Sismofácies e tectono-estratigrafia do pré-sal no Sul do Campo de Búzios, Bacia de Santos

Lívio Reily de Oliveira Gonçalves[1,2,4]; Marcus Melanes[1,3]; Gabriel Zidane de Oliveira Batista[1,3]; Byanca Cardoso[1,3]; Jorge Nadir[1,2,3]; Ricardo Jahnert[1]; Wagner Moreira Lupinacci[1,2,3]; Francisco Romério Abrantes Júnior[1,2,3]

[1]Grupo de Interpretação Exploratória e Caracterização de Reservatórios, Universidade Federal Fluminense (GIECAR–UFF)
[2]Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT–UFF)
[3]Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo (INCT–GP/CNPQ)
[4]Energy Platform

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

O Campo de Búzios tem o maior volume de óleo *in place* dentre todos os campos do Brasil, sendo o segundo maior produtor. Embora existam diversas publicações a respeito dos reservatórios desse campo, ainda carece de um estudo detalhado da evolução tectonoestratigráfica de todo o intervalo pré-sal, composto pelas formações Camboriú, Piçarras, Itapema e Barra Velha. O presente trabalho propõe detalhar a evolução geológica e a arquitetura deposicional do intervalo pré-sal do Sul do Campo de Búzios, utilizando como base análises das sismofácies e sismoestratigrafia. No total, identificaram-se oito sismofácies: *Tabular Sheet* (SF1); *Sheet Drape* (SF2); *Tilted/Inclined Sheet* (SF3); *Divergent Wedge* (SF4); *Sigmoidal Slope* (SF5); *Prograding Slope* (SF6); *Trhough Fill* (SF7) e *Carbonate Mounds* (SF8). Adicionalmente, reconheceram-se quatro sequências deposicionais para Formação Piçarras, seis para a Formação Itapema e três para a Formação Barra Velha.

Introdução

Os primeiros registros de hominídeos são datados de 10 a 20 milhões de anos, correspondentes ao Mioceno, sendo a força muscular a sua principal fonte de energia (; Tessmer, 2002). Após milhões de anos, durante o Pleistoceno, cerca de 400 mil anos, ocorreu a primeira descoberta de uma fonte de energia alternativa, o fogo (MacDonald et al., 2021). Desde então, várias transformações energéticas ocorreram, cada vez mais aumentando tanto a qualidade de vida quanto o seu consumo energético (Ribeiro, 1975; Tessmer, 2002). O consumo de energia primária, segundo dados da *International Energy Agency* (EIA). em 2022, 422 exajoules (1018 joules). Desse total, mais de 80% são referentes aos combustíveis fósseis, sendo o petróleo como a principal fonte, com 29,5%, seguido do carvão com 27,2%, e depois gás natural com 23,6%. De acordo com a IEA, consumo global de óleo também segue a tendência de crescimento, sendo que em 2023 atingiu a marca de 103 milhões de barris por dia (bbl/d).

Isso demonstra a importância da exploração de óleo e gás, com o objetivo de descobrir novas reservas de petróleo, e também de aumentar a produtividade e o fator de recuperação das acumulações já comerciais mapeadas (Ayoo, 2020; Khan et al., 2020). Em relação ao contexto brasileiro, consumiu-se, em média no ano de 2022, 2,5 milhões de bbl/d, sendo que a produção média, no mesmo perído, foi de 3,2 milhões de bbl/d (ANP, 2024). Por causa do superávit da produção, a balança comercial do petróleo atingiu valor recorde de US$ 25 bilhões. Além disso, nesse mesmo ano, o Estado do Brasil arrecadou mais de US$ 20 bilhões com os *royalties* da produção de petróleo (ANP, 2022).

Vale ressaltar que a produção do pré-sal representa aproximadamente 75% da produção nacional e, portanto, as reservas do pré-sal, bem como as oportunidades exploratórias, são cruciais para garantir a segurança energética não só do Brasil, como do mundo (Souza, 2019).

O Campo de Búzios tem o maior volume de óleo *in place* dentre todos os campos do Brasil, sendo o segundo maior produtor, e provavelmente, em breve, será o campo com a maior produção de óleo (Petrobras, 2024). O presente trabalho propõe detalhar a evolução geológica e a arquitetura deposicional do intervalo pré-sal do Sul do Campo de Búzios, utilizando como base análises das sismofácies e sismoestratigrafia (Fig. 1).

