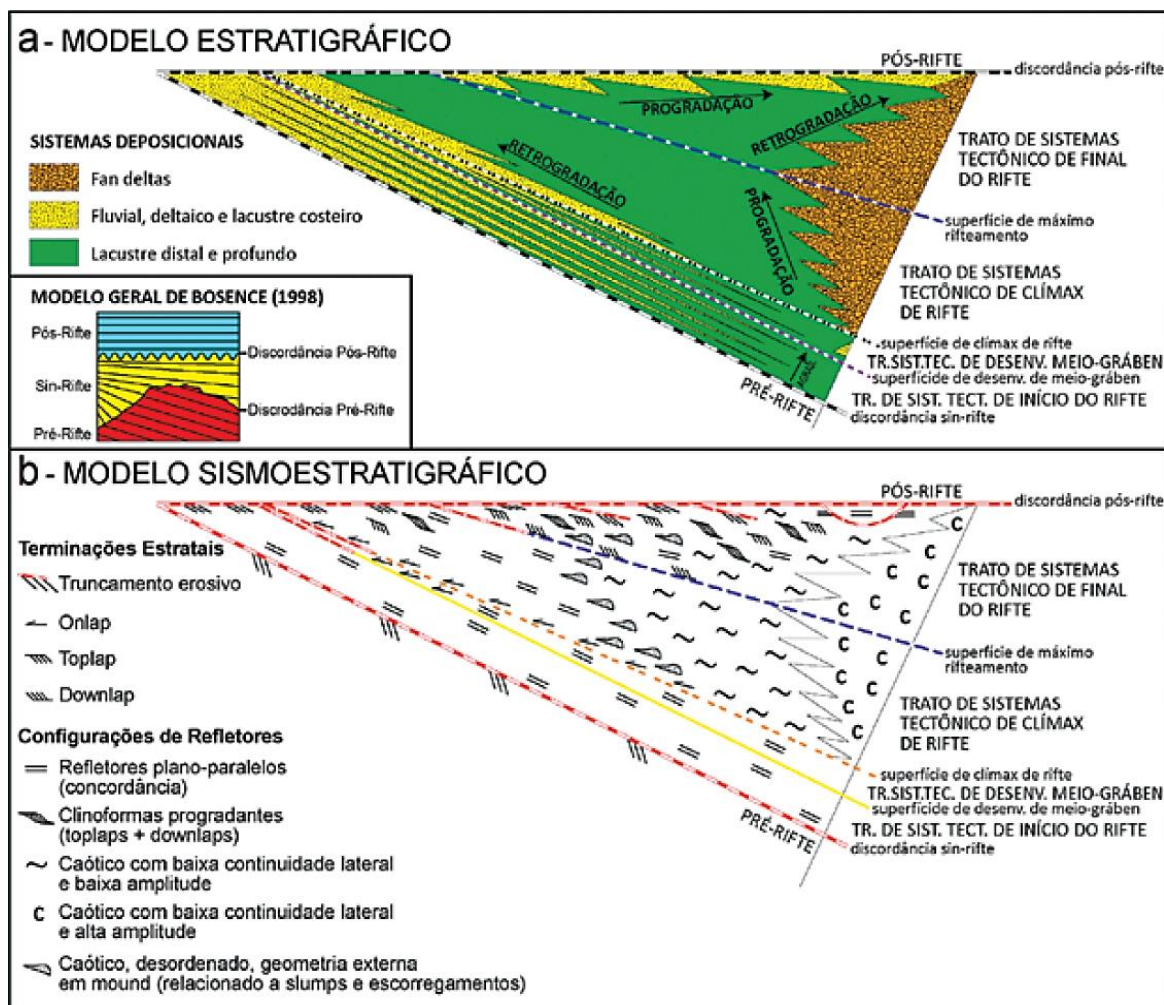


Figura 6: (A) Modelo estratigráfico idealizado de uma bacia rifte, incluindo os tratos de sistemas tectônicos, as tendências deposicionais e as superfícies limítrofes. (B) Expressão sísmica do modelo estratigráfico, acima idealizada, ilustrando as terminações estratigráficas e as configurações de refletores. (Kuchle e Scherer, 2010).

### 3.3 Bacias Sag

As bacias do tipo sag são geradas em contexto de extensão litosférica. A subsidência pode ocorrer de forma simples ou representar um estágio evolutivo do processo de rifteamento (Kingston *et al.*, 1983). As bacias sag interior e marginal são as mais comuns, enquanto a oceânica é mais rara e tardia na evolução da bacia.

Allen & Allen (2005) citam que as bacias sag intracratônicas apresentam subsidência termal da litosfera devido ao término da fonte de calor. Entretanto, Nichols

(2009) define essas bacias como amplas depressões crustais, extensas em área e rasas em profundidade. O autor ainda propõe dois mecanismos para a origem dessas bacias: 1) subsidência termal ocasionada pela irregular distribuição de calor do manto, geralmente associadas às regiões crustais resfriadas, e 2) flambagem litosférica de grande comprimento de onda.

De modo geral as bacias sag cratônicas apresentam forma circular ou ovalada e não acumulam grandes espessuras de sedimentos. Outra característica comum é a ausência de falhamentos normais durante a subsidência, sugerindo uma elevada rigidez da litosfera (Watts *et al.*, 1982). A configuração geral das bacias sag (Figura 7) é influenciada pelas principais características estruturais remanescentes do rifteamento, pois elas controlam a distribuição da sedimentação (Gabrielsen *et al.* 2001). Com o desenvolvimento da bacia, o efeito da contração termal diminui, enquanto a carga sedimentar aumenta, indicando um contexto de predominância do influxo sedimentar sobre o espaço de acomodação. A fase sag madura ocorre quando o equilíbrio termal é atingido e a geometria da bacia for ampla em forma de pires, não mais influenciada pelas características herdadas do sin-rifte.

As bacias sag geralmente estão vinculadas a processos de rifteamento e, conforme visto nos modelos de Bosence (1998), Prosser (1993) e Kuchle e Scherer (2009), ela melhor se encaixa na fase pós-rifte desses modelos, já que sua característica é se depositar numa grande área em contexto de subsidência termal da crosta. Entretanto, esses modelos acabam por não abordar a evolução da bacia sag de forma clara e direta, principalmente quando um rifte evolui para uma margem passiva. Trabalhos recentes mostram que o processo de rifteamento é contínuo, evoluindo de uma fase mecânica de alta subsidência, para uma fase termal que antecede a ruptura efetiva. A fase sag é característica da borda e ocorre sobre uma discordância regional, além de ocupar uma área maior e mais ampla que as calhas rifte (Brune *et al.*, 2014). Portanto, o processo de rifteamento continental apresenta também a fase sag, representando a fase final e geneticamente ligada ao processo de ruptura crustal.

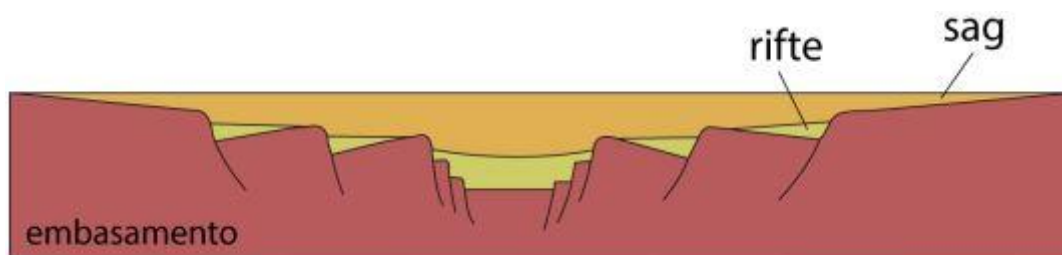


Figura 7: Desenho esquemático que dos estágios evolutivos rifte (sin-rifte) e sag. Nota-se que ainda há topografia residual da fase rifte nas etapas iniciais e intermediárias da fase sag. (Amarante, 2021).

### 3.4 Sismoestratigrafia

A sismoestratigrafia foi definida por Vail & Mitchum (1977) num contexto de margem passiva, entretanto sua aplicação tem sido largamente difundida para a o mapeamento de sequências depositadas em diversos contextos geológicos.

Os princípios da sismoestratigrafia consistem na interpretação das terminações e configurações dos refletores sísmicos no reconhecimento e correlação das sequências, ambientes deposicionais e fácies sedimentares. As reflexões sísmicas são geradas por superfícies que separam estratos com diferentes propriedades acústicas (densidade, porosidade, composição etc.). As erosões ou hiatos limitam as sequências e podem ser correlacionados regionalmente, possuindo grande significado cronoestratigráfico (Sloss, 1963; Mithcum Jr. *et al.*, 1977; Vail *et al.*, 1977).

O mapeamento das terminações dos refletores vai definir as superfícies que limitam as sequências deposicionais. Essas terminações podem ser de topo (truncamento erosivo, *toplap* e concordante) ou de base (*onlap*, *downlap* e concordante) (Figura 8). Os *toplaps* e *onlaps* são terminações que ocorrem, respectivamente, no topo e na base de sequências deposicionais. Já os *downlaps* são refletores inclinados interpretados como terminando em limite inferior de sequência. Por fim, os truncamentos erosivos são interpretados como terminações laterais que ocorrem no topo de sequências, podendo atingir uma grande área de abrangência.

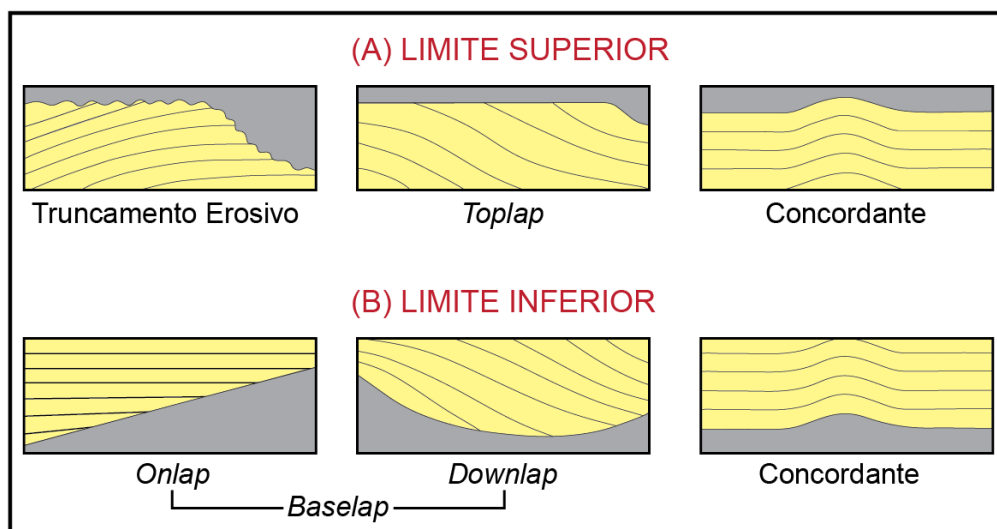


Figura 8: Padrões de terminação de refletores de limite superior (truncamento erosivo, *toplap* e concordante) e inferior (*onlap*, *downlap* e concordante) de uma sequência sísmica/sequência deposicional. Modificado de Michum e Vail (1977).

As sismofácies são definidas por parâmetros internos e externos (Brown Jr. & Fisher, 1980). A correlação desses padrões de reflexão sísmica com dados de poços, proporciona uma ferramenta excelente na interpretação da litologia, processos sedimentares e feições deposicionais que compõe uma determinada unidade deposicional. Os principais padrões sísmicos internos são paralelos, divergente, progradantes e caóticos (Figura 9).

Padrões de geometria externa (clinoformas) estão diretamente relacionadas com as sequências deposicionais que, por sua vez, se relacionam com o ambiente e os sistemas deposicionais sob o qual foram depositados (Cruz, 2008). As principais formas definidas) são compostas por lençol, lençol ondulado, cunha, banco, lente, preenchimento (canal, bacia ou talude) e montiformas (Mitchum Jr. *et al.*, 1977).

A deposição em planície aluvial, plataforma ou planície abissal comumente apresentam geometria em lençol com sismofácies paralela, enquanto com sismofácies ondulada indica um ambiente de baixa energia (Ribeiro, 2001). Nas clinoformas progradantes é comum a geometria ser lenticular, enquanto as montiformas são mais presentes em relevos mais elevados, vulcânicos ou biogênicos. As geometrias de preenchimentos estão associadas com feições negativas, como canais, cânions, calhas etc. (Ribeiro, 2001).



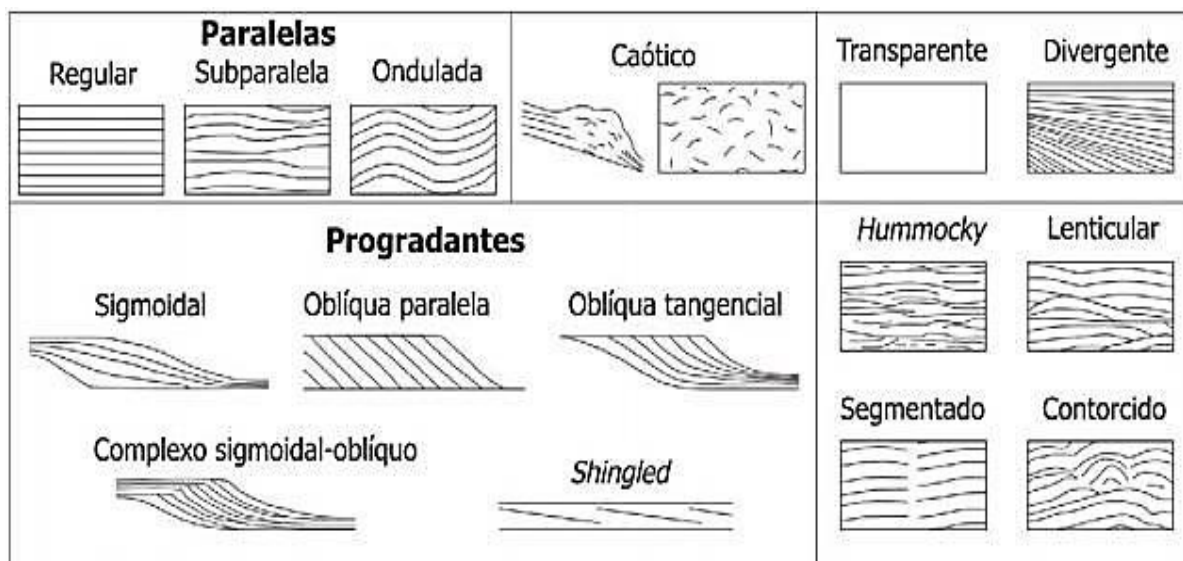


Figura 9: Tipos de geometria interna de sismofácies, dados em configurações paralela, caótica, transparente, divergente, progradante, *hummocky*, lenticular, segmentada e contorcida. Modificado de Mitchum e Vail (1977).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada compreendeu as etapas de revisão bibliográfica, interpretação sísmica 2D, análise de microfotografias de lâminas delgadas, e interpretação integrada com os dados obtidos. Os dados sísmicos e petrográficos foram adquiridos através da ANP (Agência Nacional do Petróleo), de acordo com a política de compartilhamento de dados para as universidades (ordens 10252 e 10253).

### 4.1 Revisão Bibliográfica

A etapa de revisão bibliográfica se estendeu ao longo de todo o período de elaboração do trabalho, compreendendo a compilação de artigos científicos e dados sobre a Formação Barra Velha. Os artigos revisados representam um importante papel sobre o modelo deposicional discutido e as características estruturais do intervalo de estudo. Os dados utilizados foram adquiridos diretamente pela ANP e suas descrições foram reavaliadas para serem utilizadas. Ambos os fatores foram relevantes na construção deste trabalho.

## 4.2 Análise Sísmica

A sísmica foi carregada no software Petrel e passou por uma triagem de qualidade para a utilização no trabalho. Portanto, foram selecionadas 19 linhas sísmicas 2D de caráter regional, do levantamento 0258\_2D\_SPEC\_BM\_S. Essas linhas foram adquiridas em *zero-phase*, no qual o pico do sinal da curva ocorre no local com maior contraste de impedância acústica, e com a profundidade em tempo (milissegundos). Dentro dessa triagem, também foram selecionadas as linhas-chave, que foram usadas para a análise sismoestratigráfica, cuja interpretação foi replicada para toda a área de estudo.