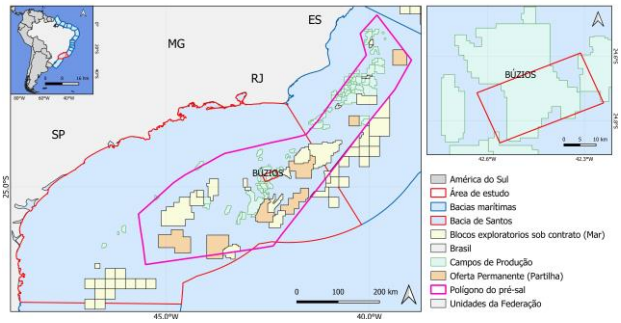


Figura 1. Mapa de localização simplificado da área de estudo.

Metodologia/ Problema Investigado

Utilizou-se um dado sísmico pós-stack e em profundidade. Para auxiliar a interpretação dos dados sísmicos 3D geraram-se três atributos: *Sweetness*, Impedância relativa e TecVa (Fig. 2). As análises das

sismofácies se basearam nas metodologias propostas por Mitchum Jr. & Vail (1997) e Xu & Haq (2022). A metodologia supracitada baseia-se em descrever os padrões internos dos refletores e a sua geometria, dessa forma, determinando as características que distinguem as sismofácies. Para as análises de tectono-estratigráficas baseou-se nos trabalhos de Catuneanu *et al*. (2009) e Holz *et al*. (2017).

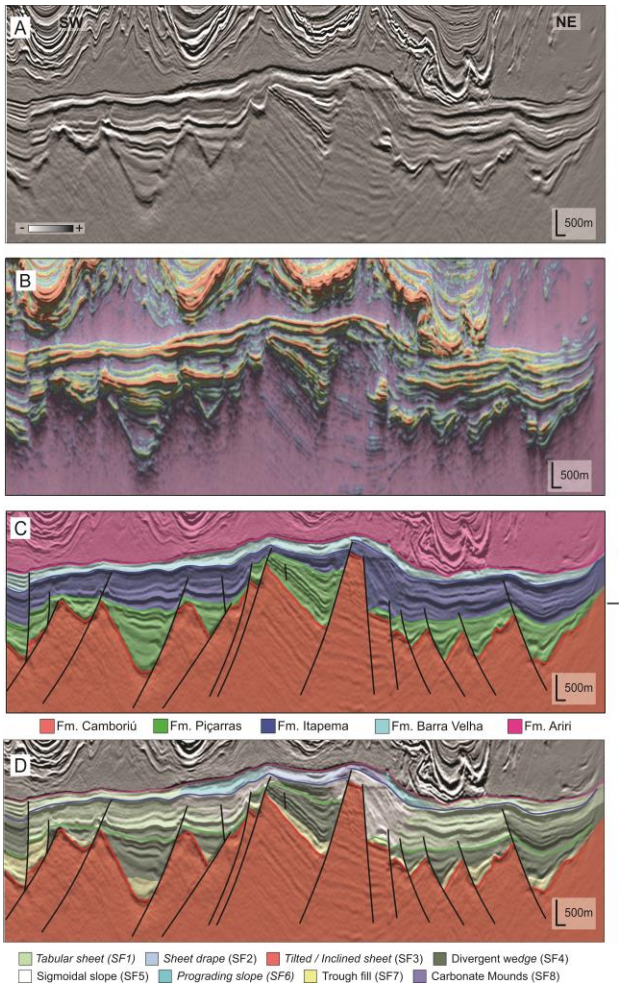


Figura 2) A) Seção sísmica deep direction (amplitude em profundidade). B) Seção sísmica deep direction (TecVa e impedância relativa em profundidade). C) Seção sísmica deep direction com as unidades litoestratigráficas interpretadas. D) Seção sísmica deep direction (amplitude em profundidade) com as discordâncias regionais e sismofácies interpretadas.

Resultados

Foram individualizadas e descritas as características de oito sismofácies para o Sul do Campo de Búzios:

A SF1 é caracterizada por refletores plano-paralelos, predominantemente contínuos, com alta frequência e moderada amplitude. O atributo *sweetness* indica baixos valores (cores roxa, azul e azul esverdeado). O atributo TecVa apresenta valores moderados (cinza claro a cinza escuro), destacando a geometria tabular e o paralelismo dos horizontes. A impedância relativa mostra valores moderados (vermelho alaranjado a verde azulado), podendo ser fortemente positiva (preto) em contato com evaporitos. Esta fácies ocorre nas formações Piçarras, Itapema e Barra Velha, associada a ambientes de baixa energia com deposição de silte e argila. As litologias incluem folhelhos, mudstones e wakstones, presentes nas regiões mais profundas do lago.

A SF2 possui refletores paralelos a sub-paralelos, contínuos a descontínuos, com alta frequência e moderada amplitude. O atributo *sweetness* mostra baixos valores (roxo a azul esverdeado). O atributo TecVa destaca a curvatura central da geometria SF2, com valores moderados. A impedância relativa também apresenta valores medianos (vermelho alaranjado a verde azulado). Esta fácies ocorre nas formações Itapema e Barra Velha, com deposição de grãos carbonáticos nas margens e micrita na porção central. As litologias incluem mudstones, wackstones e packstones.

Os refletores da SF3 são paralelos a sub-paralelos, descontínuos a contínuos, com alta frequência e amplitudes muito baixas. O atributo *sweetness* mostra valores muito baixos (roxo). O atributo TecVa apresenta valores baixos (cinza claro). A impedância relativa é baixa (vermelho a verde avermelhado). Esta fácies ocorre na Formação Camboriú, formada por solidificação de lava em ambientes subaéreos e subaquosos, rotacionada por falhas. As litologias são rochas ígneas extrusivas.

A SF4 tem refletores divergentes, contínuos, de frequência e amplitude moderada. O atributo *sweetness* varia de baixos a moderados (roxo a verde). O atributo TecVa destaca a divergência e a geometria em cunha. A impedância relativa apresenta valores moderados (verde a vermelho alaranjado), com exceções locais (azul e preto). Esta fácies ocorre nas formações Piçarras e Itapema, associada a hemi-grábens, indicando deposição durante as fases *main*-rifte e pós-rifte da bacia. As litologias incluem arenitos, siltitos, folhelhos e coquinas.

A SF5 apresenta uma configuração interna sigmoidal progradante, contínua, de alta frequência e baixa a moderada amplitude, com geometria externa de clinoforma. O atributo sweetness mostra baixos valores (roxo e azul escuro). Os atributos TecVa e impedância relativa apresentam valores médios (cinza claro a escuro e verde a vermelho, respectivamente). Esta fácies ocorre nas bordas das plataformas da Formação Itapema, associada a depósitos de barras bioclásticas progradantes. As litologias são coquinas, grainstones e rudstones.

A SF6 possui horizontes predominantemente progradantes, descontínuos a contínuos, com alta frequência e baixa a moderada amplitude, e geometria de clinoforma. O atributo sweetness é baixo, localmente alto (roxo a azul esverdeado, vermelho). O atributo TecVa ressalta o padrão progradante *shingled* (cinza claro a escuro). A impedância relativa é moderada (vermelho alaranjado a verde), localmente alta (preto). Esta fácies ocorre nos taludes da Formação Barra Velha, com deposição contínua de micrita e minerais de argila,

intercalados com períodos de desestabilização. As litologias são mudstones e wakstones.

A SF7 é caracterizada por refletores estratiformes, contínuos, de baixa frequência, com amplitude moderada a alta e geometria côncava. O atributo *sweetness* varia de baixos a altos valores (roxo a amarelo avermelhado). O atributo TecVa apresenta valores médios a altos (branco a preto), destacando o padrão estratiforme. A impedância relativa é predominantemente baixa (verde a vermelho alaranjado), podendo alcançar valores altos (preto). Esta fácies ocorre nos grabens da Formação Piçarras, associada a depósitos aluviais e fluviais da fase inicial do rifte. As litologias incluem conglomerados, arenitos e folhelhos.

A SF8 tem refletores contorcidos a caóticos, descontínuos a contínuos, de alta frequência e moderada amplitude. O atributo *sweetness* varia de baixos a altos valores (roxo a vermelho). O atributo TecVa varia de baixos a altos valores (branco a preto). A impedância relativa varia de baixo a alto contraste (verde e vermelho a amarelo e preto). Esta fácies ocorre nas plataformas carbonáticas das formações Itapema e Barra Velha, associada a bioconstruções carbonáticas. As litologias incluem boundstones, coquinas, grainstones, esferulitos e shrubstones.

Discussão e Conclusões

A análise das sismofácies no Sul do Campo de Búzios revelou a complexidade da arquitetura deposicional do intervalo pré-sal, detalhando as características de oito sismofácies distintas. As interpretações indicam uma variedade de ambientes deposicionais, desde baixas energias em profundidades lacustres a áreas de deposição de lava influenciadas por falhas tectônicas.