Antes da interpretação dos dados sísmicos é necessário delimitar o intervalo de estudo, portanto foram traçadas as superfícies de topo e base da Formação Barra Velha no Campo de Tupi. A base é delimitada pela discordância pré-NeoAlagoas que separa os depósitos de padrão divergente da fase rifte, do padrão subparalelo da fase sag. O topo é caracterizado pelo limite entre os depósitos carbonáticos/siliciclásticos da Formação Barra Velha, com os depósitos evaporativos da Formação Ariri.

A análise sismoestratigráfica foi realizada nas linhas sísmicas 0575, 1659 e 1691, conforme a metodologia de Vail & Mithchum Jr. (1977) e Kuchle & Scherer (2009), em etapas que se sucedem. A primeira etapa corresponde ao mapeamento completo dos refletores e suas terminações. A configuração das terminações nos permite compreender a deposição dos pacotes sedimentares e, com isso, identificar as superfícies estratigráficas, que posteriormente irão delimitar as unidades sísmicas do intervalo de estudo.

A partir da identificação das superfícies estratigráficas, foi realizado o mapeamento de topo e base de cada unidade sísmica encontrada. Com isso foram elaborados mapas de espessura e profundidade, ambos em tempo, que auxiliam na visualização da primeira ocorrência e espessura de cada unidade, facilitando a compreensão da evolução tectono-sedimentar da região.

A análise de sismofácies é realizada a partir da observação de parâmetros sísmicos como continuidade, amplitude e frequência, excluindo-se a geometria externa que não se apresenta com qualidade devido ao sinal de baixa resolução sísmica ou ruído.

Os diagramas cronoestratigráficos são criados a partir da individualização das unidades sísmicas. A visualização da geometria de cada unidade indica o contexto paleogeomorfológico no qual foi depositada. A disposição espacial das unidades indica o arranjo arquitetural dos sistemas deposicionais no processo de preenchimento da bacia. O empilhamento das unidades indica sua idade relativa, permitindo a interpretação de um controle temporal. Com isso, o diagrama favorece a observação da relação deposição, erosão e hiatos temporais.

#### **4.3 Microfotografias de Lâminas Delgadas**

Foi utilizado um conjunto de 13 poços, todos com *checkshots* (amarração tempo/profundidade com a linha sísmica), nos quais serviram para analisar os dados petrofísicos e litológicos e sua correspondência com os reconhecidos intervalos sísmicos. Os perfis convencionais disponíveis como raios-gama, resistividade, porosidade, sônico dT e porosidade, não apresentaram uma grande diferenciação no intervalo de estudo e, portanto, não foram utilizados para caracterizar as sismofácies. Para o estudo das sismofácies foram analisadas 84 fotografias de lâminas delgadas para quantificar e qualificar as litologias existentes em cada uma das sismofácies, e correlacionar com os padrões sísmicos identificados. Estas fotografias foram fornecidas pela ANP como material integrante do conjunto de dados dos poços disponíveis para estudos e pesquisas acadêmicas. Nenhuma lâmina foi disponibilizada para descrição neste estudo.

#### **4.4 Integração de Dados**

Todos os dados adquiridos, processados, analisados e interpretados foram integrados para facilitar a interpretação do arcabouço sismoestratigráfico do Campo de Tupi e, com isso, desenvolver um modelo geológico evolutivo para os reservatórios Aptianos do intervalo de estudo.

## 5 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A base do intervalo de estudo é uma discordância regional bem conhecida, denominada de Discordância pré-NeoAlagoas (Winter et al., 2007). O topo do intervalo é representado por uma discordância regional que separa os depósitos carbonáticos da BVF dos evaporitos da Fm. Ariri (Figura 10-A), o que também foi reconhecido por Assine *et al.* (2008). A partir do mapeamento completo e sistemático dos refletores e suas terminações foi possível identificar três superfícies estratigráficas (SS) que delimitam as quatro unidades sísmicas (SU) encontradas (Figura 10B). Além disso foram definidas duas sismofácies (SFA e SFB), através da análise da textura sísmica e seus atributos.

A SU1 representa o início da deposição no intervalo de estudo, marcando o novo estágio de criação no espaço de acomodação. Ela preenche os baixos topográficos em padrão *onlap* sendo, portanto, controlada pela estrutura herdada da fase rifte. Há ocorrências de *downlap* principalmente nos altos topográficos e o topo da unidade apresenta principalmente truncamentos erosivos na SS1.

A SU2 é espacialmente e estruturalmente muito similar à unidade anterior, tendo a deposição sendo controlada pelo Alto Externo, na região Sudeste. Os refletores apresentam principalmente terminações *downlap* sobre a SS1, além de truncamentos erosivos e *toplap* sob a superfície superior SS2.

A SU3 é a primeira unidade a ultrapassar o Alto Externo. Os refletores apresentam terminações em *downlap*, com componentes *onlap* restritos aos baixos topográficos. O topo da unidade é representado pela SS3 na parte central, com refletores principalmente concordantes, e pela base do sal, com truncamentos erosivos e algumas partes concordantes.

A US4 foi intensamente afetada por processos erosivos, sendo preservada apenas na área central do intervalo de estudo, numa tendência N-S. Os refletores basais apresentam predominantemente *onlap*, enquanto os superiores são representados por truncamentos erosivos e *toplap*.

De modo geral, as unidades sísmicas encontradas seguem um padrão contínuo de deposição, começando com o preenchimento de pequenos vales isolados nas unidades basais, conectando essas pequenas bacias e por fim, ultrapassando o alto externo, ocorrendo a deposição em todo o intervalo, indicando um aumento constante

na criação do espaço de acomodação (Figura 10-D). Posteriormente a região foi afetada por processos erosivos que afetaram a maior parte da US4, tornando-a um relicto. Estes processos também atuaram fortemente sobre a US3, o que indica que houve uma mudança no regime eustático com o rebaixamento do nível do lago, podendo ter exposto as unidades antes da espessa deposição do sal da Fm. Ariri.

As duas sismofácies (SFA e SFB) foram identificadas a partir de características texturais e de configuração dos refletores, principalmente continuidade, amplitude e frequência sísmica, juntamente com os atributos sísmicos *Normal Phase*, *Consine of Phase* e *Trace AGC*, que modificam o sinal normal para uma melhor visualização das propriedades dos refletores (Figura 10-C). Juntamente a isso, foram analisadas microfotografias de lâminas delgadas de cinco poços testemunhados ao longo da área de estudo, revelando que as sismofácies definidas não correspondem à simples litologias de distribuição, mas sim a diferentes padrões de combinação e a predominância de certos tipos litológicos em relação a outros.

A SFA é predominante no intervalo de estudo, apresenta refletores descontínuos a semi-contínuos, de baixa a média amplitude e grande continuidade lateral (Figura 10-C). Ela corresponde a uma predominância de depósitos lamosos (argilas-Mg), representados por *mudstones*, *muddy spherulstones* e *spherulstones*, e que foram parcialmente substituídos por esferulitos de calcita, dolomita microcristalina, calcita e sílica em regiões mais profundas do sistema lacustre. Estes depósitos dominam a Fm. Barra Velha ao longo de grande parte da área, principalmente nas unidades sísmicas basais e médias SU1 e SU2 (Figura 10-D).

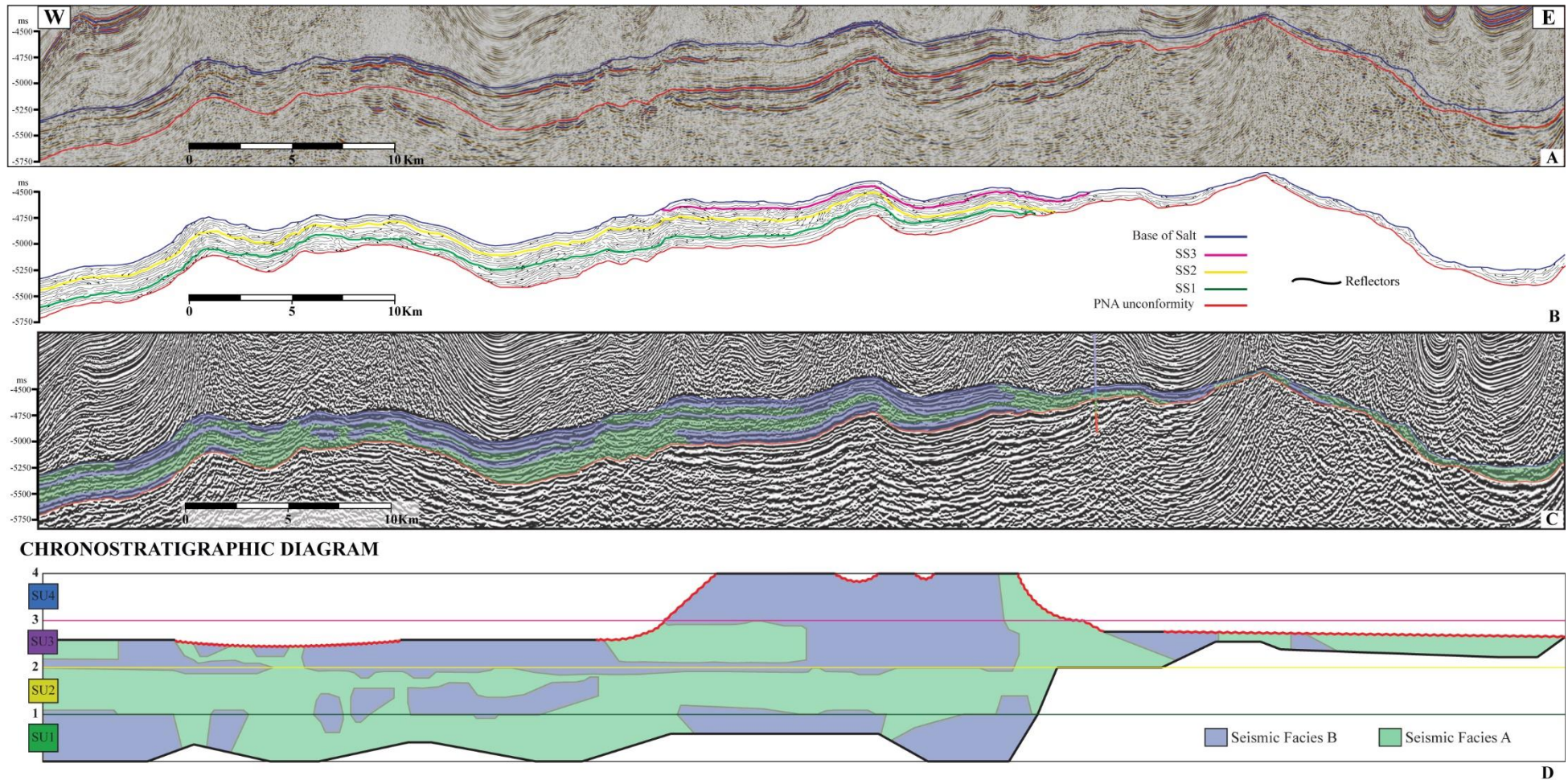


Figura 10: Linha sísmica 0575 A) em fase normal com as superfícies de topo (azul) base (vermelho); B) com a interpretação das terminações dos refletores e as unidades sísmicas encontradas; C) com atributo *cosine of phase* e interpretação das duas sismofácies identificadas; D) diagrama cronoestratigráfico mostrando a interação temporal entre os eventos deposicionais das unidades sísmicas e sismofácies.

Já a SFB é subordinada, apresenta refletores contínuos, de média a alta amplitude e baixa continuidade lateral (Figura 10-C). Essa unidade ocorre como corpos isolados, principalmente nas unidades superiores (SU3 e SU4) do intervalo (Figura 10-D). Ela apresenta uma predominância de *shrubstones* entre os depósitos *in situ*, e de calcarenitos intralclásticos e calcirruditos retrabalhados a partir destes depósitos *in situ*. A distribuição predominante da SFB, juntamente com as unidades sísmicas superiores SU3 e SU4 e nas partes relativamente mais altas da área de estudo, é consistente com os processos interpretados para a gênese dos depósitos fasciculares e retrabalhados da Formação Barra Velha na maioria das publicações recentes e apoiadas por evidências (p.e., Wright e Barnett, 2015; 2017; 2020; Herlinger *et al.*, 2017; Lima e De Ros, 2019; Gomes *et al.*, 2020; Pietzsch *et al.*, 2020; Carramal *et al.*, 2022; Wright, 2022)

A interação geral entre sismofácies reconhecidas indica uma relação complexa da SFA com a SFB. A SFB aparece como corpos isolados em todas as unidades sísmicas, mas raramente um corpo isolado ocorre em duas unidades sísmicas simultaneamente. Eles estão situados predominantemente na base da SU1, no centro da SU2, como corpos dispersos na SU3, e através da maior parte da SU4, particularmente nos altos topográficos (Figura 10-D).

As configurações deposicionais identificadas neste trabalho, principalmente a configuração pós-deposicional da região do Campo de Tupi, juntamente com a continuidade e padrão *onlap* das unidades sísmicas ao alto estrutural remanescente da erosão pós-rifte, suporta mais o modelo de lago evaporítico raso do que o lago profundo com plataformas microbiais.

## 6 REFERÊNCIAS

- Allen, P. A. & Allen, J. R. 2005. Basin analysis: Principles and application. Blackwell Pub Malden, MA. 549p.
- Amarante, F. B. 2021. Impacto da topografia rifte na tectônica e sedimentação dos estágios sag e margem passiva – Bacias de Campos e Espírito Santo, sudeste do Brasil. 129p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Assine, M.L., Correa, F.S., Chang, H.K., 2008. Migração de depocentros na Bacia de Santos: importância na exploração de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 38 (2 – suplemento).
- Bosence, D.W.J. 1998 Stratigraphic and sedimentological models of rift basins. In: B.H. Purser and D.W.J. Bosence (Ed.). *Sedimentation and Tectonics of Rift Basins: Red Sea-Gulf of Aden*. London, Chapman and Hall, pp. 9-26.
- Braun, J. & Beaumont, C. 1989. Dynamical models of the role of crustal shear zones in asymmetric continental extension. In: *Earth and Planetary Science Letters*, 93, 405-423.
- Brown, L. F. & Fisher, W. L. 1980. Seismic-stratigraphy interpretation of depositional systems: examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins. In: Payton C.E. (Ed.) *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Research*. AAPG, Memoirs 26, p. 213-248.
- Brumbaugh, B., Cameron, N., Henry, S.G., 1994. A new pre-salt source rock for central West African deep water? Abstract, AAPG Annual Meeting, 12–15 June 1994, Denver, Colorado.
- Brune, S., Heine, C., Pérez-Gussinyé, M. & Sobolev, S.V. 2014. Rift migration explains continental margin asymmetry and crustal hyper-extension. *Nature Communications*.
- Carramal, N.G., Oliveira, D.M., Cacela, A.S.M., Cuglieri, M.A.A., Rocha, N.P., Viana, S.M., Toledo, S.L.V., Pedrinha, S., De Ros, L.F., 2022. Paleoenvironmental insights from the deposition and diagenesis of Aptian Pre-Salt magnesium silicates from the Lula Field, Santos Basin, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 92, p. 12–31. <https://doi.org/10.2110/jsr.2020.139>
- Chang, H.K., Assine, M.L., Corrêa, F.S., Tinen, J.S., Vidal, A.C., Koike, L., 2008. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Rev. Bras. Geociências*, 38(2-Suplemento): 29-46.



- Chang, H.K., Kowsmann, R.O., Figueredo, A.M.F., Bender, A.A. 1992., Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213:97-138.
- Coward, M.P. 1986. Heterogeneous stretching, simple shear and basin development. *Earth and Planetary Science Letters*, 80, 325-336.
- Cruz, L. R. 2008. Caracterização tectono-estratigráfica da sequência transicional na sub-bacia de Sergipe. 195 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Demercian, L.S., 1996. A halocinese na evolução do sul da Bacia de Santos do Aptiano ao Cretáceo superior. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 201p.
- Dias, J.L., 1998. Análise sedimentológica e estratigráfica do Andar Aptiano em parte da Margem Leste do Brasil e no Platô das Malvinas: considerações sobre as primeiras incursões e ingressões marinhas do Oceano Atlântico Sul Meridional. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 208 p. Tese (Doutorado).
- Gabrielsen, R. H., Kyrkjebø, R., Faleide, J. I., Fjeldskaar, W. & Kjennerud, T. 2001. The Cretaceous post-rift basin configuration of the northern North Sea. *Petroleum Geoscience*, 7, p. 137-154.
- Gomes, J.P., Bunevich, R.B., Tedeschi, L.R., Tucker, M.E., Whitaker, F.F., 2020. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt. *Marine and Petroleum Geology*, 113, 104-176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104176>
- Henry, S.G., Brumbaugh, W., Cameron, N.R., 1995. Pre-salt source rock development on Brazil's conjugate margin: West African examples (abs.) First Latin American Geophysical Conference, 20–24 August 1995, Rio de Janeiro, Brazil.
- Herlinger Jr., R., Zambonato, E.E., De Ros, L.F., 2017. Influence of diagenesis on the quality of Lower Cretaceous Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs from

northern Campos Basin, offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 87, p. 1285-1313. <https://dx.doi.org/10.2110/jsr.2017.70>

Karner, G.D., Driscoll, N.W., 1999. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian Margins: insights from quantitative basin modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, 153(1), 11–40. [doi:10.1144/gsl.sp.1999.153.01.02](https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.153.01.02)

Kingston, D. R., Dishroon, C. P. & Williams, P. A. 1983. Global Basin Classification System. *American Association of Petroleum Geologist. Bull.*, 67, 2157-2193.