A SF1 e SF2 são predominantes nas formações Piçarras, Itapema e Barra Velha, mostrando ambientes de deposição de baixa energia com sedimentos finos. A SF3 evidencia processos de formação de rocha a parir de solidificação da lava. Enquanto SF4, SF5 e SF6 refletem processos tectônicos e sedimentares associados a hemi-grábens e taludes progradantes, indicando variações significativas no espaço de acomodação e energias deposicionais.

As SF7 e SF8 são encontradas em grábens e plataformas carbonáticas, sugerindo deposições aluviais, fluviais e bioconstruções complexas, essenciais para compreender a evolução tectônica e sedimentar da bacia.

Os resultados deste estudo destacam a importância de análises detalhadas de sismofácies para a compreensão da evolução tecto-estratigráfica do intervalo pré-sal. A identificação e caracterização das sismofácies fornecem *insights* valiosos para a exploração de hidrocarbonetos, especialmente em contextos complexos como o do Campo de Búzios. A fase pré-rifte, identificada por meio de analogias com outras bacias brasileiras, sugere a presença de bons reservatórios de hidrocarbonetos, reforçando a importância das atividades exploratórias na região.

Portanto, a continuidade das análises sísmicas e de perfis de poços é crucial para melhorar a caracterização dos reservatórios e otimizar as estratégias de exploração e produção de óleo e gás, contribuindo para a segurança energética do Brasil e do mundo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os integrantes do grupo Interpretação Exploratória e Caracterização de Reservatórios (GIECAR) responsáveis pelo mapeamento dos horizontes sísmicos, à Agência Nacional do Petróleo, gás Natural e Biocombustíveis e à Petrobras pela disponibilização dos dados sísmicos e geológicos, ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT) e ao Departamento de Geologia e Geofísica (GGO) da UFF pela infraestrutura.

Referências

Agência Nacional do Petróleo, 2022. Relatório Executivo. Avaliable at https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos/de/re/2022. Accessed on 10 May 2024.

Ayoo, C., 2020. Toward Energy Security for the Twenty-First Century. In Rijeka, C. (Ed.), Energy Policy. [online~. Avaliabel: https://www.intechopen.com/books/energy-policy/towards-energy-security-for-the-twenty-first-century.

International Energy Agency, 2022. Oil Market Report. Avaliable at https://www.iea.org/. Accessed on: 10 May 2024.

Khan et al. (02 co-authors), 2020. The impact of natural resources, energy consumption, and population growth on environmental quality: Fresh evidence from the United States of America. Science of the TotalEnvironment, v. 757: 1-13.

MacDonald et al. (04 co-authors), 2021. Middle Pleistocene fire use: The fist signal of widespread cultural diffusion in human evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 118: 1-8.

Mitchum Jr, R. M.. & Vail, P. R., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in 116 depositional sequences. In: Payton, C.E. (ed.). Seismic Stratigraphy – Application Hidrocarbon Exploration. Tulsa, AAPG, 53-62 (Memoir # 26).

Petrobras, 2024. Plano Estratégico 2024_2028+. Avaliabel:https://www.petrobras.com.br/quem-somos/estrategia. Accessed on: 20 May 2024.

Ribeiro, D., 1975 O processo civilizatório: etapas da evolução sociocultural. In: Ribeiro, D. (Ed), O processo civilizatório: etapas da evolução sociocultural,. Rio de Janeiro (RJ), Brazil, vol 3: 265-265.

Souza, L. S., 2019. O Pré-sal Brasileiro e Suas Vertentes: da evolução geológica ao mercado internacional do petróleo. Ph. D. Thesis. Department of Geology of the University of Minas Gerais, Brazil.

Tessmer, H., 2002. Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem. Revista Liberato, vol 3: 1-7

Xu, G., Haq, B. U., 2022. Seismic facies analysis: Past, present and future. Earth-Science Reviews, v. 2204, p. 103876