Kuchle, J. & Scherer, C, M, S. 2010. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia do Recôncavo. *Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro*, v.18, n.2, p.179.

Lentini, M.R., Fraser, S.I., Sumner, H.S., Davies, R.J., 2010. Geodynamics of the central South Atlantic conjugate margins: implications for hydrocarbon potential. *Petroleum Geoscience*, Vol. 16, pp.217-229. [DOI: 10.1144/1354-079309-909](https://doi.org/10.1144/1354-079309-909).

Lima, B.E.M., De Ros, L.F., 2019. Deposition, diagenetic and hydrothermal processes in the Aptian Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, offshore Brazil, *Sedimentary Geology*, v. 383, p. 55-81.

Mckenzie, D. P. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basin. *Earth and planetary Science. Letters*, 40, 25-52.

Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R., Sangree, J.B., 1977 (b). Seismic Stratigraphy and global Changes of Sea Level. Part 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap. In: Payton, C. E. (Eds.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon*. AAPG Memoir 26: 63-81.

Nichols, G., 2009. *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley and Sons.

Pereira, M.J. & Feijó, F. 1994. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras. Rio de Janeiro* 8 (1), p.219-234.

- Petrobrás. 2010. Declaração de comercialidade das áreas de Tupi e Iracema. Disponível em <<https://www.investidorpetrobras.com.br/ptb/6003/c-6003-ptb.html>>. Acesso em: 09 out. 2018.
- Pietzsch, R., Tedeschi, L.R., Oliveira, D.M., Anjos, C.W.D., Vazquez, J.C., Figueiredo, M.F., 2020. Environmental conditions of deposition of the Lower Cretaceous lacustrine carbonates of the Barra Velha Formation, Santos Basin (Brazil), based on stable carbon and oxygen isotopes: A continental record of pCO<sub>2</sub> during the onset of the Oceanic Anoxic Event 1a (OAE 1a) interval?. *Chemical Geology*, v. 535, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119457>
- Prosser, S. 1993. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. In: Williams G.D. & Dobb, A. (Eds.). *Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy*. Geological Society of London Special Publication 71, pp. 35-66.
- Quirk, D.G., Hertle, M., Jeppesen, J.W., Raven, M., Mohriak, W.U., Kann, A.D.J., Norgaard, M., Howe, M.J., Hsu, D., Coffey, B., Mendes, M.P., 2013. Rifting, subsidence and continental break-up above a mantle plume in the central South Atlantic. *Geological Society of London, Special Publications*, v. 369, p. 185-214.
- Rangel, H.D., Carminatti, M., 2000. Rift Lake stratigraphy of the Lagoa Feia Formation, Campos Basin, Brazil, in E. H. Gierlowski-Kordesch and K. R. Kelts, eds., *Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology* 46, p. 225-244.
- Ribeiro, H. J. P. S. 2001. *Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e Aplicações*. São Leopoldo-RS, Ed. Unisinos, 481p.
- Saller, A., Rushton, S., Buambua, L., Inman, K., McNeil, R., Dickson, J.A.D., 2016. Presalt stratigraphy and depositional systems in the Kwanza Basin, offshore Angola. *AAPG Bulletin*, 100, 1135–1164.
- Sloss, L. L. 1963. Sequences in the cratonic interior of North America. *Geo. Soc. America Bull.*, v. 74, p. 93-114.

- Unternehr, P., Peron-Pinvidic, G., Manatschal, G., Sutra, E., 2010. Hyperextended crust in the South Atlantic: in search for a model. *Petroleum Geoscience*, 16, doi [10.1144/1354-079309-904](https://doi.org/10.1144/1354-079309-904).
- Vail, P.R., Mitchum Jr., R.M., 1977. Seismic Stratigraphy and global Changes of Sea Level Part 1: Overview. In: Payton, C. E. (Eds.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon*. AAPG Memoir 26: 51-52.
- Vail, P.R., Tood, R.G., Sangree, J.B., 1977. Seismic Stratigraphy and global Changes of Sea Level. Part 5: Cronostratigraphy Significance of Seismic Reflection. In: Payton, C. E. (Eds.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon*. AAPG Memoir 26: 99-116.
- Watts, A. B., Karner, G. D. & Steckler, M. S. 1982. Lithospheric flexure and the evolution of sedimentary basins, *Phil. Tram. R.SOC. London A*, 305,246-281.
- Wernicke, B. & Burchfiel, B.C. 1982. Modes of extensional tectonics. *Journal of structural Geology*, v. 4, p. 105-115.
- Wernicke, B. 1985. Uniform sense, normal simple shear of the continental lithosphere. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22, p. 108-125.
- Winter, W.R., Jahnert, R.J., França, A.B., 2007. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15, 511–529 (in Portuguese).
- Wright, V.P., 2022. The mantle, CO<sub>2</sub> and the giant Aptian chemogenic lacustrine carbonate factory of the South Atlantic: Some carbonates are made, not born. *Sedimentology*, v. 69, p. 47-73. <https://doi.org/10.1111/sed.12835>
- Wright, V.P., Barnett, A.J., 2015. An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic Early Cretaceous lacustrine carbonates..*Geological Society of London, Special Publications no.418*, p. 209-219.
- Wright V.P., Rodriguez, K., 2018. Reinterpreting the South Atlantic Pre-Salt ‘microbialite’ reservoirs: petrographic, isotopic and seismic evidence for a shallow evaporitic lake depositional model. *First Break*, v. 36, p. 71-77.
- Wright, V.P., Barnett, A.J., 2017. Critically Evaluating the Current Depositional Models for the Pre-Salt Barra Velha Formation, Offshore Brazil. *Search and Discovery*

Article #51439, adapted from Keynote Address given at AAPG/SEG International Conference and Exhibition, London, England, October 15-18.

Wright, V.P., Barnett, A.J., 2019. The textural evolution and ghost matrices of the Cretaceous Barra Velha Formation carbonates from the Santos Basin, offshore Brazil. *Facies*, v. 66(7), 18 pp. <https://doi.org/10.1007/s10347-019-0591-2>

## 7 ARTIGO SUBMETIDO

### Confirming submission to Journal of South American Earth Sciences

Caixa de entrada x

**Journal of South American Earth Sciences** <em@editorialmanager.com> seg., 2 de mai. 10:51 (há 9 dias) ☆ ↶  
para mim ▾

\*This is an automated message.\*

SEISMIC STRATIGRAPHIC FRAMEWORK AND SEISMIC FACIES OF THE APTIAN PRE-SALT BARRA VELHA FORMATION IN THE TUPI FIELD, SANTOS BASIN, BRAZIL

Dear Mr. Sommer,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Journal of South American Earth Sciences.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/sames/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,  
Journal of South American Earth Sciences

**SEISMIC STRATIGRAPHIC FRAMEWORK AND SEISMIC FACIES OF THE  
 APTIAN PRE-SALT BARRA VELHA FORMATION IN THE TUPI FIELD, SANTOS  
 BASIN, BRAZIL**

**Vitor P. Sommer <sup>a,\*</sup>; Juliano Kuchle <sup>a</sup>; Luis F. De Ros <sup>a</sup>**

*<sup>a</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, 91509-900, Brasil*

*\*Corresponding Author*

*E-mail Addresses: [vitorpsommer@gmail.com](mailto:vitorpsommer@gmail.com) (V. Sommer); [juliano.kuchle@ufrgs.br](mailto:juliano.kuchle@ufrgs.br) (J. Kuchle); [lfderos@inf.ufrgs.br](mailto:lfderos@inf.ufrgs.br) (L.F. De Ros)*

**Abstract**

The discovery of giant oil accumulations in the Pre-salt (sag) section of Santos Basin, has attracted huge interest on the lacustrine carbonate deposits of the Aptian Barra Velha Formation. Although for the significant volume of publications on the Pre-salt section, there is still limited understanding of its tectono-stratigraphic evolution, and lack of a coherent published stratigraphic framework for the Tupi Field, the largest and most productive Pre-salt accumulation. The aim of this work is to define a seismic-stratigraphic framework in the Aptian Pre-salt interval of the Tupi Field, using 19 seismic lines, and thin sections photomicrographs from 13 wells. Four seismic units (US1, US2, US3, and US4) and two seismic facies (SFA and SFB) were identified. The depositional pattern of the seismic units is of continuous expansion of the accommodation space, although with significant erosion at the top of US4. SFA is composed mostly by calcite spherulites and Mg-clays mud, which constitutes the background of lacustrine sedimentation formed and/or preserved in preferentially relatively deeper areas. SFB corresponds to crusts of calcite fascicular shrubs preferentially precipitated in relatively higher areas, and to intraclastic deposits of reworked spherulites and shrubs. The pre-NeoAlagoas unconformity represents the base of the study interval. The top is characterized by a regional unconformity which represents temporal gap between the youngest of the units (US4) and the start of the

evaporitic deposits of the Ariri Formation. No additional unconformities were identified within the Barra Velha Formation in the Tupi Field, characterizing a continuously expansive deposition on a flat, tabular and onlapping pattern over the Outer High, representing a continuous accommodation creation, under low tectonic activity. The predominant post-depositional configuration, together with the continuity and onlap patterns of seismic units onto a remanent high, support a shallow evaporitic lake model, rather than a deep lake with microbial platforms for the Tupi Field area.

*Keywords:* Carbonate Reservoir, Pre-salt, Barra Velha Formation, Tupi Field, Seismic-stratigraphic Framework.

## 1. Introduction

The main petroleum fields of Brazil produce from the Pre-salt section of Santos Basin (ANP, 2021). The origin of these deposits is related to the Gondwana supercontinent breakup and the resulting opening of the Atlantic Ocean during the Early Cretaceous. The Santos Basin extends through approximately 350,000 Km<sup>2</sup> of southeastern Brazilian coast, with up to 10 Km infill in its depocenter (Chang, *et al.*, 2008).

The study area is in the Tupi Field of Santos Basin around 230 Km offshore from the Rio de Janeiro coast, eastern Brazilian coast (Figure 1 below). The interval of interest is between 4,700 to 6,000 meters beneath sea level, with more than 2,000 meters of water column and 2,000 meters of salt column (ANP, 2018). With 1,875 Km<sup>2</sup>, Tupi is not only the largest, but also the main oil producer in Brazil, with an average daily production of 948,076 bbl (ANP, 2021).

The main objectives of this work are: (1) to provide a seismic-stratigraphic framework to the Aptian Barra Velha Formation (BVF) of the Tupi Field, comprising seismic units and surfaces, and their recognition patterns and geological significance; (2) to define seismic facies by combining seismic textures with petrographic characteristics, in order to propose; (3) a geological evolution model for the BVF in the area. We hope that these results and interpretations may contribute to the exploration of other areas in the pre-salt province, as well as for increasing the recovery efficiency from the producing fields.



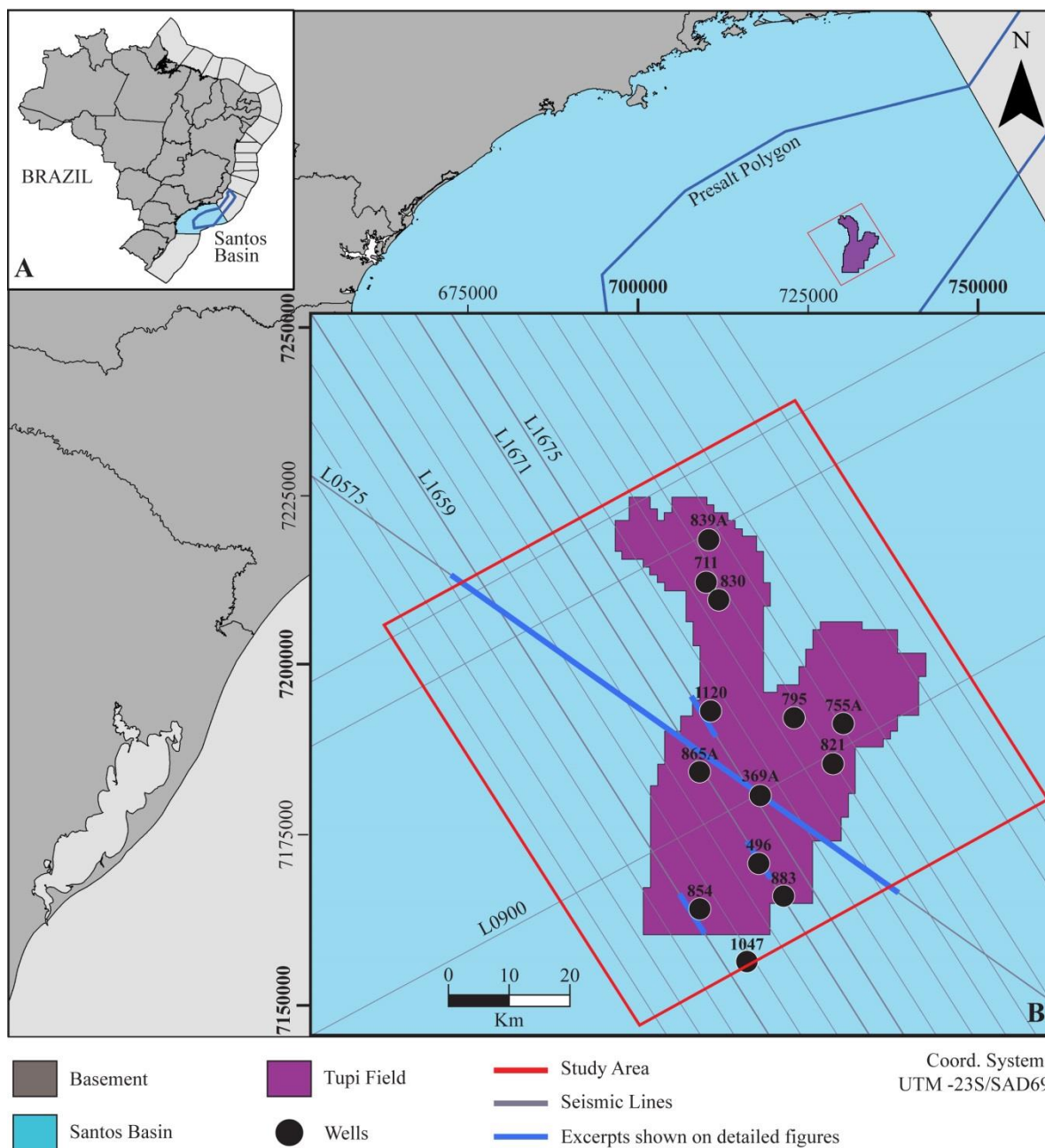


Figure 1: (A) Location map of the Santos Basin. (B) Location map of the study area with 2D seismic lines and wells studied. Data from Geodata/ANP 2021. All shown seismic panels are within the study area boundary.

## 2. Geological Setting

Tupi Field was discovered in 2006 by a Petrobras consortium with Petrogal and Shell. The stratigraphic study interval corresponds to the essentially carbonate Barra

Velha Formation (Figure 2). This unit was deposited in a geological context of regional thermal subsidence, characteristic of the so-called sag section of the basin. This condition developed after the mechanical subsidence of the rift section ceased, as final crustal adjustments preceding the effective continental breakup took place (Karner and Driscoll, 1999; Karner and Gamboa, 2007).

The rift section is divided into two phases, sin-rift I and II (Chang *et al.*, 1992; Karner and Driscoll, 1999). The syn-rift I phase represents the economic basement of the Basin, composed of volcanic rocks of the Camboriú Formation. The syn-rift II phase is characterized by a fluvial-lacustrine environment, responsible for the deposition of organic matter-rich sediments from the Piçarras Formation, main pre-salt source rocks, and the bioclastic carbonates of the Itapema Formation (Karner and Driscoll, 1999; Chang *et al.*, 2008).

The sag section (Brumbaugh *et al.* 1994; Henry *et al.* 1995; Quirk *et al.*, 2013), also called the sin-rift III (Chang *et al.*, 1992), or the transitional section (Pereira and Feijó, 1994), is characterized by a large laterally continuous regional depression, generated predominantly by thermal subsidence. The expressive evaporitic deposition of this phase was controlled by the presence of volcanic highs (Sao Paulo Dorsal), which restricted the circulation of seawater from the south, and by a hot and dry climate (Demercian, 1996). This sag basin seems to have extended widely from the Santos (South) to the Pernambuco (North) basins, and also along their African basins counterparts (Karner and Driscoll, 1999; Dias, 1998; Rangel and Carminatti, 2000; Unternehr *et al.*, 2010; Lentini *et al.*, 2010; Saller *et al.*, 2016). The transition of a lacustrine to a shallow marine environment promoted a change from the chemical deposits of magnesian clays and calcite of the BVF to the evaporites of the Ariri Formation (Pereira and Feijó, 1994). The evaporation rate promoted the deposition of up to 3 km thick salt layers (Chang *et al.* 1990, Pereira and Macedo, 1990). Thus, the main Pre-salt reservoirs of the BVF are composed of carbonate rocks, which seal corresponds mostly to halite and anhydrite of the Ariri Formation.

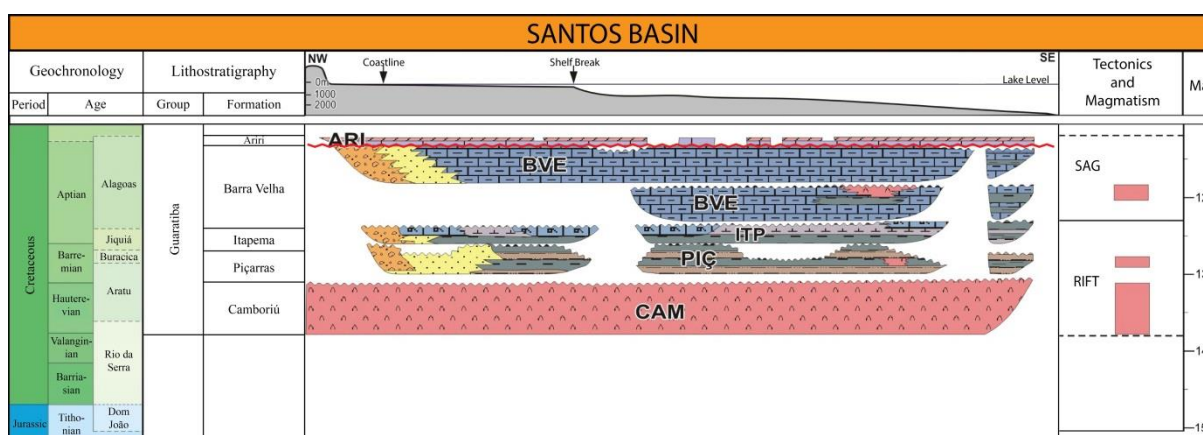


Figure 2: Stratigraphic chart of the rift and post-rift (sag) sections of the Santos Basin. Modified from Moreira *et al.* (CAM = Camboriú Fm., PIÇ = Piçarras Fm., ITP = Itapema Fm., BVE = Barra Velha Fm., ARI = Ariri Fm.).

### 3. Materials and Methods

This work was developed using 19 2D seismic lines, of large regional size, from the 0258\_2D\_SPEC\_BM\_S survey. These lines are final migrated, zero-phase, two-way travel time, without depth conversion. The seismic attributes used for seismic facies definition were the Relative Acoustic Impedance and Cosine of Phase. A set of 13 exploratory wells, all with checkshots, was used to verify the lithologic correspondence of the recognized seismic intervals. Photomicrographs of representative thin sections from sidewall samples were selected for the identification of the characteristic Pre-salt lithological types. Conventional well logs, such as gamma-ray, resistivity, sonic dT, and density present no significant differentiation within the interval, and thus were not used to characterize the seismic facies. All the data was made available by ANP (Brazilian Petroleum Agency), according to the academic data sharing to universities policy (orders 10252 and 10253).

The produced maps were all prepared on TWT (two-way travel time), due to the original seismic source. This includes structural maps (on vertical TWT based - milliseconds), and time-based thickness (milliseconds), also called isochores. Although knowing the limitations of time-based thickness maps, mainly related to the lack of real thickness determination, and the lateral variations in real thickness due to the heterogeneous velocity interval, we still considered useful such maps to locate

relative lows, highs, and regional thickness variations. We considered this information is relevant, even with this limitation, for areas with limited publication.

The first step in seismic stratigraphic interpretation involved the analysis of reflectors and their terminations, classified in *toplap*, *downlap*, *onlap*, and erosional truncation (Figure 3B). The analysis of those terminations allowed identifying the surfaces with the most significant chronological meaning, which define the seismic stratigraphic units (Mitchum Jr. *et al.*, 1977). In addition, the analysis of the geometric patterns as amplitude, continuity and frequency configurations of the reflectors were used to determine the seismic facies.

This methodology was first established by Vail and Mitchum Jr. (1977) based on passive margins, where the base level (sea level) is controlled by the relationship between accommodation space (tectonics and eustatic mechanisms of subsidence and uplift) and sedimentary influx. However, the study interval was developed in a continental breakup system which the base level is related to lake level (Vieira, 1998). Further, Nichols (2009) observed that variation of intracratonic lakes level with no connection to the sea was controlled by climate changes, making these cycles of level change more frequently.

A systematic mapping of reflectors terminations was done in four seismic lines of the entire sag interval. In this particular section (Figure 3A), the reflectors have good traceability at all depth levels, although lateral continuity decreases towards the southeast. The amplitudes are variable, and the biggest values are concentrated on the upper central region. Although the filling concordant with the top and base surfaces indicates tabular deposition in the interval, the apparently irregular pattern is due to the disturbance of the seismic response below the thick evaporitic package.

## 4. Results

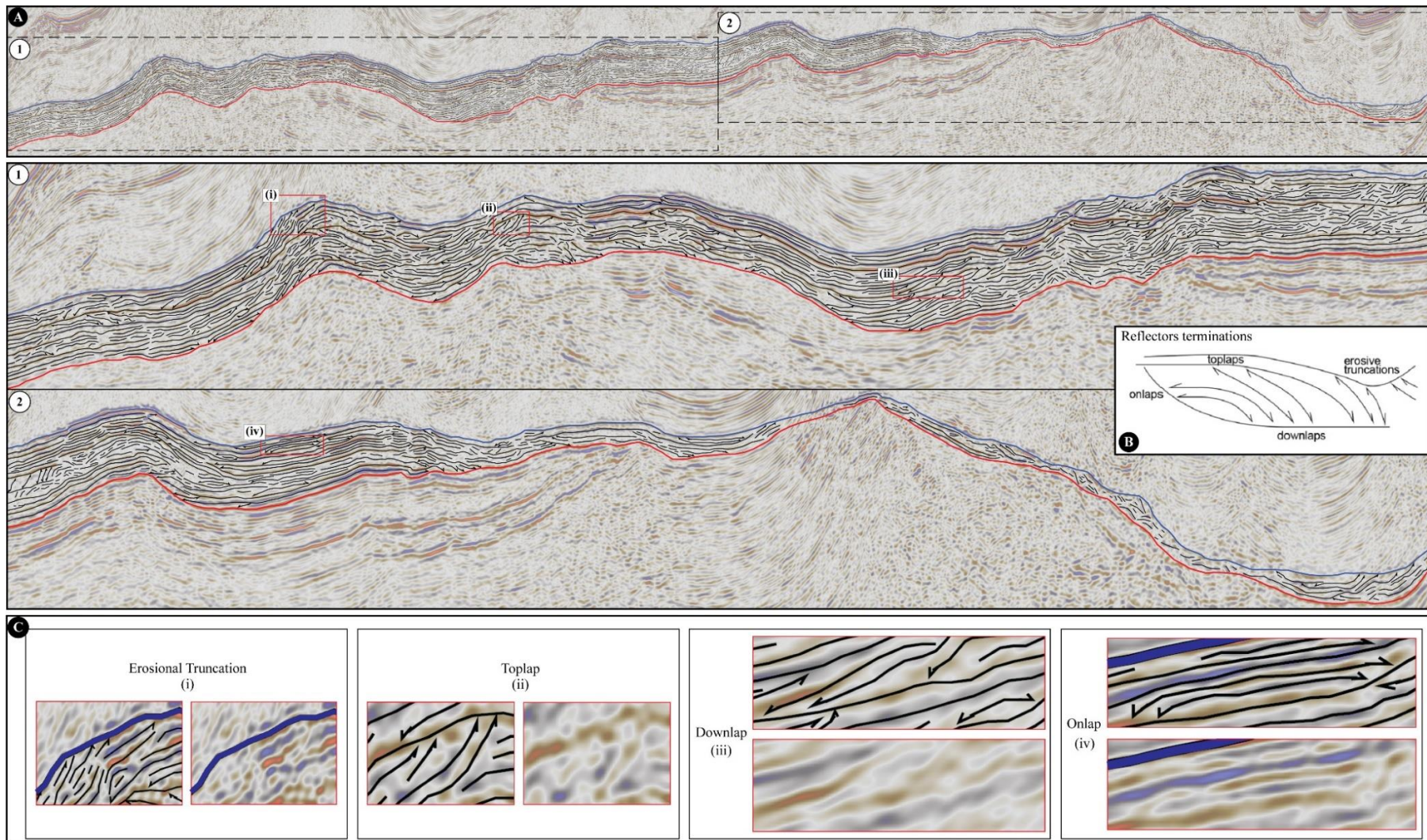


Figure 3: Summary chart for reflector termination analysis. (A) The general interpretation of reflectors from seismic 0575 with zoomed sections (1; 2). (B) Schematic interpretation of reflectors terminations. (C) Detailed view of types of reflector terminations found. (i) erosional truncation, (ii) toplap, (iii) downlap, and (iv) onlap.

#### 4.1. Top and Base of interval

The basal surface of the study interval is an unconformity that separates the divergent configuration of the rift phase from the parallel configuration of the sag phase. This unconformity is well-known and is called the pre-NeoAlagoas unconformity (Karner, 2000; Winter *et al.*, 2007), defining the base of the BVF. On the seismic lines, the basal surface has a high positive amplitude and presents top erosional truncations of lower reflections (syn-rift) at SE. However, the predominance is of reflectors concordance (Figure 3A). The top surface is located between the BVF and Ariri Formation. This surface is easily identified, because is marked by a highly positive amplitude reflector originated by the difference of acoustic impedance between the thick salt package from the Ariri Formation at the top, and the undelaying carbonates of the BVF (Figure 3A). As discussed ahead, the reflectors terminations against this surface are mainly erosional truncations (Figure 3C (i)), with few concordant pattern in some areas, defining an unconformity at the top of the BVF and base of the Ariri Formation evaporites. This unconformity was also recognized by Assine *et al.* (2008). Both surfaces match the lithostratigraphic tops in the wells. No significant thickening was recognized within the BVF, indicating a low tectonic activity during deposition.

The three-dimensional visualization of the basal surface (Figure 4A) and the top surface (Figure 4B) indicates the geomorphological similarities between them. Thus, the reminiscent morphology that controlled the deposition of the sag section have not changed during that time. The isochronous map of the top and base surfaces (Figure 4C) shows that the central zone is shallower than the external zone (on SEE). In addition, the Outer High (Gomes *et al.*, 2002; Fainstein *et al.*, 2003; Carminatti *et al.*, 2008) is shown in the top surface map, oriented SW-NE along the SEE zone, which exerted an important control on the depositional pattern of the BVF. The thickness map of the entire BVF (Figure 4D) corroborates with the previous figures, providing that the thicker areas are located mostly at the center, with a trend aligned to the Outer High and high values situated in the SW part of the study area. This indicates also that the Outer High was already established before the deposition of the BVF (controlling since its initial deposition).

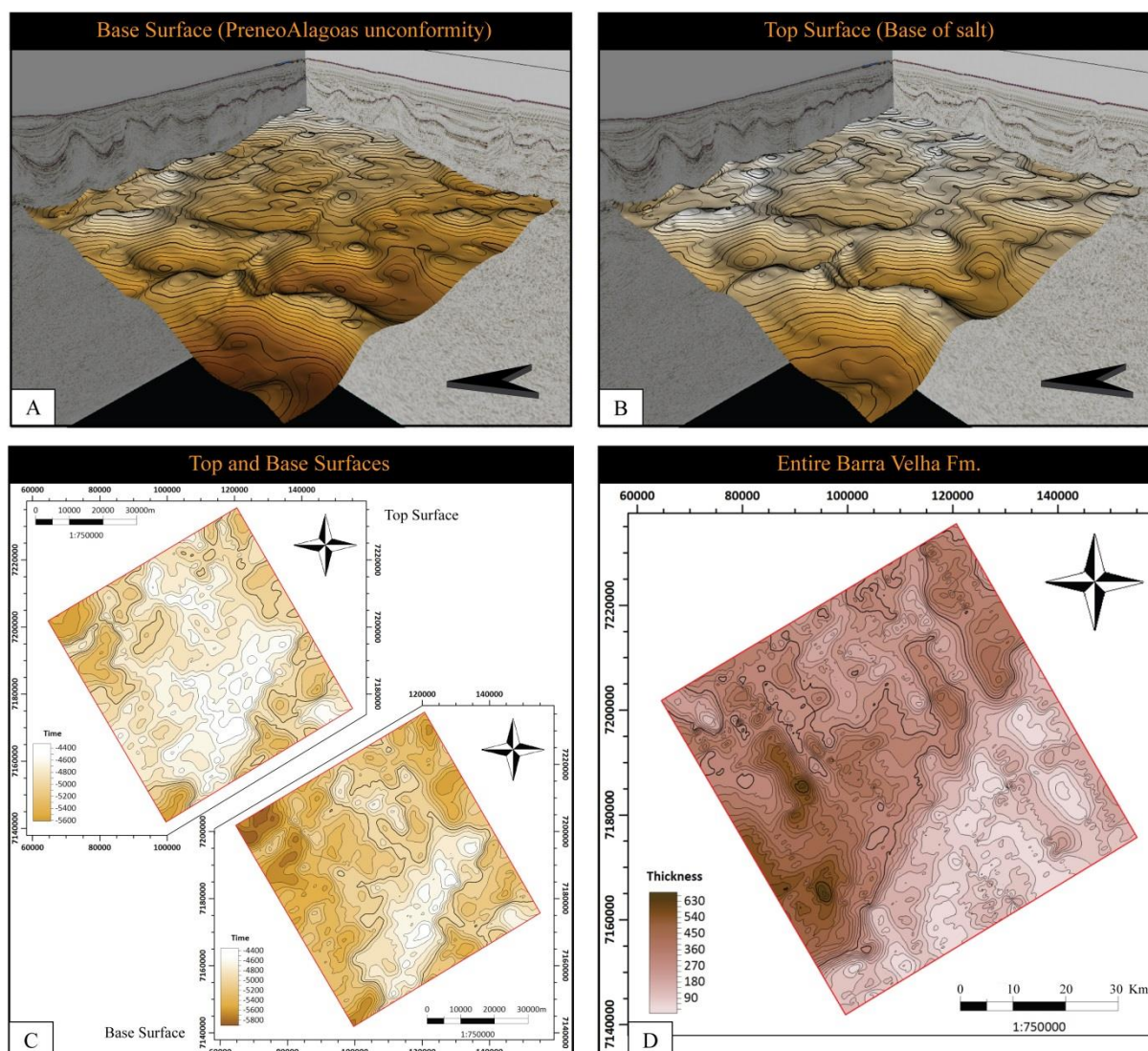


Figure 4: 3D view of (A) basal surface, and (B) top surface of the Barra Velha Formation in the study area. (C) Structural maps of basal and top surfaces (on TWT/ms), and (D) Isochore map of the entire Barra Velha Formation (ms).