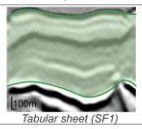
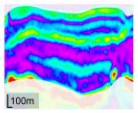
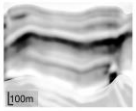
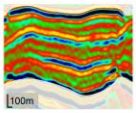
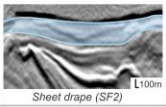
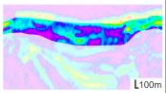
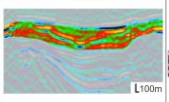
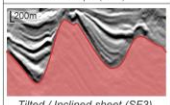
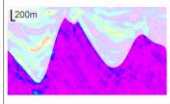
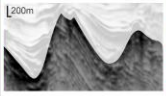
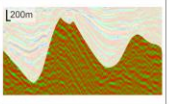
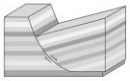
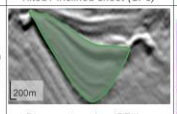
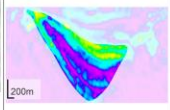
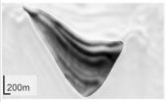
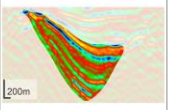
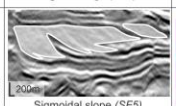
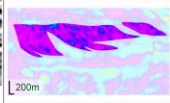
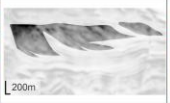
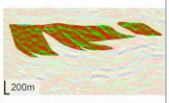
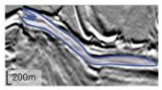
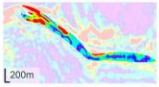
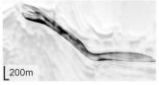
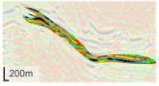
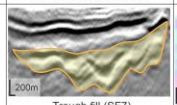
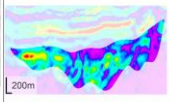
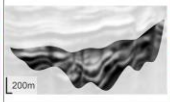
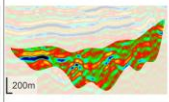
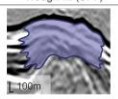
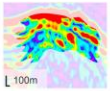
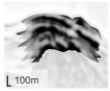
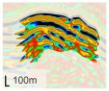
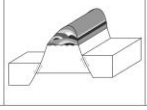
	Fácies Sísmica				Geometria Externa	Configuração Interna	Posição	Litologia Principal	Interpretação	Elemento arquitetural
	Amplitude	Sweetness	TecVa	Impedância acústica relativa						
Sheet	 Tabular sheet (SF1)					Refletores paralelos, contínuos a descontínuos, alta frequência e moderada amplitude	Baixos	PIÇ: Folhelhos ITP; BVE: Mudstones e wakestones	Deposição de siliciclásticos finos e/ou argila magnesiana por decantação em ambiente de baixa energia	Lago Profundo
	 Sheet drape (SF2)					Refletores paralelos, contínuos a descontínuos, alta frequência e moderada amplitude	altos plataformais	ITP; BVE: Mudstones, wackstones e packstones BVE: Mudstones, Esferulitos e shrubstones	Domínio de decantação na porção central e bioclastos nas margens. Ambiente confinado a semiaberto	Lago raso plataformal
	 Tilted / Inclined sheet (SF3)					Refletores paralelos, contínuos a descontínuos, alta frequência e baixa amplitude	Distribuição uniforme	CAM: Rochas Vulcânicas	Solidificação da lava em ambiente subárea a subaquoso	Planície vulcânica
Wedge	 Divergent wedge (SF4)					Refletores divergentes, contínuos, moderada frequência e amplitude	Hemi-grabens	PIÇ: Arenitos, siltitos e folhelhos ITP: Coquinas	Sedimentação sintectônica de siliciclásticos e/ou carbonatos em hemi-grábens.	Lago raso a profundo em borda flexural nos hemi-grabens
Clinoform	 Sigmoidal slope (SF5)					Refletores sigmoidais progradantes, contínuos, alta frequência, baixa a média amplitude	Borda da plataforma	ITP: Coquinas, grainstones e rudstones	Depósitos sigmoidais progradantes na margem de plataforma	Barras bioclásticas em margem de plataforma lacustre
	 Prograding slope (SF6)					Refletores progradantes inclinados, descontínuos a contínuos, alta frequência, baixa a média amplitude	Talude	BVE: Mudstones, wackstones	Depósitos de acreção e progradação do talude	Talude superior e inferior
Concave	 Trough fill (SF7)					Refletores estratiformes, contínuos, frequência baixa e amplitude moderada a alta	Baixos	PIÇ: Conglomerados, arenitos e folhelhos	Depósitos de preenchimento com sedimentos grossos fluviais/aluviais	Canais fluviais / Leques aluviais
Mound	 Carbonate Mounds (SF8)					Refletores contorcidos a caóticos, descontínuos a contínuos, frequência alta e amplitude moderada	Altos e borda da plataforma	ITP: Boundstones e Coquinas BVE: Grainstones, esferulititos e shrubstones	Acumuções carbonáticas agradacionais (*Build-up´s* carbonáticos)	Lacustre raso plataformal

Figura 3. Tabela de sismofácies do Sul do Campo de Búzios, Bacia de Santos.