## 4.2. Reflections Terminations

Along the 0575 regional seismic line (Figure 3A), the reflections show a predominantly concordance and parallelism. This indicates a tabular, relatively flat deposition, without prominent syn-depositional differential subsidence. Also, the thinning of the BVF interval to SE indicates, together with the successive basal onlaps, a depositional advance towards the basement high (Outer High). The main reflector terminations of Line 0575 are downlaps, onlaps, and toplaps, occurring in almost all

stratigraphy levels. There is a predominance of onlaps against the topographic highs (Figure 3C (iv)), mostly upon the pre-NeoAlagoas unconformity, which indicates a filling of already defined low areas. Successions of toplaps and downlaps are the most common internally to the interval, mostly in the center of the northwest area (Figure 3A (2)). The concordance of reflectors also occurs internally, but is concentrated in the upper part, near to the top surface, with high amplitude of reflectors. Erosional truncations (Figure 3C (i)) are also present, mainly at the upper part of the interval (base of salt), as well as double terminations toplap-downlap. The study interval becomes thinner through the southeast, where basal reflector terminations are predominantly onlap/downlap.

### 4.3. Seismic Units

Tracking successive reflector terminations on specific surfaces allowed the characterization of three seismic surfaces (SS) that separate four seismic stratigraphic units, from Seismic unit 1 (SU1), the oldest, to Seismic unit 4 (SU4) (Figure 5). Seismic stratigraphic units are depositional units related to different temporal events (Brown and Fischer, 1977). Occasionally, they are separated by stratigraphic surfaces, but they can also mark only successive depositional events without changes in patterns and trends. SU1 distribution is restrict to the southwest area, while SU4 was affected by posterior erosional processes that limited its record. Furthermore, isochore maps (Figure 6) were made in time (milliseconds), to visualize the depth of first occurrence and relative thickness of every seismic unit, allowing the understanding of tectonic-sedimentary evolution of the area.

SU1 lies upon the pre-NeoAlagoas unconformity and began its deposition by filling the lower regions of the southwest and limited by the structural high (Outer High) to the southeast, what is indicated by onlap terminations. Its basal surface separates the syn-rift deposits controlled by mechanical subsidence from the sag deposits, controlled by thermal subsidence. As sag basins are formed by lithospheric rebound (Brune *et al.*, 2014), SU1 represents the beginning of a new generation of accommodation space of the basin. Additionally, the pre-NeoAlagoas unconformity is marked by successive onlaps filling the lows, as well as by restricted downlaps



---

occurring in the highs (Figure 5B (i)). The top surface is called Seismic Surface 1 and separated SU1 from SU2. It is characterized by toplap terminations, and some erosional truncations at the SE (Figure 5B (ii)). The area of occurrence of SU1 is limited to the southwest, which indicates that region as the lowest of the study interval. The isochore map (Figure 6A) corroborates this, showing that Seismic Unit 1 is thinner on the external areas, while the probable depocenter is situated at the center of the southwest boundary of the study area. The time-thickness values may exceed 240 ms, but the average is around 150 ms.

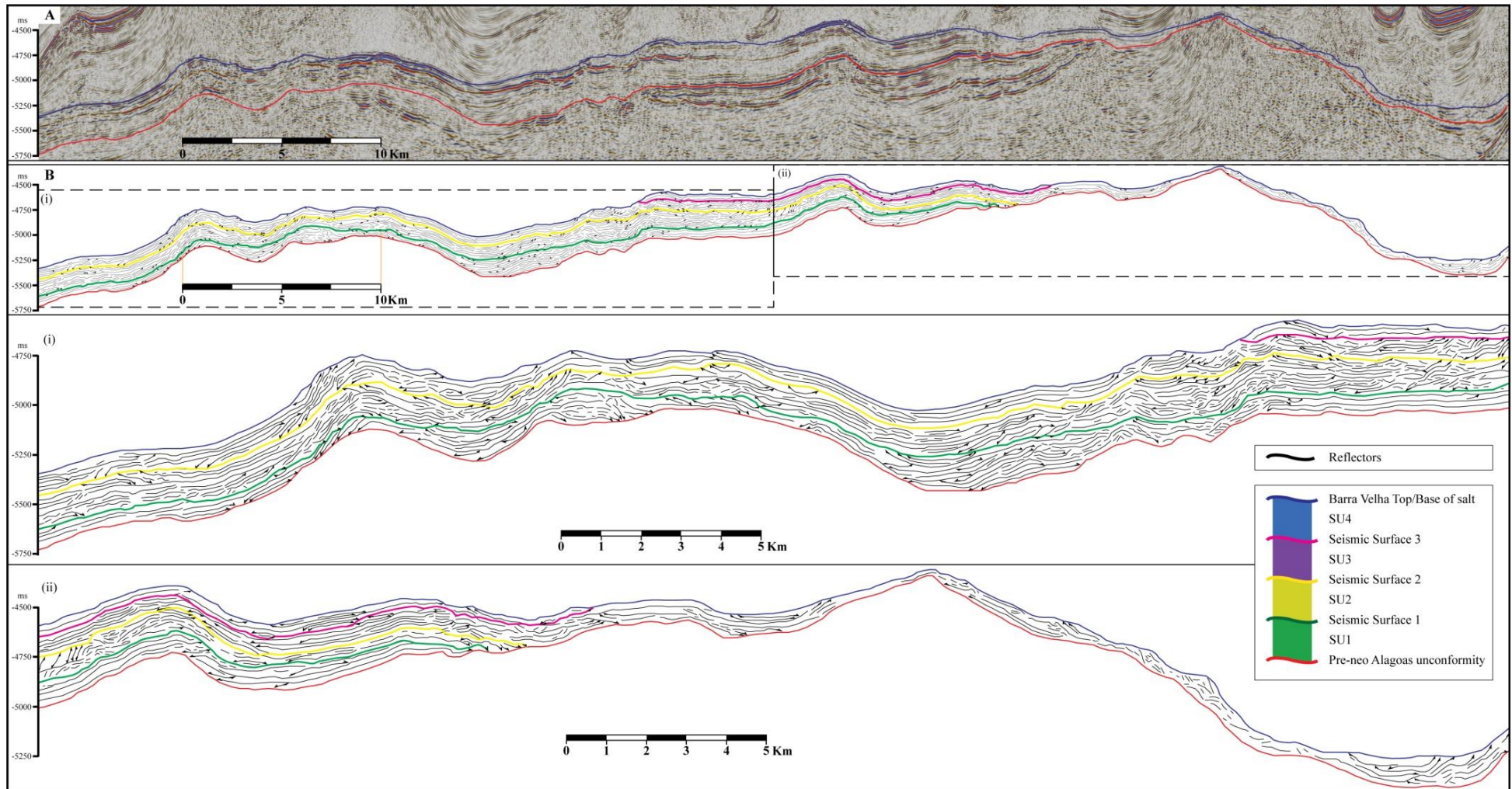


Figure 5: Seismic line 0575 (A) in normal phase without interpretation, (B) with the interpretation of reflectors termination and seismic stratigraphic units. (B-i) Detailed NW part and (B-ii) detailed SE part.

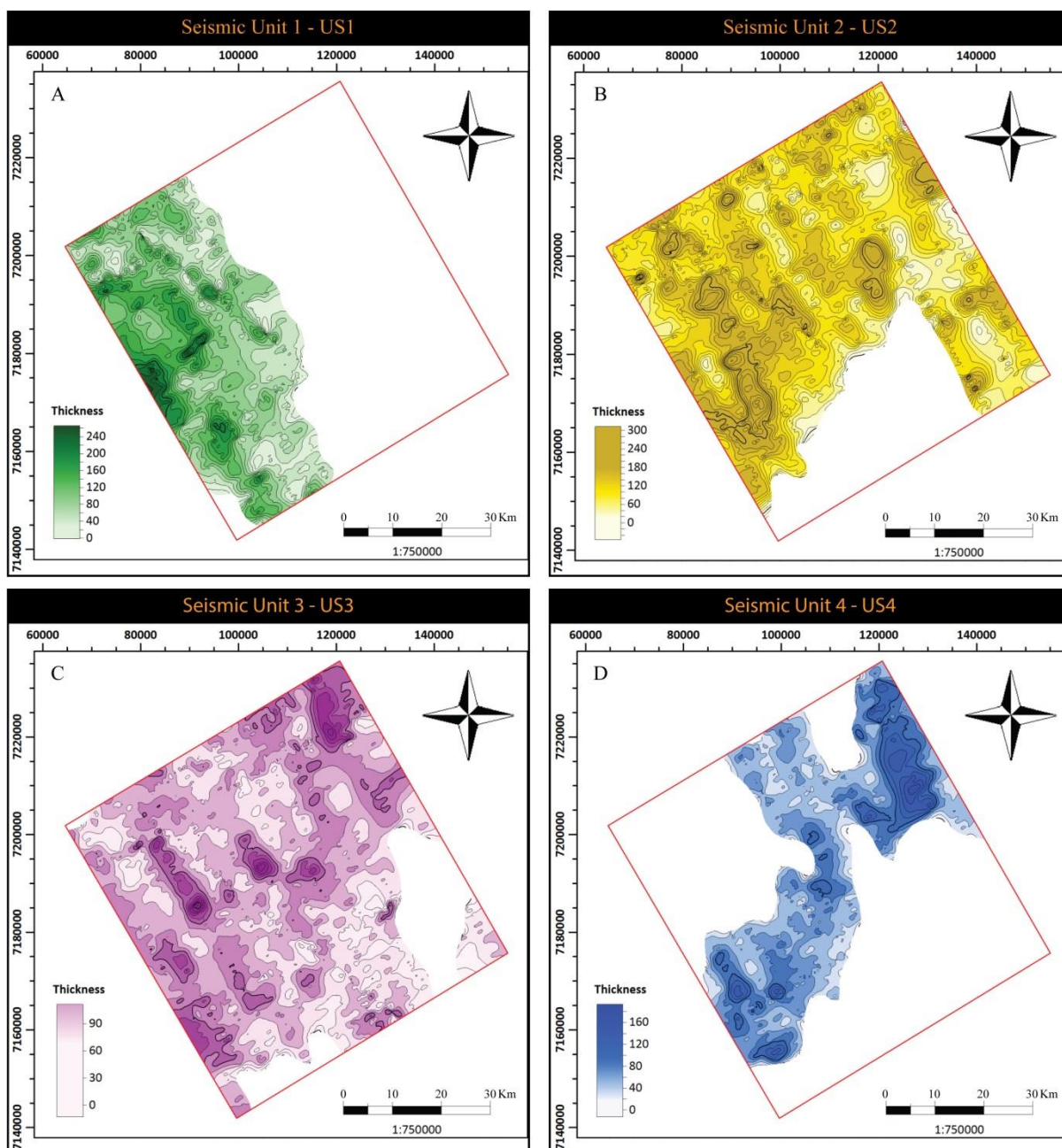


Figure 6: Isochore maps of each of the seismic units identified in the study interval. Units are in milliseconds.

SU2 covers the previous unit and lies upon the pre-NeoAlagoas unconformity in the center and northeast areas. Where SU2 lies upon SU1, its basal surface is called Seismic Surface 1. The main reflector terminations against this surface are downlaps (Figure 5B (i)), which occur in almost all the lines. Its top surface is Seismic Surface 2. The top terminations against this surface are erosional truncations at the center part (Figure 5B (i)), and toplaps (Figure 5B) at the SW and NE areas. Although it occurs in

almost the entire study area, it does not go beyond the Outer High. It is possible to say that the expansion rate of accommodation space stayed constant due to similarities seen in Figure 4C. The time-thickness varies, exceeding 300 ms in some places, but the average is around 150 ms, like SU1. As seismic unit 1, SU2 is thicker in the southwest region (Figure 6).

SU3, due to the constant rate of expansion in accommodation space, is the first unit to cross the Outer High (Figure 5C). Its basal surface is defined by the top of SU2 (SS2), and by the pre-NeoAlagoas unconformity at the Outer High. The basal reflectors terminations against the SS2 are predominantly downlaps with onlaps restricted to lows (Figure 5B (ii)). Where the basal surface is the pre-NeoAlagoas unconformity, the terminations are downlaps outside the Outer High and onlaps in the Outer High. The top surface corresponds to the base of salt, but also to SS3, which separates SU3 from SU4. The reflector terminations against those surfaces are somehow distinctive. Erosional truncations are more common against the base of salt, with few zones of concordance in the center and the SW area (Figure 5B (i)). Concordance of reflectors is also predominant against the SS3, but with toplap terminations mainly at the SW part (Figure 5B (i)). The top of the unit is preserved only where SU4 is preserved, the rest was eroded. Figure 6C shows that this unit is the thinnest of the interval, with values of no more than 120 ms. Additionally, SU3 does not show a main depocenter. However, there are some slightly thicker areas in the center and north of the study area.

SU4 is restricted to the upper center of the seismic lines, and its basal surface is SS3 (Figure 5C). The basal reflectors terminations correspond mainly to onlaps with zones of concordance (Figure 5B (i)(ii)). The top surface is the base of salt and is characterized by erosional truncation on the edge and concordance in the center. Its occurrence is limited to the center of the study area, along a north-south trend. The average time-thickness is about 100 ms, and the depocenter, located in the northeast, is over 160 ms thick (Figure 6D). The interpretation of the isochore map is very limited due to the erosion that affected this unit and made it a relict. Nevertheless, SU4 is inferred to have been deposited throughout the entire study area, due to a progressive increase in the accommodation space in the region, and after strongly eroded. The

reflectors show toplap terminations at the top and erosional truncations along the edge of the unit, which is also present on the top of SU3.

Many erosional truncations were mapped on a traceable surface, indicating a considerable erosional event between SU4 and the evaporites of the Ariri Formation. This erosional surface is continuous, eroding much of SU4 in the southeast and northwest regions, as well as part of SU3 in the south and southeast region. Therefore, can be inferred that after a progressive increase in the accommodation space from SU1 to SU4, there was a significant uplift before the deposition of the Ariri salts. The many erosional truncations, their distribution and recurrence, and the vertical erosion define the surface separating the top of SU4 and the base of Ariri Formation evaporites as an at least local unconformity, widespread along the entire Tupi Field.

#### **4.4. Seismic Facies**

Seismic facies are normally determined as patterns related to architectural elements, depositional systems, or sedimentary environments, depending on the scale and resolution. The seismic facies are defined by the combination of seismic data and well information to characterize a set of three-dimensional seismic units, comprising groups of reflectors with behavioral parameters that differ from the adjacent units (Brown and Fischer, 1977). In this study, the main types of seismic features applied in the recognition and mapping of seismic facies were: (i) seismic amplitude, (ii) continuity of reflectors, (iii) geometry of reflectors, and (iv) seismic frequency properties. For this, the attribute cosine of phase and trace AGC (Amplitude Gain Control) were used together with the normal phase to define two seismic facies (Figure 7).

The information obtained from seismic recognition was integrated with well data to construct a seismic facies model that allowed correlation with the lithological composition of the BVF in the study area.

Seismic facies A (SFA) comprises discontinuous to semi-continuous reflectors, with low to medium amplitude, and small lateral continuity (Figure 7C), with an average of 3,000 meters in the study area. The spatial arrangement of this seismic facies varies along with the study interval, with a tendency of concentration in the lower seismic units

---

SU1 and SU2 (Figure 8A). SFA has no particular external geometry. However, it presents sheet and sheet drape geometries in parts of the seismic sections.

Seismic facies B (SFB) presents continuous reflectors, with high to medium amplitude, with large lateral continuity (Figure 7C), with an average of 1,500 meters. This seismic facies is dominantly arranged as isolated bodies with sheet geometry, mainly in the upper seismic units SU3 and SU4, but also in the lower central zone of the study area (Figure 8A).

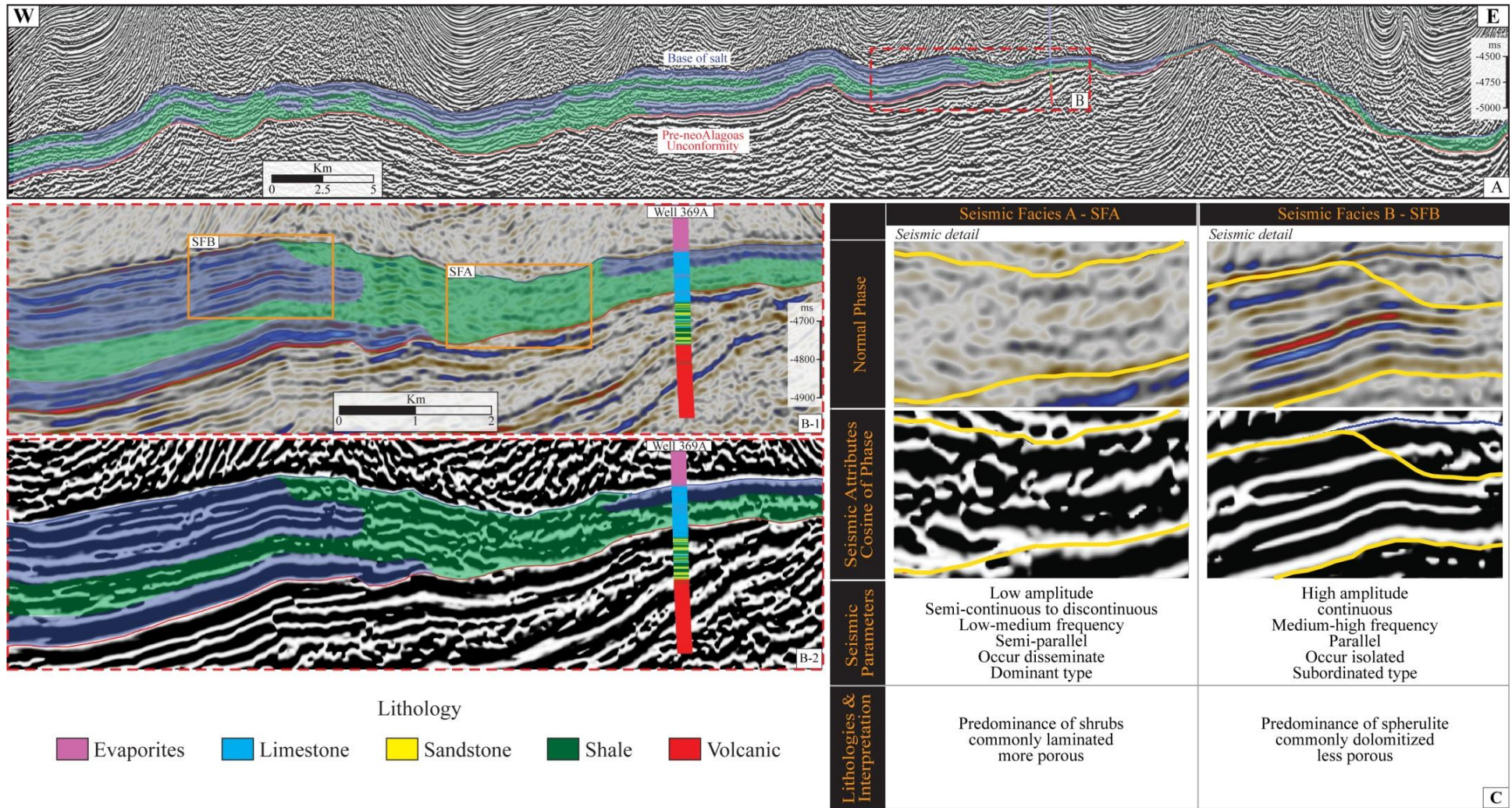


Figure 7: Seismic line 0575, illustrating a representative seismic section and the description of the main seismic facies observed in the sag interval of the Tupi Field.

#### 4.5. Chronostratigraphic Chart

A chronostratigraphic chart was built from individualized seismic units, according to the procedures of Vail *et al.* (1977) and originally proposed by Wheeler (1958). The observation of their geometries provides the paleogeomorphological context of deposition, the spatial distribution of units shows the architectural arrangement of the deposition system during basin filling, and the stacking of units through their relative age, allowing the development of temporal control. Thus, the chronostratigraphic diagram facilitates the visualization of the relationship between deposition, erosion, and temporal gaps. No geological time average or individual dating of the stratigraphic units was performed. No internal radiometric/isotope datable layers were identified, and biostratigraphic zonation was not the subject to this work. But further analysis may be incorporated increasing the relative time zones here discussed.

The deposition of the BVF began with the filling of lower areas, controlled by the topography inherited from the rift structures and from the pre-NeoAlagoas unconformity. SU1 deposited above the pre-NeoAlagoas unconformity and overlapping the Outer High (Figure 8C). SU2 lies above the previous unit, and its deposition is very similar to SU1, filling the lows and predominantly overlapping the Outer High. SU3 is the first to get through the structural high at NE. It occurs in all study intervals and has many erosional truncations on its top. The uppermost unit (SU4) is relict, owing to a post-depositional erosional process, which eroded most of it, leaving just a thin preserved remnant. This erosional process started after the deposition of SU4 and before the deposition of the Ariri Formation evaporites. The erosion affected almost all SU4 and great part of the upper SU3 (Figure 8C).

The general interplay between the recognized seismic facies indicates a complex relation of SFB with SFA. The SFB appears as isolated bodies in all seismic units, but rarely an isolated body occurs in two seismic units. They are situated predominantly on the base of SU1, at the center of SU2, as dispersed bodies in SU3, and through most of SU4, particularly at the highs (Figure 8C).



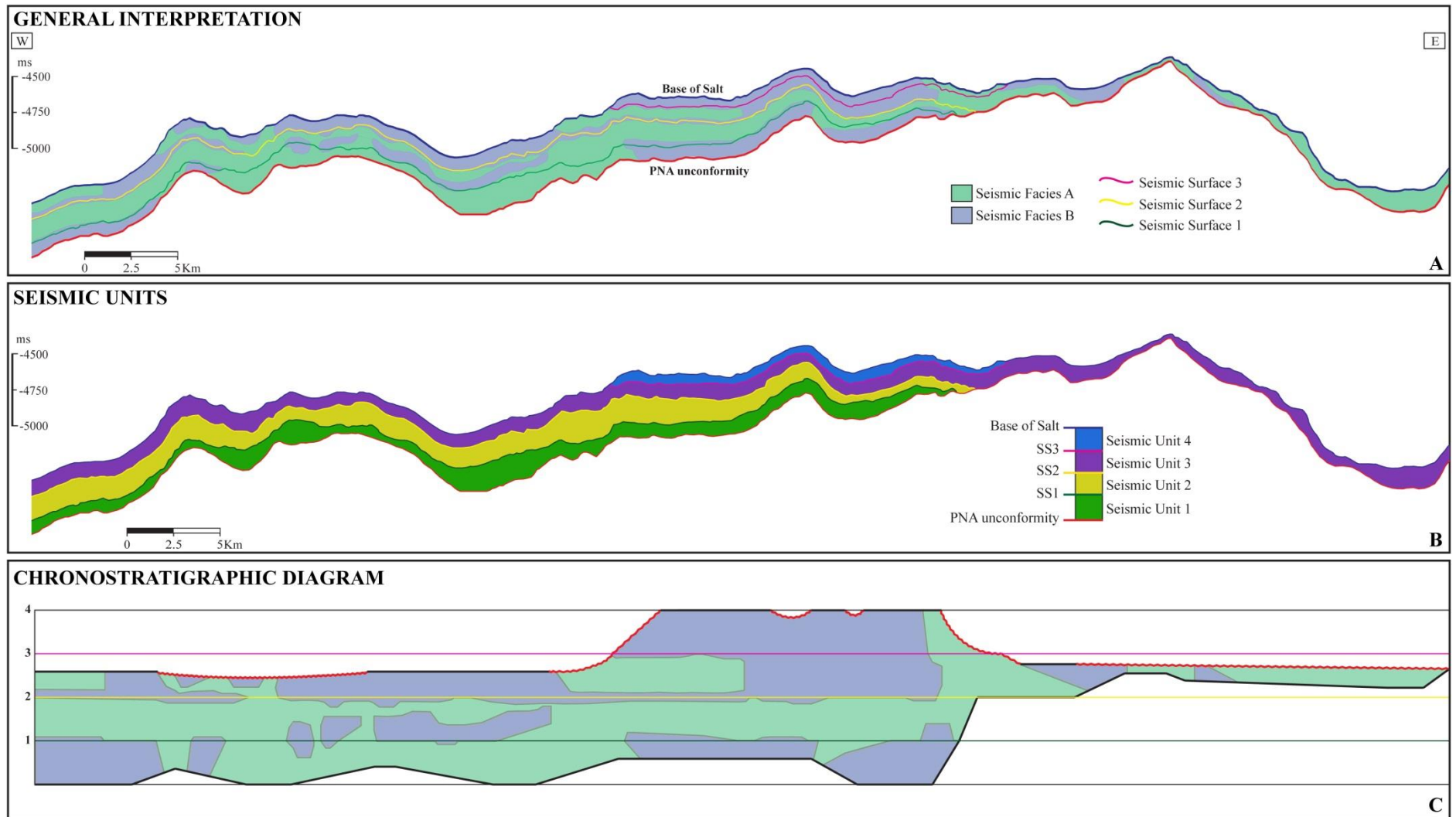


Figure 8: Chronostratigraphic chart of the Barra Velha Formation showing: (A) the general interpretation of the seismic line 0575 with the relationship between seismic units and seismic facies; (B) the seismic units layers; and (C) the chronostratigraphic diagram indicating the time relationship between depositional events of the seismic units and seismic facies.

## 5. Discussions

### 5.1. Lithologic characteristics of the Pre-salt deposits

A microbial origin was initially interpreted for the unusual deposits of the Pre-salt Aptian sag section (e.g., Carminatti *et al.*, 2008; Terra *et al.*, 2010; Muniz and Bosence, 2015; Sabato Ceraldi and Green, 2017; Carvalho and Fernandes, 2021). However, extensive and robust evidence support their origin as abiotic, chemical deposits, formed in an alkaline lacustrine environment (e.g., Wright and Barnett, 2015; 2017; 2020; Herlinger *et al.*, 2017; Lima and De Ros, 2019; Gomes *et al.*, 2020; Pietzsch *et al.*, 2020; Carramal *et al.*, 2022; Wright, 2022). These works showed that *in situ* deposits are constituted by a combination of laminations and peloids of magnesian clays (dominantly stevensite, kerolite and saponite) with calcite spherulites and feathery (fascicular) aggregates that replaced, displaced, and encrusted the Mg-clays, which were dissolved and/or replaced by silica, dolomite, and other minerals during further diagenesis.

The rocks constituted essentially by laminated magnesian clays, with subordinate amounts of terrigenous silt and clays, and by replacive microcrystalline calcite, dolomite and silica are termed *mudstones*. Rocks formed mostly by calcite spherulites with variable amounts of interstitial clays are termed spherulstones. Rocks whose main constituents are fascicular calcite shrubs are termed shrubstones.

Frequently intercalated with the *in-situ* deposits, there are resedimented deposits of intraclasts of reworked spherulites, fascicular shrubs, laminated clays, and their replacement products. Examples of the characteristic Pre-salt lithologies in the study area can be seen in Figure 9. The best reservoirs are mainly represented by fascicular crusts with growth-framework, inter-aggregate porosity, and by intraclastic calcarenites and calcirudites with interparticle porosity (e.g., Herlinger *et al.*, 2017; Wight and Barnett, 2017; 2020; Gomes *et al.*, 2020). Owing to the magnesian composition of the clays and the lack of potassium in their structure, as well as their heterogeneous, often intense replacement by calcite, dolomite, and silica, conventional petrophysical logs and composite logs based on the description of cuttings are useless to define the lithological types of the Pre-salt deposits.

The examination of photomicrographs from five selected cored wells along the study area revealed that the defined seismic facies are not corresponding to the simple

distribution-specific lithologies, but rather to different patterns of combination and the predominance of certain lithologic types in relation to others. The discontinuous, low-amplitude character of **Seismic Facies A** (Figure 10) corresponds to a predominance of the background, muddy deposits, represented by *mudstones*, *muddy spherulstones* and *spherulstones* (Figure 9), which dominate the BVF along much of the area, mostly in the basal and middle seismic units SU1 and SU2 (Figure 8C). The deposition and preservation of mud (chiefly formed by magnesian clays) in relatively deeper areas, and its partial replacement by calcite spherulites, microcrystalline dolomite, calcite, and silica, were favored in the relatively deeper areas of the lacustrine system (e.g., Wright and Barnett, 2017; 2020; Herlinger *et al.*, 2017; Lima and De Ros, 2019; Gomes *et al.*, 2020; Carramal *et al.*, 2022; Wright, 2022).

The continuous, high amplitude seismic pattern of **Seismic Facies B** (Figure 10) corresponds to a predominance of *shrubstones* among the *in-situ* deposits, and of intraclastic *calcarenites* and calcirudites reworked from the *in-situ* deposits (Figure 9). The predominant distribution of seismic facies B, along with the upper seismic units SU3 and SU4 and in the relatively higher parts of the study area (Figure 8C), is consistent with the processes interpreted for the genesis of the BVF fascicular and reworked deposits in most of the recent and evidence-supported publications (e.g., Wright and Barnett, 2015; 2017; 2020; Herlinger *et al.*, 2017; Lima and De Ros, 2019; Gomes *et al.*, 2020; Pietzsch *et al.*, 2020; Carramal *et al.*, 2022; Wright, 2022). According to these authors, the fascicular shrubs are a product of abiotic calcite precipitation in the relatively higher portions of a wide lacustrine system, owing to supersaturation promoted by evaporation and CO<sub>2</sub> degassing. The intraclastic deposits were generated by reworking of the *in situ* spherulitic and fascicular deposits by waves and/or currents, also preferentially in the shallower portions of the lacustrine system.

Therefore, the distribution of the defined BVF seismic facies is consistent with the interpreted genesis of their predominant lithologic types, and with the relative depth of the lacustrine system. This, even considering that the *in-situ* lithologies are not corresponding to purely depositional facies, but rather to the combination of depositional conditions (i.e., the preferential deposition and preservation of magnesian clays matrix in relatively deeper areas), with the eodiagenetic to syngenetic

---

precipitation of calcite fascicular shrubs or spherulites. Furthermore, the genetic processes of the lithologic types predominating in SFB would explain its continuous and high amplitude pattern in the seismic lines, as the shrubstones are apparently a product of laterally continuous precipitation of fascicular crusts with coalescing calcite aggregates and scarce clays, features also exhibited by the redeposited intraclastic calcarenites and calcirudites. Conversely, in the spherulstones of SFA, the calcite aggregates are typically less coalesced, frequently separated by the Mg-clay matrix.

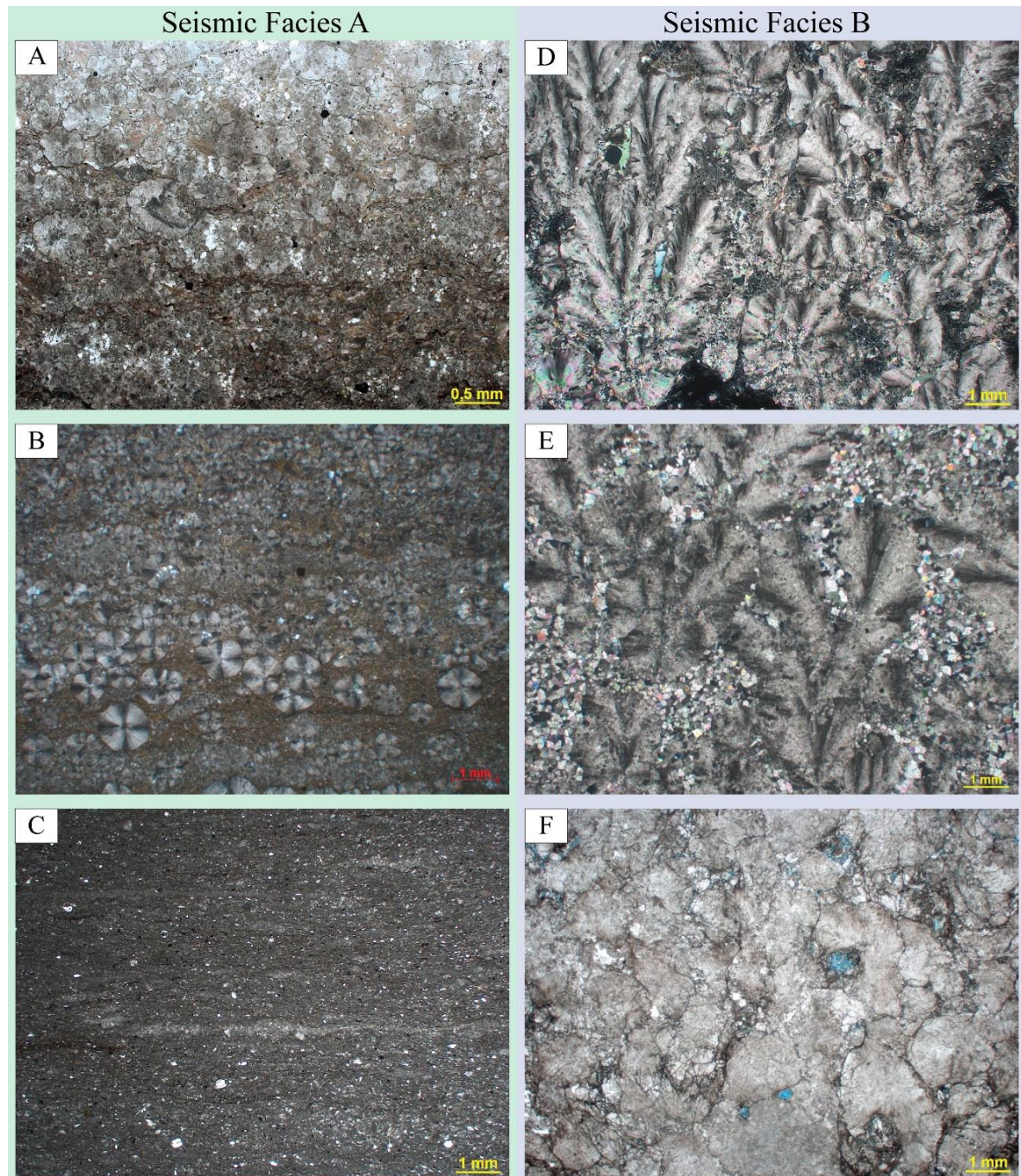


Figure 9: Photomicrographs of lithologic types of characteristics of the defined seismic facies: A, B and C of seismic facies A, and D, E and F of seismic facies B. A) Spherulstone of heterogeneously coalesced calcite spherulites and Mg clay matrix. Uncrossed polarizers (//P). B) Muddy spherulstone of non-coalesced calcite spherulites in Mg-clay matrix. Crossed polarizers (XP). C) Mudstone of Mg-clays and terrigenous mud partially replaced by microcrystalline calcite. (//P). D) Shrubstone of heterogeneously coalesced fascicular aggregates with inter-aggregate porosity partially filled by macrocrystalline calcite or clay matrix. (XP). E) Shrubstone of

---

fascicular aggregates and forms transitional to spherulites, with inter-aggregate spaces filled by blocky dolomite. (XP). F) Calcarenite of fascicular and spherulitic intraclasts strongly compacted and fractured. (//P).

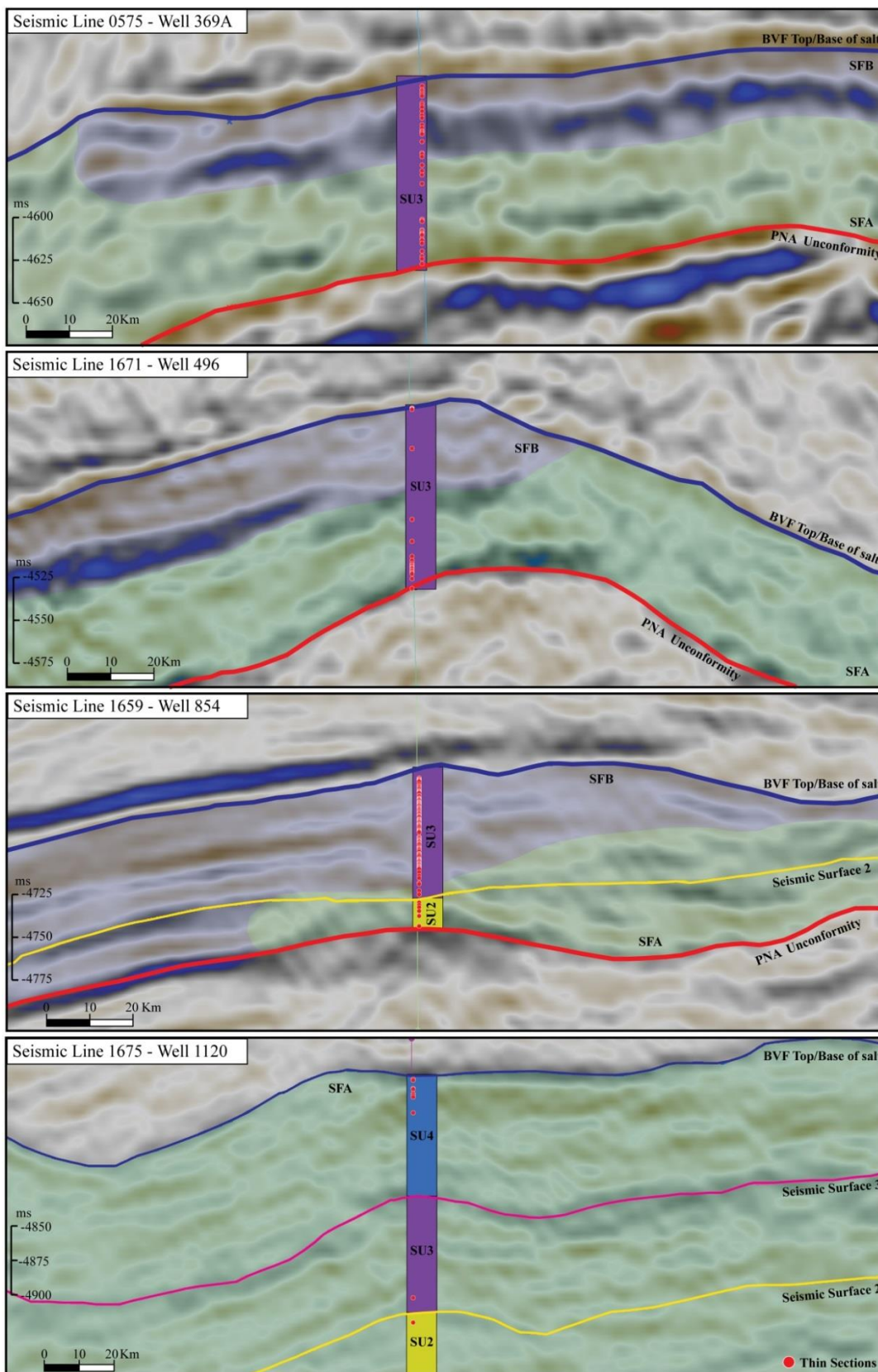


Figure 10: Seismic sections showing lateral and vertical variations of seismic facies, location of wells with their correspondent thin sections (red). Seismic surfaces (SS2 and SS3) separate the seismic units (SU2, SU3 and SU4).

## 5.2. Depositional model for the Barra Velha Formation in the Tupi Field

Various authors suggest different models for the deposition of the BVF during the Aptian sag phase. While some interpret that the BVF was deposited in a large shallow evaporitic lake environment (Pietzsch *et al.*, 2018; Wright and Rodriguez, 2018; Wright, 2022), others defend a of deep lacustrine system with microbial platform (Buckley *et al.*, 2015; Paula Faria *et al.*, 2017). The shallow evaporitic lake model explains that most seismic features can be explained by syn - and, mainly, post-depositional faults, including local inversion, erosion, and rotation of onlap terminations. The deep lake model mainly considers the relief at the base of the salt and some clinoforms as prograding structures associated with carbonate buildups.

The mainly post-depositional configuration of the Tupi Field area, along with the continuity and onlap patterns of seismic units onto a high remaining of post-rift erosion, support a shallow evaporitic lake model, rather than a deep lake with microbial platforms. In addition to that, there is no evidence or even stratigraphic potential for the BVF carbonate system to develop such buildup structures in the area of study. Barnett *et al.* (2018) proposed a model of subaerial erosion and alluvial/gravitational redeposition for the intraclastic BVF deposits. However, the configuration of BVF seismic facies (SFA and SFB) with a large distribution of resedimented rocks and lack of subaerial features does not support this model, neither for the Tupi Field nor for Búzios Field (Ferreira *et al.*, 2021), where are the best pre-salt reservoirs

## 6. Conclusions

The seismic stratigraphic and seismic facies study of the Barra Velha Formation (BVF) in the Tupi Field area of Santos Basin revealed that:

1. The BVF is formed by four seismic-stratigraphic units – SU1 to SU4 – corresponding to a generally continuous deposition during the Aptian sag



- phase. This is indicated by the absence of trackable internal unconformities or erosional truncations within the interval.
2. The absent or limited syn-depositional faulting and the remarkable regional continuity of the seismic units indicate a very limited tectonic activity during the deposition of the BVF in the area.
  3. Based on these conditions, the Outer High seems to be already formed before BVF deposition (syn-rift and/or during the formation of the pre-NeoAlagoas unconformity). Although minor uplift or accommodation creation may have occurred during the sag interval, there was no major tectonic activity, neither divergent reflection patterns. The deposition of the BVF seismic units occurred in a clear onlapping pattern over the Outer High.
  4. A widespread unconformity marks, however, the top of BVF, with several successive erosional truncations. This erosion affects mainly the top of SU4, but also SU3 and SU2. The deposition of the Ariri Formation evaporites started over this unconformity.
  5. This unconformity may indicate a local uplift – close to the Outer High – or/and a general base level fall that precedes the large marine transgression which generated the thick evaporitic unit (Dias, 1998).
  6. The lithological composition of the BVF is essentially constituted by magnesian clays, calcite spherulites and fascicular shubs, but presents very complex facies variations, resulting in undistinguishable patterns in the conventional logs.
  7. However, a clear differentiation can be made based on seismic texture analysis and seismic attributes, defining two seismic facies – SFA and SFB - with distinctive recognition parameters and very complex geometry.
  8. In general, SFB occurs as isolated sheet-like zones within SFA, preferentially along the relative highs and in SU4.
  9. Lithologic types recognized in five wells along the Tupi Field indicate that the defined seismic facies correspond to patterns of combination and distribution of dominant rock types.

10. Seismic facies A corresponds mostly to calcite spherulites and Mg-clays mud deposits, which constitute the background of lacustrine sedimentation, predominant and preferentially preserved in relatively lower areas of the system.
11. Seismic facies B corresponds mostly to crusts of calcite fascicular shrubs, formed as syngenetic to eodiagenetic precipitates, and to resedimented deposits, made of spherulitic and fascicular intraclasts.
12. The complex distribution, both laterally and temporally, between the seismic facies suggests a complex origin, not simply related to depositional processes, but to the combination of depositional and diagenetic processes, essentially as product of chemical, abiotic generation in an alkaline lacustrine environment.
13. The mainly post-depositional configuration of the Tupi Field area, along with the continuity and onlap patterns of seismic units onto a high remaining of post-rift erosion, support a shallow evaporitic lake model, rather than a deep lake with microbial platforms.

### **Acknowledgement**

This work is part of the master's research of the first author. We thank the support of the Postgraduate Program in Geosciences of Rio Grande do Sul Federal University, Brazil National Petroleum Agency (ANP) for access to data, according to the policy of academic data sharing to universities, and to CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel) of the Ministry of Education for the scholarship granted to the first author.

### **References**

- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás-Natural e Biocombustíveis, 2018. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro, ANP.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás-Natural e Biocombustíveis, 2021. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro, ANP.

Assine, M.L., Correa, F.S., Chang, H.K., 2008. Migração de depocentros na Bacia de Santos: importância na exploração de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 38 (2 – suplemento).

Barnett, A.J., Obermaier, M., Amthor, J., Juk, K., Camara, R., Sharafodin, M., Bolton, M., 2018. Origin and Significance of Thick Carbonate Grainstone Packages in Non-Marine Successions: A Case Study from the Barra Velha Formation, Santos Basin. *Search and Discovery Article #11116*. Adapted from poster presentation given at 2018 AAPG Annual Convention and Exhibition, Salt Lake City, Utah, May 20-23.

Brown Jr., L.F., Fisher, W.L., 1977. Seismic-Stratigraphic Interpretation of Depositional Systems: Examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins, *Seismic Stratigraphy — Applications to Hydrocarbon Exploration*, Charles E. Payton. Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, p. 213–248.  
<https://doi.org/10.1306/M26490C14>

Brumbaugh, B., Cameron, N., Henry, S.G., 1994. A new pre-salt source rock for central West African deep water? Abstract, AAPG Annual Meeting, 12–15 June 1994, Denver, Colorado.

Brune, S., Heine, C., Pérez-Gussinyé, M., Sobolev, S.V., 2014. Rift migration explains continental margin asymmetry and crustal hyper-extension. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/ncomms5014>

Buckley, J. P., Bosence, D., Elders, C., 2015. Tectonic setting and stratigraphic architecture of an Early Cretaceous lacustrine carbonate platform, Sugar Loaf High, Santos Basin, Brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, 418(1), 175-191. <http://dx.doi.org/10.1144/SP418.13>

Carminatti, M., Wolff B., Gamboa, L., 2008. New exploratory frontiers in Brazil, 19th World Petroleum Congress, Madrid, Spain, WPC Proceedings.

Carramal, N.G., Oliveira, D.M., Cacela, A.S.M., Cuglieri, M.A.A., Rocha, N.P., Viana, S.M., Toledo, S.L.V., Pedrinha, S., De Ros, L.F., 2022. Paleoenvironmental insights from the deposition and diagenesis of Aptian Pre-Salt magnesium

silicates from the Lula Field, Santos Basin, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 92, p. 12–31. <https://doi.org/10.2110/jsr.2020.139>

- Carvalho, M.D., Fernandes, F.L., 2021. Pre-salt depositional system: Sedimentology, diagenesis, and reservoir quality of the Barra Velha Formation, as a result of the Santos Basin tectono-stratigraphic development, in Marcio R. Mello, Pinar O. Yilmaz, and Barry J. Katz, eds., *The supergiant Lower Cretaceous pre-salt petroleum systems of the Santos Basin, Brazil: AAPG Memoir 124*, p. 121–154.
- Chang, H.K., Assine, M.L., Corrêa, F.S., Tinen, J.S., Vidal, A.C., Koike, L., 2008. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Rev. Bras. Geociências*, 38(2-Suplemento): 29-46.
- Chang, H.K., Kowsmann, R.O., Figueiredo, A.M.F., 1990. Novos conceitos sobre o desenvolvimento das bacias marginais do leste brasileiro. In: Raja Gabaglia G.P. and Milani E.J. (eds) *Origem e Evolução de bacias sedimentares*. Petrobrás, p.269-289.
- 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*, 213:97-138.
- Demercian, L.S., 1996. A halocinese na evolução do sul da Bacia de Santos do Aptiano ao Cretaceo superior. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 201p.
- Dias, J.L., 1998. *Análise sedimentológica e estratigráfica do Andar Aptiano em parte da Margem Leste do Brasil e no Platô das Malvinas: considerações sobre as primeiras incursões e ingressões marinhas do Oceano Atlântico Sul Meridional*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 208 p. Tese (Doutorado).
- Fainstein, R., Jamieson, G.A., Biles, N., Hannan, A., Shelander, D., Krueger, A.C.V.A., 2003. *Time-Depth Converted Interpretation of Regional Seismic Maps, Offshore Southeast Brazil*, Society of Exploration Geophysicists Annual International Meeting, Dallas.

- Ferreira, D.J.A., Dutra, H.P.L., Castro, T.M., Lupinacci, W.M.. 2021. Geological process modeling and geostatistics for facies reconstruction of presalt carbonates. *Marine and Petroleum Geology*, v. 124, 14 pp. 104828
- Gomes, J.P., Bunevich, R.B., Tedeschi, L.R., Tucker, M.E., Whitaker, F.F., 2020. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt. *Marine and Petroleum Geology*, 113, 104-176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104176>
- Gomes, P.O., Parry, J., Martins, W., 2002. The Outer High of the Santos Basin, Southern São Paulo Plateau, Brazil: Tectonic Setting, Relation to Volcanic Events and Some Comments on Hydrocarbon Potential, AAPG, Hedberg Conference “Hydrocarbon Habitat of Volcanic Rifted Passive Margins”, Search and Discovery Article #90022.
- Henry, S.G., Brumbaugh, W., Cameron, N.R., 1995. Pre-salt source rock development on Brazil’s conjugate margin: West African examples (abs.) First Latin American Geophysical Conference, 20–24 August 1995, Rio de Janeiro, Brazil.
- Herlinger Jr., R., Zambonato, E.E., De Ros, L.F., 2017. Influence of diagenesis on the quality of Lower Cretaceous Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 87, p. 1285-1313. <https://dx.doi.org/10.2110/jsr.2017.70>
- Karner G.D., 2000. Rifts of the Campos and Santos Basins, Southeastern Brazil: Distribution and Timing, in M.R. Mello and B.J. Katz (eds.), *Petroleum systems of South Atlantic margins*, AAPG Mem. 73, p. 301-315.
- Karner, G.D., Driscoll, N.W., 1999. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian Margins: insights from quantitative basin modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, 153(1), 11–40. [doi:10.1144/gsl.sp.1999.153.01.02](https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.153.01.02)
- Karner, G.D., Gamboa, L.A.P., 2007. Timing and origin of the South Atlantic pre-salt sag basins and their capping evaporites, *Geological Society, London, Special Pub. V.285*, p. 15-35.

- Lentini, M.R., Fraser, S.I., Sumner, H.S., Davies, R.J., 2010. Geodynamics of the central South Atlantic conjugate margins: implications for hydrocarbon potential. *Petroleum Geoscience*, Vol. 16, pp.217-229. [DOI: 10.1144/1354-079309-909](https://doi.org/10.1144/1354-079309-909).
- Lima, B.E.M., De Ros, L.F., 2019. Deposition, diagenetic and hydrothermal processes in the Aptian Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, offshore Brazil, *Sedimentary Geology*, v. 383, p. 55-81.
- Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R., Sangree, J.B., 1977 (b). Seismic Stratigraphy and global Changes of Sea Level. Part 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap. In: Payton, C. E. (Eds.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon*. AAPG Memoir 26: 63-81.
- Moreira, J.L.P., Madeira, C.V., Gil, J.A., Machado, A.P.M., 2007. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*. Rio de Janeiro 15 (2), 531 e 549.
- Muniz, M. C., and Bosence, D. W. J. (2015). 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(1), 221–242. [doi:10.1144/sp418.10](https://doi.org/10.1144/sp418.10)
- Nichols, G., 2009. *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley and Sons.
- Paula Faria, D.L., Reis, A.T., Souza, O.G., 2017. Three-dimensional stratigraphic sedimentological forward modeling of an Aptian carbonate reservoir deposited during the sag stage in the Santos basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 88, pp. 676-695. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.013>
- Pereira, M.J., Macedo, J.M., 1990. A Bacia de Santos: perspectivas de uma nova província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. *Boletim Geociências da Petrobrás*, 4:3-11.
- Pietzsch, R., Oliveira, D.M., Tedeschi, L.R., Queiroz Neto, J.V., Figueiredo, M.F., Vazquez, J.C., Souza, R.S., 2018. Palaeohydrology of the Lower Cretaceous pre-salt lacustrine system, from rift to post-rift phase, Santos Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 507, p. 60–80.

- Pietzsch, R., Tedeschi, L.R., Oliveira, D.M., Anjos, C.W.D., Vazquez, J.C., Figueiredo, M.F., 2020. Environmental conditions of deposition of the Lower Cretaceous lacustrine carbonates of the Barra Velha Formation, Santos Basin (Brazil), based on stable carbon and oxygen isotopes: A continental record of pCO<sub>2</sub> during the onset of the Oceanic Anoxic Event 1a (OAE 1a) interval?. *Chemical Geology*, v. 535, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119457>
- Quirk, D.G., Hertle, M., Jeppesen, J.W., Raven, M., Mohriak, W.U., Kann, A.D.J., Norgaard, M., Howe, M.J., Hsu, D., Coffey, B., Mendes, M.P., 2013. Rifting, subsidence and continental break-up above a mantle plume in the central South Atlantic. *Geological Society of London, Special Publications*, v. 369, p. 185-214.
- Rangel, H.D., Carminatti, M., 2000. Rift Lake stratigraphy of the Lagoa Feia Formation, Campos Basin, Brazil, in E. H. Gierlowski-Kordesch and K. R. Kelts, eds., *Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology* 46, p. 225-244.
- Sabato Ceraldi, T., Green, D., 2017. Evolution of the South Atlantic lacustrine deposits in response to Early Cretaceous rifting, subsidence and lake hydrology. In: *Petroleum Geoscience of the West Africa Margin* (Eds. T. Sabato Ceraldi, R.A. Hodgkinson and G. Backe), *Geological Society of London Special Publication* 438, p. 77-98.
- Saller, A., Rushton, S., Buambua, L., Inman, K., McNeil, R., Dickson, J.A.D., 2016. Presalt stratigraphy and depositional systems in the Kwanza Basin, offshore Angola. *AAPG Bulletin*, 100, 1135–1164.
- Terra, G.J.S., Spadini, A.R., França, A.B., Sombra, C.L., Zambonato, E.E., Juschaks, L.C.S., Arienti, L.M., Erthal, M.M., Blauth, M., Franco, M.P., Matsuda, N.S., Silva, N.G.C., Moretti, P.A.Jr., D'Ávila, R.S.F., Souza, R.S., Tonietto, S.N., Anjos, S.M.C., Campinho, V.S., Winter, W.R., 2010. Carbonate rock classification applied to Brazilian sedimentary basins. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 18(1), p. 9–29.
- Unterneh, P., Peron-Pinvidic, G., Manatschal, G., Sutra, E., 2010. Hyperextended crust in the South Atlantic: in search for a model. *Petroleum Geoscience*, 16, doi 10.1144/1354-079309-904.

- Vail, P.R., Mitchum Jr., R.M., 1977. Seismic Stratigraphy and global Changes of Sea Level Part 1: Overview. In: Payton, C. E. (Eds.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26: 51-52.
- Vail, P.R., Tood, R.G., Sangree, J.B., 1977. Seismic Stratigraphy and global Changes of Sea Level. Part 5: Cronostratigraphy Significance of Seismic Reflection. In: Payton, C. E. (Eds.), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon. AAPG Memoir 26: 99-116.
- Vieira, R.A.B., 1998. Análise estratigráfica e evolução paleogeográfica da seção Neoaptiana na Porção Sul da Plataforma de São Mateus, Bacia do Espírito Santo, Brasil. 1998. 158 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Wheeler, H.E., 1958. Time-Stratigraphy. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. Vol. 42, n.5. pg. 1047-1063.
- Winter, W.R., Jahnert, R.J., França, A.B., 2007. Bacia de Campos. Boletim de Geociências da Petrobras 15, 511–529 (in Portuguese).
- Wright V.P., Rodriguez, K., 2018. Reinterpreting the South Atlantic Pre-Salt ‘microbialite’ reservoirs: petrographic, isotopic and seismic evidence for a shallow evaporitic lake depositional model. First Break, v. 36, p. 71-77.
- Wright, V.P., 2022. The mantle, CO<sub>2</sub> and the giant Aptian chemogenic lacustrine carbonate factory of the South Atlantic: Some carbonates are made, not born. Sedimentology, v. 69, p. 47-73. <https://doi.org/10.1111/sed.12835>
- Wright, V.P., Barnett, A.J., 2015. An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic Early Cretaceous lacustrine carbonates..Geological Society of London, Special Publications no.418, p. 209-219.
- Wright, V.P., Barnett, A.J., 2017. Critically Evaluating the Current Depositional Models for the Pre-Salt Barra Velha Formation, Offshore Brazil. Search and Discovery Article #51439, adapted from Keynote Address given at AAPG/SEG International Conference and Exhibition, London, England, October 15-18.



Wright, V.P., Barnett, A.J., 2019. The textural evolution and ghost matrices of the Cretaceous Barra Velha Formation carbonates from the Santos Basin, offshore Brazil. *Facies*, v. 66(7), 18 pp. <https://doi.org/10.1007/s10347-019-0591-2>

**ANEXO I**

Título da Dissertação/Tese:

**“CARACTERIZAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E SISMOFÁCIES DA FORMAÇÃO BARRA VELHA (PRÉ-SAL APTIANO), CAMPO DE TUPI, BACIA DE SANTOS - BRASIL”**

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: **Vitor Pinheiro Sommer**

Orientador: Prof. Dr. Juliano Kuchle

Examinador: Prof. Dr. Fernando Farias Vesely

Data: 16/06/2022

Conceito: B

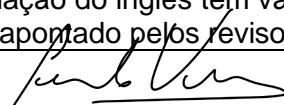
**PARECER:**

O documento apresentado tem resultados interessantes e é metodologicamente bem estruturado. As interpretações formuladas estão, em grande parte, bem embasadas nas observações feitas a partir dos dados de subsuperfície. Considero que o trabalho é compatível com uma pesquisa de mestrado de bom nível. Além disso, é uma contribuição importante para o detalhamento estratigráfico do pré-sal da Bacia de Santos. Dessa forma meu parecer é pela aprovação da dissertação.

Há, contudo, algumas inconsistências e/ou fragilidades que necessitam ser ajustadas/reavaliadas para que o artigo submetido seja aceito e publicado.

1. Importante formular uma questão norteadora na introdução do artigo.
2. As figuras que exibem seções sísmicas precisam ser aprimoradas com a indicação dos principais elementos (seção rifte, sag, sal, alto externo etc.) e melhor distinção das diferentes terminações, possivelmente utilizando cores distintas. Algumas marcações são duvidosas, principalmente a distinção entre toplap e truncamento.
3. Referências geográficas/geomorfológicas também poderiam ser incorporadas aos mapas (p.ex., alto externo).
4. O reconhecimento de toplap implica na presença de clinofomas progradacionais com amplitude suficiente (várias dezenas de metros) para ser detectada pela sísmica. Isso me parece conflitante com a interpretação de lago raso evaporítico. Sugiro reavaliar de que não se trata de truncamento.
5. A presença de truncamentos entre as unidades indica discordâncias internas. Seriam as unidades sequências deposicionais? As discordâncias seriam evidência de tectonismo sin-sedimentar? Essas discordâncias, ainda que de pequena amplitude, deveriam aparecer no diagrama cronoestratigráfico.
6. A redação do inglês tem vários problemas e precisa de uma revisão considerável. Isso certamente será apontado pelos revisores do artigo.

Assinatura:



Data: 16/06/2022

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

# **CARACTERIZAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E SISMOFÁCIES DA FORMAÇÃO BARRA VELHA (PRÉ-SAL APTIANO), CAMPO DE TUPI, BACIA DE SANTOS – BRASIL**

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: Vitor Pinheiro Sommer

Orientador: Juliano Kuchle

Examinador: Claiton M.S.Scherer

Data: 20/07/2022

## **Conceito: A**

Parecer:

A presente dissertação consiste em um trabalho de excelente qualidade, onde o autor estabelece um arcabouço sismoestratigáfico para o intervalo Aptiano da Formação Barra Velha (BVF) no Campo de Tupi (Bacia de Santos), assim como define as sismo fácies a partir de texturas sísmicas e caracterização petrográfica, permitindo estabelecer os controles deposicionais sobre as rochas reservatórios do intervalo. Os objetivos da dissertação estão claros e bem definidos, sendo esses plenamente atingidos pelo autor. A descrição metodológica está bastante completa, abrangendo de forma equânime as diferentes ferramentas utilizadas. O capítulo referente ao estado da arte apesar de sucinto, aborda de forma competente os aspectos referentes a estratigrafia de bacias rifte e sag e a análise sismoestratigáfica, servindo como base conceitual para a discussão do artigo submetido associado a dissertação. As figuras são, em geral, de boa qualidade e são complementares ao texto. As legendas são claras, facilitando o entendimento das figuras. O texto está muito bem escrito, apresentando um caráter minimalista, onde a descrição é objetiva e extremamente eficiente, e as interpretações são circunscritas aos dados descritos.

A definição das unidades sísmicas está bem fundamentada, com uma caracterização precisa das terminações de refletores, embora as figuras não apresentam uma resolução suficiente para as observações das feições em detalhe. O único ponto a ressaltar consiste na afirmação de que ocorre um contínuo deposicional entre as unidades sísmicas, não existindo hiato temporal entre elas. Os dados não permitem uma interpretação conclusiva sobre isso (ausência de datações bioestratigráficas), mas as

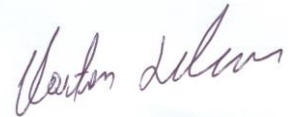
terminações de topo em truncamento erosiva de algumas unidades sísmicas, sugerem a existência de hiato temporal, falseando a hipótese defendida pelos autores. As fácies sísmicas estão bem definidas e amarradas com fotomicrografias, permitindo identificar os principais litotipos que caracterizam cada uma delas.

Um ponto que merecia uma discussão mais detalhada refere-se a discordância regional que separa os depósitos carbonáticos da BVF dos evaporitos da Fm. Ariri. Qual a gênese dessa discordância? Está associada a exposição subárea? Está associada a movimentação posterior do sal e, portanto, não reflete uma condição estratigráfica primária?

Além dos aspectos ressaltados acima, existem uma série de apontamentos feitos diretamente no pdf. Essas observações não comprometem em nenhum momento a qualidade da dissertação, tendo somente o intuito de corrigir pequenos erros conceituais.

Em suma, considero que a dissertação atende plenamente os quesitos esperados em uma dissertação, estando o mestrando e o seu orientador de parabéns.

Saudações,



**Prof. Claiton M. S. Scherer**

Instituto de Geociências  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
CEP 91501-970 Porto Alegre, RS

Tel.: (+55) 51 33086920  
Fax: (+55) 51 33087047  
E-mail: claiton.scherer@ufrgs.br

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação/Tese:
<b>“CARACTERIZAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA E SISMOFÁCIES DA FORMAÇÃO BARRA VELHA (PRÉ-SAL APTIANO), CAMPO DE TUPI, BACIA DE SANTOS - BRASIL”</b>
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: <b>Vitor Pinheiro Sommer</b>
Orientador: Prof. Dr. Juliano Kuchle
Examinadora: Dra. Francyne Bochi do Amarante
Data: 29/06/2022
Conceito: A (excelente)
<b>PARECER:</b>
<p>Parabéns ao aluno Vitor P. Sommer e seu orientador Juliano Kuchle por um trabalho excelente. O objetivo principal da dissertação é estabelecer um arcabouço sismoestratigáfico para o intervalo Aptiano da Formação Barra Velha (Bacia de Santos) na área do Campo de Tupi; tanto o intervalo estratigráfico como a localização escolhida são muito pertinentes visto o alto interesse econômico. O aluno atende muito bem este e os demais objetivos da dissertação, detalhando a Fm. Barra Velha desde a macro até a microescala. As figuras estão muito bem feitas, e resumem de forma satisfatória os resultados obtidos, e o texto está bem escrito.</p> <p>Aqui vão as principais observações (ver também as correções menores feitas ao longo da dissertação – por favor, ver o pdf em anexo):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Uniformizar a abreviação das unidades sísmicas (ora é US, ora SU);</li> <li>2) Na metodologia (da dissertação e do artigo), deve-se incluir a polaridade do dado sísmico (normal ou reversa);</li> <li>3) Quando em tempo, a unidade (milissegundos, ms) deve necessariamente ser seguida de OWT (one-way travel time) ou TWT (two-way travel time).</li> <li>4) Parecem haver divergências quanto à origem da discordância no contato sal – pré-sal. No item 5 da dissertação, consta que é a mudança no regime eustático; no item 4.3 do artigo, consta que é um soerguimento; e nas conclusões afirma-se que pode ser um ou outro. Sugiro rever trabalhos que já documentaram esta discordância (ex. Karner e Gambôa, 2007). Esses trabalhos e suas principais conclusões devem ser citados nas discussões do artigo.</li> <li>5) O primeiro parágrafo da introdução do artigo deve ser o mais regional possível (visto que você submeteu p/ South American, sugiro que o primeiro parágrafo seja sobre bacias do Atlântico Sul, ou bacias marginais brasileiras... Do jeito que está é muito local, podendo ser submetido à Brazilian Journal of Geology).</li> <li>6) Na introdução do artigo deve ficar clara a motivação por trás do trabalho. Em outras palavras, deve-se constar a justificativa que explique porque o trabalho é pertinente, e porque as pessoas devem ler. Você partiu direto para os objetivos.</li> </ol>

7) Os mapas de topo e base do sal (Figura 4 do artigo) tem claramente o efeito pull-up resultante do sal acima. Você deve ou corrigir esse efeito, ou mencioná-lo, explicando que cria falsos altos e baixos na superfície.

8) Visto que você descreveu as fotos de lâminas no seu trabalho, essa descrição deve estar nos resultados do artigo. Nas discussões pode-se trazer de volta esses resultados (de forma bem resumida) e apresentar sua interpretação, comparando com trabalhos prévios, e fazer a integração com suas sismofácies.

Assinatura: Francyne Bochi do Amanante

Data: 29/06/2022

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: