

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

**CONDIÇÕES DEPOSICIONAIS E PADRÕES DIAGENÉTICOS
DO MEMBRO OITEIRINHOS DA FORMAÇÃO MURIBECA,
BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS**

MARIANE CRISTINA TROMBETTA

ORIENTADOR - Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

Porto Alegre, 2021

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

**CONDIÇÕES DEPOSICIONAIS E PADRÕES DIAGENÉTICOS
DO MEMBRO OITEIRINHOS DA FORMAÇÃO MURIBECA,
BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS**

MARIANE CRISTINA TROMBETTA

ORIENTADOR - Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Marcela Marques Vieira - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Francisco Tognoli - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos

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

Porto Alegre, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patricia Pranke

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Vice-Diretora: Tatiana Silva da Silva

Trombetta, Mariane Cristina
Condições Depositionais e Padrões Diagenéticos do
Membro Oiteirinhos da Formação Muribeca, Bacia de
Sergipe-Alagoas / Mariane Cristina Trombetta. -- 2021.
105 f.
Orientador: Luiz Fernando De Ros.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Petrologia. 2. Membro Oiteirinhos. 3. Diagenese.
4. Bacia de Sergipe-Alagoas. 5. Sequência
Transicional. I. De Ros, Luiz Fernando, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica fornecida pela Biblioteca do Instituto de Geociências
<https://sabi.ufrgs.br/servicos/publicoBC/ficha.php>

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: ensinoppggeo@ufrgs.br; financiroppggeo@ufrgs.br;
suporteppggeo@ufrgs.br

DEDICATÓRIA

Ao “Tio” Carlos (*in memoriam*), cujo exemplo e o incentivo à educação foram fundamentais para eu chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela formação de excelência.

Ao meu orientador e referência profissional, Prof. Luiz Fernando De Ros, pelo cuidado, atenção, correções e disposição na construção desta dissertação.

À Petrobras pelo fornecimento do material para a realização desta pesquisa.

À Profa. Amanda Goulart, pelas conversas inspiradoras, dicas, artigos e experiências compartilhadas.

Aos meus professores e colegas da estratigrafia, que me acolheram carinhosamente na UFRGS, e estiveram sempre dispostos para ajudar. Agradeço especialmente ao Argos, Elias, Garibaldi, Kenji, Matheus e Sabrina, pelas dicas, parceria e discussões petrográficas.

À minha família, pela compreensão e suporte incondicional durante este período.

À Marisa, ao Homero, à Ivanise e ao Tio Egídio, minha família de Porto Alegre, que me acolheram de forma tão especial durante este período.

RESUMO

A Formação Muribeca da Bacia de Sergipe-Alagoas, nordeste do Brasil, registra a transição das condições continentais para marinhas durante a abertura do Atlântico Sul. A formação é constituída pelos depósitos clásticos grossos do Membro Carmópolis, recobertos pelos evaporitos Ibura, e pelo Membro Oiteirinhos. O Membro Oiteirinhos se caracteriza por ampla variação litológica, incluindo depósitos siliciclásticos, carbonáticos e híbridos. Existem poucos estudos sobre os depósitos do Membro Oiteirinhos, apesar de sua considerável importância científica, com registro das condições ambientais estabelecidas durante este momento chave da evolução do Atlântico Sul. Esta dissertação apresenta um estudo petrológico do Membro Oiteirinhos, integrado com dados sedimentológicos e geofísicos de cinco poços terrestres. As rochas estudadas incluem arenitos siliciclásticos e híbridos siliciclásticos-carbonáticos, margas, microbialitos, calcarenitos e calcilitos. Os arenitos siliciclásticos apresentam importante contribuição de fragmentos metassedimentares de baixo grau, provenientes da erosão de terrenos orogênicos supracrustais proterozóicos. Os fragmentos carbonáticos intrabaciais incluem oóides, pelóides, oncóides, intraclastos, e bioclastos de ostracodes, foraminíferos bentônicos e equinodermos. Microbialitos carbonáticos ocorrem associados à depósitos lamosos orgânicos, geralmente ricos em fragmentos carbonosos e bioclastos fosfáticos. A evolução diagenética inicial ocorreu em condições alcalinas, e sob a influência de clima árido e dos evaporitos do Membro Ibura. Os aspectos deposicionais e diagenéticos revelam condições progressivamente menos evaporíticas durante a deposição do Membro Oiteirinhos, dependentes de rápidas e frequentes mudanças no ambiente deposicional, registradas pela intensa variação litológica. Espera-se que os resultados deste estudo possam auxiliar na compreensão deste período chave, bem como gerar inferências sobre a qualidade dos potenciais reservatórios da unidade.

Palavras-chave: depósitos híbridos, Membro Oiteirinhos, diagênese, sequência transicional

ABSTRACT

The Muribeca Formation from the Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazil, records the transition from continental to marine conditions during the initial South Atlantic opening. The formation is constituted by the basal coarse clastics of the Carmópolis Member, which are covered by the Ibura Member evaporites, and by the Oiteirinhos Member. The Oiteirinhos Member is characterized by a wide lithological variation, including siliciclastic, carbonate, and hybrid deposits. There are very few studies of the Oiteirinhos deposits, despite their considerable scientific importance as evidence on the conditions during this key time of South Atlantic evolution. This dissertation presents a petrological study of the Oiteirinhos Member, integrated with sedimentological and geophysical data from five onshore wells. The studied rocks include siliciclastic sandstones, siliciclastic-carbonate hybrid arenites, marls, microbialites, calcarenites, and calcilutites. The composition of the sandstones is rich in low-grade metasedimentary fragments from the erosion of Upper Proterozoic supracrustal orogenic terrains. Intrabasinal carbonate constituents include ooids, peloids, oncoids, intraclasts, and bioclasts of ostracodes, benthic foraminifers, and echinoderms. Carbonate microbialites occur associated with laminated organic mud deposits, commonly rich in carbonaceous and phosphate fragments. The initial diagenetic evolution of Oiteirinhos deposits occurred under alkaline conditions, and the influence of arid climate and the Ibura Member evaporites. The depositional and diagenetic aspects reveal progressively less evaporitic conditions during the deposition of the Oiteirinhos Member, dependent on the rapid and frequent changes in the depositional environment recorded by the intense lithological variation. We expect that their integrated petrologic-sedimentologic characterization may help to understand this key period, as well as to generate inferences on the quality of potential reservoirs in the unit.

Keywords: hybrid deposits, Oiteirinhos Member, diagenesis, transitional sequence

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelos conceituais mostrando os diferentes processos de mistura de sedimentos. A) mistura pontuada. B) mistura de fácies. C) mistura in situ (adaptada de Chiarella <i>et al.</i> , 2017).....	14
Figura 2. Variação nas proporções relativas de grãos extrabaciais e intrabaciais relacionados com eventos transgressivos e regressivos (adaptada de Morad <i>et al.</i> , 2012).....	16
Figura 3. Carbonatos microbiais definidos em função da macrofábrica (adaptado de Riding, 2011).....	21
Figura 4. Texturas carbonáticas evaporíticas em ambientes costeiros e subaquosos (Warren, 2016).....	22
Figura 5. Fluxograma do método Gazzi-Dickinson de separação dos constituintes primários (adaptado de Zuffa, 1985).....	28
Figura 6. Mapa de localização da Bacia de Sergipe -Alagoas com os poços estudados posicionados (pontos vermelhos). Três poços localizam-se no campo de Siririzinho (em verde) e outro poço está inserido no campo de Carmópolis (em rosa). Falhas estão desenhadas em preto e a linha de Charneira Alagoas está em vermelho. Estruturas foram definidas por Falkenhein <i>et al.</i> , (1986) e Van Der Ven <i>et al.</i> (1989).	31
Figura 7. Carta cronoestratigráfica da Sub-Bacia Sergipe (extraído de Campos Neto <i>et al.</i> , 2007).....	33
Figura 8. Carta cronoestratigráfica da Sub-Bacia Alagoas (extraído de Campos Neto <i>et al.</i> , 2007).....	34
Figura 9. Carta cronoestratigráfica da seção Aptiana e Albiana da sub-bacia de Sergipe (adaptado de Campos Neto <i>et al.</i> 2007).....	40

SUMÁRIO

Sobre a estrutura da Dissertação	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. ESTADO DA ARTE	12
3.1. Depósitos híbridos siliciclásticos-carbonáticos	12
3.1.1. Controles deposicionais.....	13
3.1.2. <i>Diagênese e potencial qualidade como reservatórios</i>	17
3.2. Depósitos microbiais associados a evaporitos	19
3.2.1. Controles deposicionais.....	19
3.2.2. <i>Diagênese e potencial qualidade como reservatórios</i>	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1. Levantamento bibliográfico	27
4.2. Petrografia quantitativa	27
4.3. Fotomicrografia.....	29
4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	29
4.5. Integração dos dados	30
5. ÁREA DE ESTUDO	31
5.1. Evolução Tectônica e Litoestratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas.....	32
5.1.1. <i>Sinéclise</i>	35
5.1.2. <i>Supersequência Pré-rifte</i>	35
5.1.3. <i>Supersequência Rifte</i>	35
5.1.4. <i>Supersequência Transicional ou Pós-rifte</i>	37
5.1.5. <i>Supersequência Drifte</i>	38
5.2. Formação Muribeca	39
5.2.1. <i>Membro Oiteirinhos</i>	41
6. SÍNTESE DOS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES	42
7. CONCLUSÃO	45
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
9. ARTIGO SUBMETIDO.....	54
10. ANEXOS	105

Sobre a estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo: “*Depositional and diagenetic conditions during early South Atlantic opening: Evidence from the Oiteirinhos Member, Muribeca Formation of Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil*”, submetido ao periódico *Cretaceous Research*, classificado no estrato Qualis-CAPES A2. A sua organização compreende as seguintes partes principais:

- 1) Introdução sobre o tema da dissertação.
- 2) Objetivos da pesquisa.
- 3) Estado da arte, compreendendo a revisão sobre os principais aspectos deposicionais e diagenéticos de arenitos híbridos e depósitos microbiais associados a evaporitos.
- 4) Materiais e métodos, com uma descrição sucinta acerca das técnicas utilizadas no desenvolvimento do estudo.
- 5) Localização e contexto geológico e estratigráfico do Membro Oiteirinhos, Formação Muribeca (Aptiano) da Bacia de Sergipe-Alagoas.
- 6) Resumo dos principais resultados e discussões.
- 7) Conclusão.
- 8) Artigo científico submetido.
- 9) Anexos, contendo:
 - Anexo I. Perfis integrados dos testemunhos
 - Anexo II. Tabela de resultados de petrografia quantitativa
 - Anexo III. Descrições petrográficas individuais
 - Anexo IV. Documentação fotomicrográfica
 - Anexo V. Resultados das análises de microscopia eletrônica de varredura com suporte EDS.

1. INTRODUÇÃO

As unidades estratigráficas depositadas entre o final do Aptiano e início do Albiano nas bacias de margem leste Brasileiras registram o início da evolução do Oceano Atlântico Sul. Na Bacia de Sergipe-Alagoas, a sucessão Aptiana-Albiana é reconstituída como uma plataforma mista siliciclástica-carbonática, representada pelas formações Muribeca e Riachuelo, que correspondem à fase de transição do ambiente lacustre para o marinho, durante a abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo (Koutsoukos *et al.*, 1991).

A Formação Muribeca subdivide-se em Membro Carmópolis, Ibura e Oiteirinhos. Localizado acima dos evaporitos Ibura, o Membro Oiteirinhos, objeto deste estudo, é a unidade que registra o início das condições marinhas na bacia de Sergipe-Alagoas e é caracterizado por uma ampla variedade litológica. A grande variabilidade de litologias, representada por rochas evaporíticas, carbonáticas, híbridas e siliciclásticas é uma evidência das mudanças climáticas que ocorreram no final do Aptiano e início do Albiano (Caetano-Filho *et al.*, 2017).

Assim como as outras unidades que registram essa fase transicional, o Membro Oiteirinhos tem significativa importância para a compreensão das condições iniciais de abertura do Oceano Atlântico, um período-chave na evolução da margem leste brasileira. Apesar disso, o Membro Oiteirinhos carece de uma caracterização detalhada e sistemática de seus depósitos.

Os trabalhos sobre sequência transicional da Bacia de Sergipe-Alagoas abordam questões amplas, como evolução estrutural e estratigráfica (e. g. Campos Neto *et al.*, 2007; Cruz, 2008), sendo que poucos incluem dados petrológicos (e. g. Araújo *et al.*, 2009) e nenhum inclui um estudo integrado de petrografia sistemática do Membro Oiteirinhos. A petrografia sistemática se mostra uma ferramenta importante para contribuir com a caracterização destes depósitos, uma vez que condições climáticas estão diretamente relacionadas à evolução deposicional e diagenética de rochas sedimentares.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar os aspectos deposicionais e os processos diagenéticos do Membro Oiteirinhos, de modo a contribuir com o conhecimento sobre os estágios iniciais do estabelecimento das condições marinhas nas bacias da margem leste brasileira.

Os objetivos específicos incluem:

- a análise faciológica de testemunhos previamente descritos;
- a caracterização de texturas, fábricas, constituintes primários, diagenéticos e tipos de poros em lâminas petrográficas;
- a discussão das condições de precipitação e composição dos produtos diagenéticos;
- a discussão da evolução deposicional e diagenética do Membro Oiteirinhos, e seu impacto sobre a qualidade de potenciais reservatórios na unidade.

3. ESTADO DA ARTE

A revisão do estado da arte sobre os principais temas de interesse no estudo desenvolvido foi concentrada nas condições deposicionais, na diagênese e potencial qualidade como reservatórios dos depósitos híbridos siliciclásticos-carbonáticos, e dos depósitos microbiais associados a evaporitos.

3.1. Depósitos híbridos siliciclásticos-carbonáticos

Arenitos híbridos são formados pela mistura de sedimentos de origem intrabacia e extrabacia (Zuffa, 1980). Os grãos extrabaciais registram informações sobre a área fonte e, são a base para os estudos de proveniência sedimentar. Por

outro lado, os fragmentos intrabaciais fornecem informações sobre as condições da bacia sedimentar (Zuffa, 1980). Uma das classes de arenitos híbridos que se destaca, devido à sua abundância no registro, são os arenitos formados pela mistura de grãos siliciclásticos e partículas carbonáticas aloquímicas.

3.1.1. Controles deposicionais

Os sedimentos arenosos híbridos siliciclásticos-carbonáticos são depositados principalmente em três condições: (i) plataformas em baixa latitude, por mistura episódicas devido a tempestades, ou geração de partículas aloquímicas *in situ* em ambientes clásticos; (ii) em latitudes altas ou médias, onde a sedimentação siliciclástica é potencialmente exclusiva; ou (iii) através de misturas episódicas de areias carbonáticas e siliciclásticas, ou ao longo de limites entre fácies carbonáticas e siliciclásticas (Mount, 1984; Spadafora *et al.*, 1998).

Existem dois padrões de mistura de sedimentos carbonáticos e siliciclásticos: a mistura composicional e a mistura estratal (Chiarella *et al.*, 2017). A mistura composicional refere-se à deposição de frações carbonática e siliciclástica no mesmo espaço e tempo, gerando camadas com composição híbrida. A mistura estratal refere-se aos depósitos que intercalam composição siliciclástica e carbonática. Camadas composicionalmente híbridas também podem ocorrer intercaladas com camadas puramente carbonáticas e/ou siliciclásticas (Chiarella *et al.*, 2017).

Quanto aos processos de mistura de sedimentos, Chiarella *et al.* (2017) destacam três:

- Mistura pontuada: ocorre devido a eventos catastróficos de alta intensidade ou a mudanças climáticas de curto prazo, resultando na coexistência isolada e ocasional de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos.
- Mistura de fácies: representa a mistura que ocorre nas áreas entre ambientes siliciclásticos e carbonáticos.

- Mistura *in situ*: ocorre onde existe a disponibilidade contemporânea no espaço das duas frações (siliciclástica e carbonática). Este processo resulta em uma mistura composicional (Fig. 1).

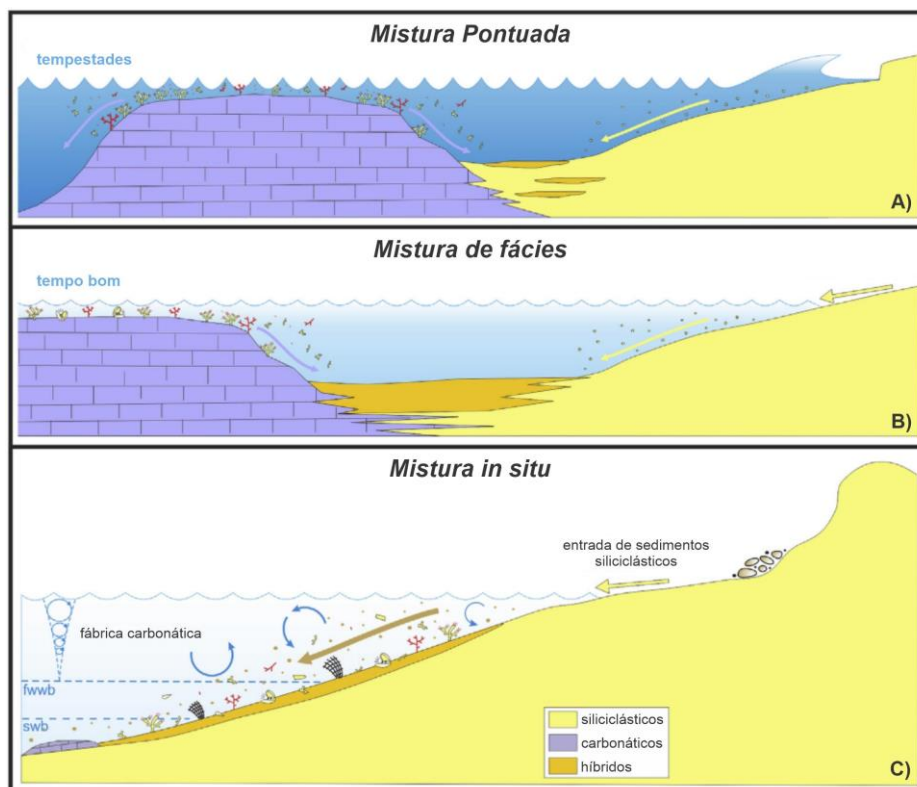


Figura 1. Modelos conceituais mostrando os diferentes processos de mistura de sedimentos. A) mistura pontuada. B) mistura de fácies. C) mistura *in situ* (adaptado de Chiarella *et al.*, 2017).

A sedimentação de depósitos híbridos apresenta padrões complexos e depende de diversos fatores que controlam sua deposição. Os principais controles são a tectônica, as mudanças relativas do nível do mar, o aporte de sedimentos siliciclásticos e o perfil batimétrico da bacia (Dolan, 1989).

Ao longo de margens ativas, o soergimento tectônico e a subsidência das áreas-fonte atuam como o principal controle na deposição de ciclos carbonáticos e siliciclásticos (Dorsey & Kidwell, 1999). Os dois efeitos tectônicos mais importantes são: (1) o soergimento das áreas-fonte de sedimentos siliciclásticos, resultando em

aumento da erosão e eventual soterramento dos ambientes carbonáticos; (2) a exposição ou afogamento das plataformas carbonáticas devido a movimentos tectônicos verticais (Dolan, 1989).

Em bacias tectonicamente ativas, a sedimentação híbrida pode ser gerada por uma variedade de processos gravitacionais, incluindo fluxos de detritos e correntes turbidíticas. Este estilo de sedimentação híbrida siliciclástica-carbonática requer um conjunto específico de condições oceanográficas e tectônicas, incluindo: (1) alta taxa de produção carbonática em águas rasas, sem extensiva produção de organismos ligantes ou cimentação eodiagenética; (2) baixa taxa de destruição das partículas carbonáticas relativa à taxa de produção, de modo que as partículas carbonáticas sejam texturalmente similares aos detritos siliciclásticos grossos; (3) altos gradientes de inclinação da margem da bacia, que são necessários para o transporte rápido dos fluxos de massa talude abaixo (Dorsey & Kidwell, 1999).

Eventos de transgressão e regressão influenciam na produção e na proporção de grãos extrabaciais e intrabaciais (Fontana *et al.*, 1986; Dolan, 1989; Morad *et al.*, 2012). A proporção de grãos intrabaciais carbonáticos e não-carbonáticos aumenta sob condições de transgressão (Fig. 2). As transgressões promovem o alagamento das áreas da plataforma, aumentando a área disponível para a geração de partículas carbonáticas, retendo ao mesmo tempo os sedimentos siliciclásticos na planície costeira (Dolan, 1989). Ao contrário, durante as regressões marinhas, a produção dos grãos intrabaciais é diminuída ou até interrompida, favorecendo a erosão e a redistribuição de sedimentos siliciclásticos extrabaciais (Dolan, 1989).

Durante eventos regressivos pode ocorrer a ressedimentação de depósitos da borda da plataforma. Arenitos híbridos com abundância de intraclastos podem se originar durante os estágios da queda, pela erosão dos sedimentos anteriormente depositados no nível alto (Fontana *et al.*, 1989). Estes depósitos podem ocorrer também na forma de preenchimento de canais e lobos frontais de leques turbidíticos, condicionados pela seleção hidráulica, relacionada com a densidade e forma dos fragmentos (Fontana *et al.*, 1989). Bioclastos leves e pelóides de baixa densidade são

transportados mais facilmente e podem ser concentrados nas margens dos lobos frontais (Fontana *et al.*, 1989).

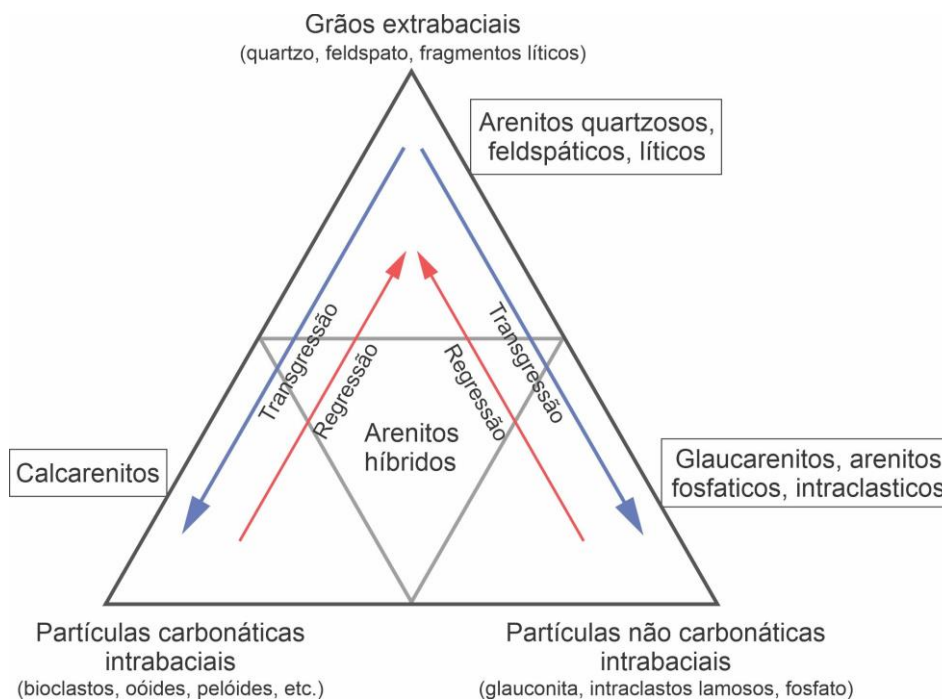


Figura 2. Variação nas proporções relativas de grãos extrabaciais e intrabaciais relacionados com eventos transgressivos e regressivos (adaptado de Morad *et al.*, 2012).

A morfologia da bacia controla a ocorrência e também a geometria deposicional das sequências híbridas. A morfologia controla, por exemplo, a distribuição das bioconstruções carbonáticas, que tendem a ocupar regiões mais rasas, devido as melhores condições ambientais, como luz solar e temperatura (McNeill *et al.*, 2004; D'Agostini *et al.*, 2015).

Os eventos de regressão impactam de forma diferencial as plataformas carbonáticas (com topo plano e raso) e as rampas carbonáticas (com inclinação leve e gradual). Nas plataformas, a regressão promove extensa exposição e a interrupção da sedimentação carbonática. Já em rampas, a sedimentação híbrida pode continuar durante quedas moderadas do nível relativo do mar, pois a produção carbonática poderá continuar na porção mais distal da rampa (Dolan, 1989).

3.1.2. *Diagênese e potencial qualidade como reservatórios*

A composição primária dos sedimentos desempenha um papel importante na diagênese (e.g., Surdam *et al.*, 1989; De Ros, 1996). A mistura de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos também tem grande influência na diagênese, relacionada com a proporção e distribuição de cada classe no sedimento (Chiarella *et al.*, 2017).

Comparando-se a diagênese de arenitos siliciclásticos com a de arenitos híbridos siliciclásticos-carbonáticos submetidos à mesma história de soterramento, é possível verificar a influência da quantidade de partículas carbonáticas na evolução diagenética. Em muitos arenitos híbridos, a cimentação eodiagenética marinha e mesodiagenética pode preencher toda ou quase toda a porosidade primária (Spadafora *et al.*, 1998). Em arenitos siliciclásticos com pequenas proporções de partículas carbonáticas, comumente a cimentação concentra-se em torno das partículas carbonáticas e apresenta distribuição irregular. Nos arenitos híbridos, a cimentação é geralmente tanto derivada dos bioclastos, outros aloquímicos e fragmentos de rochas carbonáticas quanto neles nucleada (Spadafora *et al.*, 1998). Por outro lado, a cimentação rápida e abundante dos arenitos híbridos pode favorecer o desenvolvimento da porosidade e permeabilidade em fraturas durante sua deformação tectônica (Mansurbeg *et al.*, 2009).

A nucleação é um aspecto crítico na distribuição da cimentação carbonática. A cimentação de calcita em arenitos depositados em ambientes marinhos rasos não é normalmente confinada à superfície das partículas carbonáticas. No entanto, quando bioclastos são a única fonte de carbonato significativa do sistema, o grau de saturação necessário para a nucleação será alcançado primeiramente nos pontos ou camadas com maior concentração de bioclastos carbonáticos (Bjørkum & Walderhaug, 1990). Por essa razão, a ocorrência de concreções carbonáticas é comumente favorecida em depósitos híbridos siliciclásticos-carbonáticos. A distribuição aleatória das concreções pode ser devida à distribuição dispersa das partículas carbonáticas ou à

regularidade da distribuição das partículas carbonáticas dentro do estrato (Bjørkum & Walderhaug, 1990).

Pausas na sedimentação detrítica podem favorecer a concentração de partículas carbonáticas em níveis específicos, e conseqüentemente a alternância de níveis híbridos intensamente cimentados por carbonato com níveis siliciclásticos mais porosos (Molenaar & Martinius, 1990). O entendimento dos processos que geram a mistura de sedimentos nas camadas, ou a intercalação de estratos siliciclásticos e carbonáticos, é essencial quando se investiga a compartimentalização lateral e vertical produzida pela alternância de intervalos permeáveis, frequentemente siliciclásticos, e impermeáveis, comumente carbonáticos ou híbridos (Zecchin & Caffau, 2012).

A heterogeneidade dos reservatórios é definida pela distribuição da porosidade e permeabilidade devida à variação da textura e composição primária dos depósitos sedimentares (Bonnell & Hurich, 2008). A heterogeneidade pode ainda ser condicionada pela diagênese e pela deformação mecânica das rochas (Chiarella *et al.*, 2017). No geral, os sedimentos híbridos estão sujeitos a mais rápida e abrangente perda de porosidade devido à sua maior compactação e cimentação em relação aos arenitos siliciclásticos (Mansurbeg *et al.*, 2009). Entretanto, através da dissolução dos carbonatos, depósitos híbridos podem exibir altas porosidades (Feng *et al.*, 2013). Devido à diagênese, não é aconselhável se inferir a qualidade dos reservatórios utilizando apenas as fácies deposicionais (Fontana *et al.*, 1986).

Observa-se que a mistura de sedimentos é um processo muito comum nas sucessões sedimentares. As diferenças composicionais dos depósitos híbridos siliciclásticos-carbonáticos se refletem em diferentes condições de estabilidade física e química dos sedimentos, que podem atuar como um importante controle da evolução diagenética, da qualidade e da heterogeneidade dos reservatórios.

3.2. Depósitos microbiais associados a evaporitos

Diversas comunidades microbiais podem se desenvolver em ambientes altamente salinos como lagos, salinas e lagoas (Brigmon *et al.*, 2008; Warren, 2016). Cada sistema é influenciado por um conjunto de diferentes parâmetros que refletem no pH, íons em solução, e nas fontes orgânicas e detríticas (Brigmon *et al.*, 2008).

Os sistemas microbiais evaporíticos modernos são muito menos extensos do que os encontrados nos antigos mares epicontinentais (Gerdes *et al.*, 2000). Em condições marinhas rasas, a associação de evaporitos e esteiras microbiais podem cobrir áreas de centenas a milhares de metros quadrados e formar um ambiente propício para a acumulação de matéria orgânica (Decima *et al.*, 1988; Gerdes *et al.*, 2000).

3.2.1. Controles deposicionais

Os sedimentos microbiais evaporíticos podem se acumular tanto dentro de outros sedimentos, no fundo de ambientes aquáticos salinos rasos, ou devido à decantação pelágica de cristais formados pela ação microbiana na superfície da coluna d'água (Gerdes *et al.*, 2000). Os microrganismos são responsáveis por diversas interações biogeoquímicas e metabólicas que podem alterar o ambiente e influenciar a sedimentação (Brigmon *et al.*, 2008). Temperatura, tipo de comunidade microbiana, química da água e presença de eucariontes que se alimentam destas comunidades microbiais, influenciam na taxa de formação e litificação destas comunidades (Brigmon *et al.*, 2008).

Poucos grupos de constituintes formam microbialitos em ambientes evaporíticos, no entanto, são altamente produtivos (Gerdes *et al.*, 2000). Entre os constituintes, destacam-se as cianobactérias filamentosas e cocóides, outras bactérias fototróficas, diatomáceas, halobactérias e algas verdes halofílicas (Gerdes *et al.*, 2000; Warren, 2016). As espécies mudam com a profundidade da água,

salinidade, e também mudaram ao longo da evolução geológica (Warren, 2016). As cianobactérias, que possuem a capacidade de secreção de um revestimento mucilaginoso, são organismos importantes em ambientes salinos devido à sua adaptação para resistir à dissecação e outros fatores estressantes, como a radiação ultravioleta e a limitação de nutrientes (Warren, 2016).

Comunidades microbiais incluem biofilmes, esteiras e microbialitos (Brigmon *et al.*, 2008). Podem apresentar estruturas simples como na maioria dos biofilmes, formados por delgadas colônias de bactérias, ou uma estrutura estromatolítica composta por uma comunidade microbial altamente diversa e ativa (Farmer & Des Marais, 1994). Processos abióticos, que incluem a deposição de sedimentos e a precipitação química, também podem ser importantes na formação de biofilmes ou esteiras microbiais (Brigmon *et al.*, 2008).

Biofilmes exibem grande complexidade, amplamente dependente da interação entre microrganismos, condições ambientais, produtos orgânicos e substratos inorgânicos como areia e lama (Brigmon *et al.*, 2008). O termo formal “*microbially induced sedimentary structures*” (MISS) foi criado para classificar os biofilmes fossilizados (Noffke *et al.*, 2001). Existem três variações de biofilmes: subaquático, subaéreo e *biodictyon* (caracterizados por redes de organismos vivos, principalmente filamentosos, embutidos no solo, sedimentos ou rochas, formando esteiras) (Krumbein *et al.*, 2003). Esteiras microbiais são comumente comunidades multilaminadas que incorporam detritos (Krumbein *et al.*, 2003).

Microbialitos são os depósitos organo-sedimentares que crescem como resultado do aprisionamento de sedimentos, precipitação inorgânica e precipitação biologicamente influenciada por comunidades microbiais bentônicas (Burne & Moore, 1987). Os microbialitos apresentam diferentes estruturas biogênicas, de acordo com as espécies e forma de colônia da população microbial, ambiente e grau de laminação (Dupraz & Visscher, 2005). Estromatolitos são os depósitos com fábrica laminada, apresentam composição carbonática, silicosa, fosfática ou evaporítica. Trombolitos apresentam fábrica macroscópica *clotted* (grumosa). Dendrolitos apresentam fábrica

dendriforme ou arbustiforme, tipicamente produzida por micróbios calcificados. Leiolitos são os depósitos que não apresentam laminação, aspecto grumoso ou dendrítico, mas sim homogeneamente maciço (Riding, 2000) (Fig. 3).

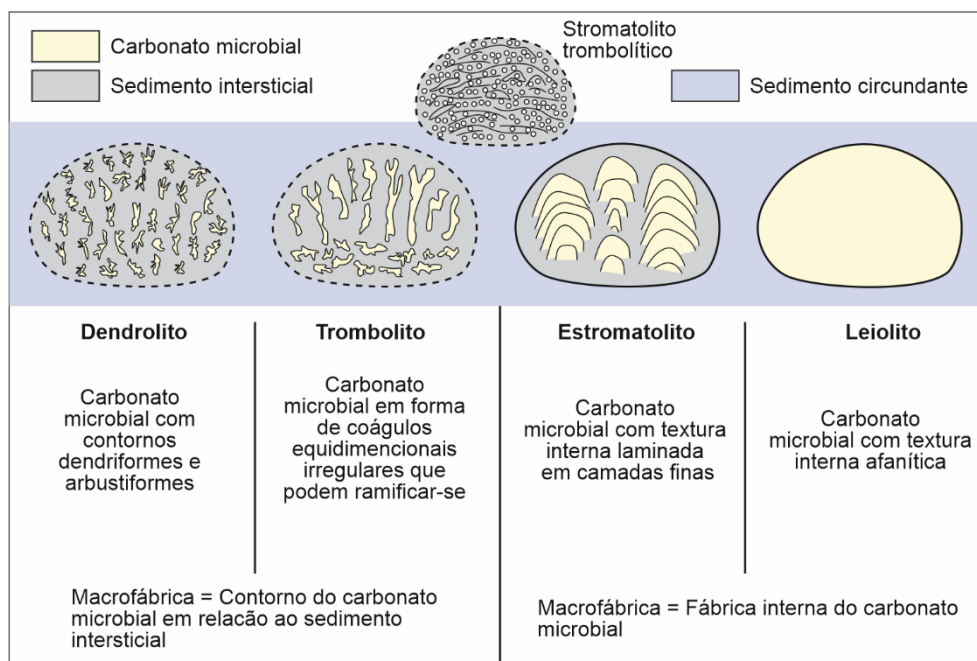


Figura 3. Carbonatos microbiais definidos em função da macrofábrica (adaptado de Riding, 2011).

A dinâmica de qualquer ambiente evaporítico tem a característica do fluxo hidrológico de saída superar o de entrada (Warren, 2016). Com isso, outras fácies carbonáticas são frequentemente associadas a ambientes evaporíticos. As rápidas mudanças no nível de água, principalmente nas áreas marginais, conduzem frequentemente à intercalação de fácies de praia (*strandzone*) e fácies subaquosas. A faixa costeira, em muitos sistemas carbonáticos evaporíticos, se caracteriza pela associação de estromatólitos, laminitos criptoalgais com gretas de contração, pisólitos, oóides, intraclastos, crostas e *tepees* (Fig. 4). Nessas áreas, rápidas variações da linha de costa, associadas com altas taxas de capilaridade, promovem rápida cimentação, na medida que ocorre o empilhamento de camadas de brechas

intraclásticas, biolaminitos, pisólitos e *tepees*, tipicamente separados por camadas de sal e brechas de dissolução (Warren, 2016).

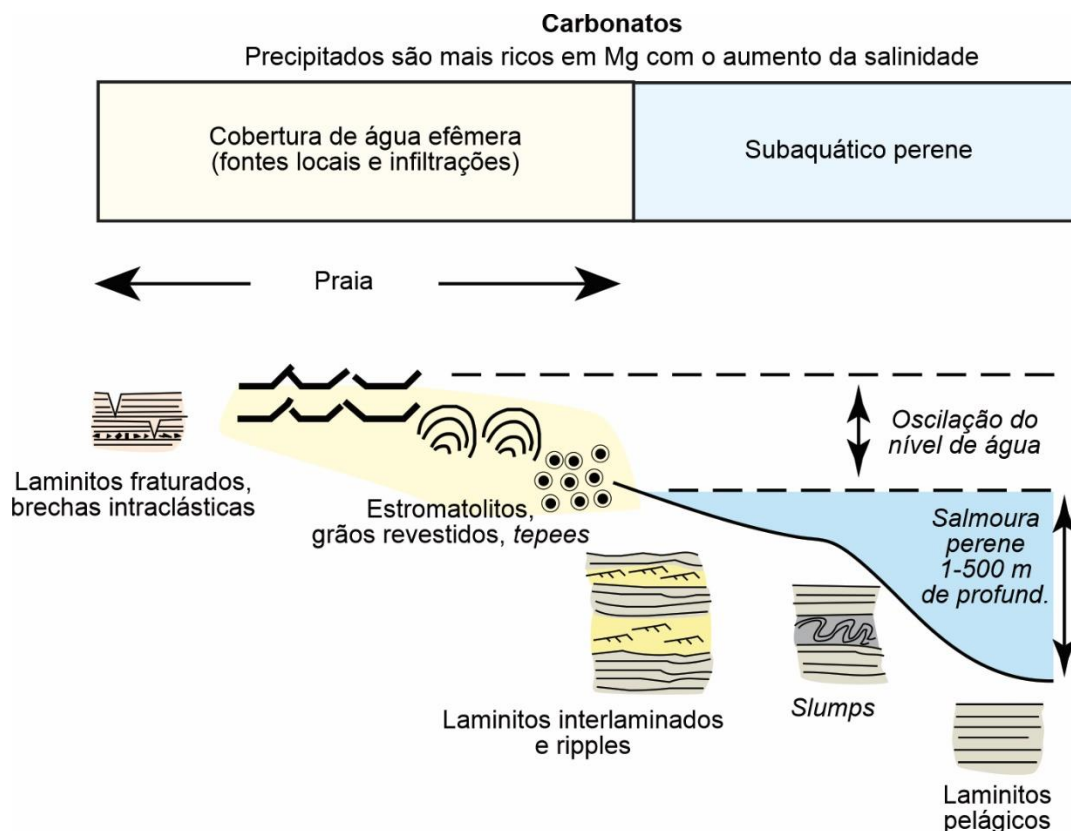


Figura 4. Texturas carbonáticas evaporíticas em ambientes costeiros e subaquosos (Warren, 2016).

Depósitos carbonáticos finamente laminados são também geralmente associados com carbonatos evaporíticos antigos e atuais. Estes depósitos podem ter origem inorgânica ou serem biologicamente estruturados (Warren, 2016). Em alguns desses laminitos, a deposição inorgânica se dá pela alternância de lâminas de micrita (agulhas de aragonita que precipitam durante o verão na interface ar/salmoura e decantam) e de lama siliciclástica (sedimentos em suspensão que chegam devido à eventos de tempestade) (Warren, 2016). A laminação de alguns biolaminitos pode indicar mudanças sazonais, como em casos onde lâminas dominadas por *Microcoleus*

(frequentemente associadas com diatomáceas) são depositadas no inverno, enquanto lâminas dominadas por cocóides são depositadas no verão, sob condições de maior salinidade (Warren, 2016).

A alternância entre estruturas laminadas e grumosas (*clotted*) pode acontecer como resultado de diferentes comunidades microbiais, por alteração das condições da água ou turbidez (Dupraz *et al.*, 2006; Myshrall *et al.*, 2010). Simulações computacionais do crescimento de microbialitos indicam que a intercalação de estromatolitos e trombolitos podem ocorrer devido a variação da forma com que os microrganismos obtêm energia e nutrientes (Dupraz *et al.*, 2006). Águas limpas e rasas favorecem comunidades microbiais fototróficas que produzem fábricas laminadas. Em águas turvas e/ou mais profundas, a luz reduz o controle sobre o crescimento dos microrganismos, levando à ocorrência de comunidades quimiotróficas, favorecendo a fábricas grumosas (*clotted*) (Dupraz *et al.*, 2006).

Pelóides também podem ser produtos microbiais, e são muito comuns em microbialitos antigos e recentes, tanto de água doce quanto de ambientes hipersalinos (Flügel, 2004). Pelóides modernos são formados pela degradação heterotrófica do EPS (*extracellular polymeric substances*), que leva à nucleação de micrita devido à substituição progressiva da matriz orgânica (Dupraz *et al.*, 2004). Pelóides podem ocorrer de forma agrupada ou se fundir. Estes agregados ocorrem em associação com cianobactérias, tanto em microbialitos modernos quanto em antigos (Bourillot *et al.*, 2020).

3.2.2. *Diagênese e potencial qualidade como reservatórios*

Vários mecanismos de mineralização foram propostos para as esteiras microbiais em ambientes hipersalinos modernos (Vasconcelos & McKenzie, 1997; Arp *et al.*, 2012; Dupraz *et al.*, 2013). Os carbonatos de cálcio são os minerais biogênicos dominantes em esteiras microbiais (Gerdes *et al.*, 2000). Apesar da alta concentração de Ca^{2+} em muitas águas hipersalinas, a precipitação de carbonato fora das esteiras

microbiais é normalmente rara, ficando dependente das reações de degradação da matéria orgânica por micro-organismos e de reações biogeoquímicas (Gerdes *et al.*, 2000).

O metabolismo das bactérias desempenha um importante papel como modificador do microambiente, produzindo e degradando matéria orgânica extracelular (*extracellular organic matter* – EOM) (Pace *et al.*, 2016). As mudanças químicas induzidas pela atividade microbial podem controlar a nucleação, estrutura e composição dos minerais que são produzidos em esteiras microbiais (Pace *et al.*, 2016).

Um exemplo do controle da atividade microbial na precipitação de carbonatos é a formação de microesferas dolomíticas em bioconstruções microbiais. Microesferas podem se formar através de dois processos (Bourillot *et al.*, 2020). O primeiro é pela precipitação induzida microbialmente, onde culturas de bactérias redutoras de sulfato são capazes de induzir a precipitação de microesferas de 20-30 μm , com composição original de calcita com alto conteúdo de Mg (e.g. lagoas hipersalinas do Brasil) (Van Lith *et al.*, 2003). O segundo processo é através da fossilização de cianobactérias cocóides, encontradas em abundância em lagos hipersalinos do Caribe (Dupraz & Visscher, 2005) e em Great Salt Lake (Pace *et al.*, 2016).

Em microbialitos modernos, as primeiras fases carbonáticas são precipitadas em meses (Pace *et al.*, 2016), são frequentemente metaestáveis e tem baixo potencial de preservação (Bourillot *et al.*, 2020). No Great Salt Lake, a aragonita é precipitada seguindo a degradação do EPS por organismos heterotróficos, formando “manchas” milimétricas que incorporam cianobactérias cocóides (Pace *et al.*, 2016). A aragonita é posteriormente substituída por dolomita durante a eodiagênese, resultando na formação de microesferas de dolomita (Bourillot *et al.*, 2020).

A fotossíntese é uma atividade metabólica chave, que leva à nucleação de carbonatos pela fixação de CO_2 e aumento do pH (Dupraz *et al.*, 2009). A degradação das colônias por outros micróbios também aumenta a alcalinidade nas esteiras, induzindo a precipitação de CaCO_3 (Brigmon *et al.*, 2008). Como resultado, o EPS é

calcificado e serve como substrato para a precipitação físico-química de minerais a partir da água alcalina, permitindo o crescimento dos microbialitos (Brigmon *et al.*, 2008).

A mineralogia dos estromatólitos formados em lagos salinos é tipicamente correspondente à fase carbonática precipitada abioticamente a partir da água do lago, mesmo quando o metabolismo da biota desempenha um importante papel na precipitação dos carbonatos (Warren, 2016). Carbonatos associados a evaporitos tendem a se formar durante os estágios iniciais de evaporação, antes da precipitação de minerais evaporíticos nos estágios mais salinos (Warren, 2016).

O conteúdo dos solutos em águas hipersalinas rasas, especialmente a razão Mg/Ca, flutua de acordo com a salinidade (Warren, 2016). Como o conteúdo de Ca é reduzido pela precipitação precoce de calcita, as águas hipersalinas normalmente mostram uma alta razão Mg/Ca e, portanto, os carbonatos associados a evaporitos tendem a ser dominados por calcita com alto teor de Mg, dolomita, aragonita ou mesmo magnesita (Warren, 2016).

A dissecação e fragmentação de crostas de colônias microbiais pode gerar estruturas em “V” invertido, chamadas de tepees (Warren, 2016). A formação destas feições é comum em carbonatos ou evaporitos sob condições subaéreas em clima árido (Gerdes *et al.*, 2000).

As fácies deposicionais e os processos de dissolução são os controles fundamentais da qualidade de reservatórios em sistemas carbonáticos associados à evaporitos (Warren, 2016). Poros interpartícula, móldicos, vulgares e intercrystalinos (nos dolomitos) são predominantes nesses reservatórios. Fraturas e microporosidade também podem ser localmente importantes (Warren, 2016).

A dolomitização é processo muito comum em carbonatos associados a evaporitos, e pode contribuir para a qualidade dos potenciais reservatórios pela formação de porosidade intercrystalina (Grotzinger & Al-Rawahi, 2014). O processo de dolomitização geralmente não ocorre como um único evento e sim como sucessivas respostas à passagem de fluidos composicionalmente diversos (Warren, 2000).

Warren (2000) revisou e resumiu as características dos principais modelos de dolomitização. Três modelos são sindeposicionais (lacustre - Coorong-style, marinho normal, e árido intermaré - Sabkha-style). Quatro modelos ocorrem em profundidade rasas (refluxo, zona de mistura úmida e árida-úmida e organogênico hemipelágico). Um último modelo ocorre em profundidade (hidrotermal). Desses modelos, dois são diretamente associados com ambientes hipersalinos: refluxo e sabkha (Machel, 2004).

A maior parte da dolomita formada devido à evaporação em ambientes lagunares ou marinhos rasos restritos está relacionada ao modelo de refluxo (Machel, 2004). Nestes ambientes, a água apresenta um gradiente de salinidade que aumenta em direção à costa. Com o aumento da evaporação, a precipitação de CaSO_4 aumenta a razão Mg/Ca da água, que se torna mais concentrada e densa, infiltrando-se nos sedimentos carbonáticos do fundo, e os dolomitizando (Machel, 2004). Os depósitos gerados são geralmente estratiformes, e a dolomita apresenta comumente textura média (10-100 μm ; Warren, 2000).

O modelo de dolomitização em sabkhas também é relacionado com ambientes evaporíticos. Sabkhas costeiras são geradas na porção intermaré-supramaré como superfícies de deflação episodicamente inundadas (Machel, 2004). A dolomita nestes ambientes é formada pelo bombeamento evaporativo (*evaporative pumping*) da água do mar através dos sedimentos para reabastecer o nível freático rebaixado pela intensa evaporação (Machel, 2004). Os depósitos gerados são tipicamente também estratiformes e a dolomita apresenta textura fina (<10 μm ; Warren, 2000).

A dolomita em sela é uma variedade de dolomita que apresenta extinção ondulante, faces e clivagens curvas, devido a sua estrutura cristalina distorcida (Warren, 2000). A ocorrência de dolomita em sela costuma marcar a passagem dos carbonatos pela diagênese de soterramento, comumente em temperaturas entre 60° e 150°C (equivalente à janela do óleo) (Warren, 2000). Frequentemente, a dolomita em sela é um subproduto da compactação química e da redução térmica de sulfato,

relacionada tipicamente ao fluxo de fluidos baciais hipersalinos em altas temperaturas, que podem também transportar metais básicos (Warren, 2000).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos adotados neste estudo compreenderam: revisão bibliográfica, petrografia quantitativa, aquisição fotomicrográfica, microscopia eletrônica de varredura, e integração dos dados e resultados obtidos.

4.1. Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico compreendeu a compilação de artigos e dados sobre: 1) a Bacia de Sergipe-Alagoas, com ênfase na Formação Muribeca, uma vez que existem poucos estudos publicados sobre o Membro Oiteirinhos; b) a mistura de sedimentos carbonáticos e clásticos, e sua influência na diagênese e qualidade de reservatórios; c) depósitos microbiais associados a evaporitos. As revisões forneceram importantes subsídios para a interpretação dos resultados obtidos no estudo.

4.2. Petrografia quantitativa

Foram descritas 69 lâminas delgadas de cinco poços testemunhados. As análises petrográficas foram realizadas sistematicamente com auxílio de microscópios de luz polarizada e do software Petroledge© (De Ros & Goldberg, 2007).

As lâminas foram preparadas de amostras impregnadas com resina epoxy azul para facilitar a observação da porosidade. Foi realizado o tingimento das lâminas utilizando solução de Alizarina-S e ferrocianeto de potássio, com o objetivo de identificar a composição dos carbonatos (Tucker, 1988).

A quantificação dos constituintes primários, diagenéticos e da porosidade foi realizada de acordo com o método Gazzi-Dickinson (Zuffa, 1985). O método consiste na contagem como constituintes separados de grãos ou cristais maiores que silte (> 0,0625 mm) inseridos em fragmentos de rocha, identificando sua composição e localização. Somente fragmentos líticos de textura fina são contados como tal (por exemplo, rochas vulcânicas afaníticas, cherts, rochas metamórficas de baixo grau, pelitos, rochas carbonáticas; Fig. 5). O método Gazzi–Dickinson, por assumir que componentes policristalinos serão desagregados em seus grãos constituintes ao longo do transporte, fornece um melhor agrupamento dos dados obtidos a partir de arenitos de diversos tamanhos de grãos e coloca ênfase na proveniência (Johnsson, 1993).

A quantificação modal foi executada através do registro de 300 pontos por lâmina, distribuídos de forma regular ao longo de transectas transversais à estrutura e fábrica deposicional. Para a contagem modal foi utilizado microscópio petrográfico com *charriot* acoplado, que permite controlar a distância dos pontos em intervalos regulares.

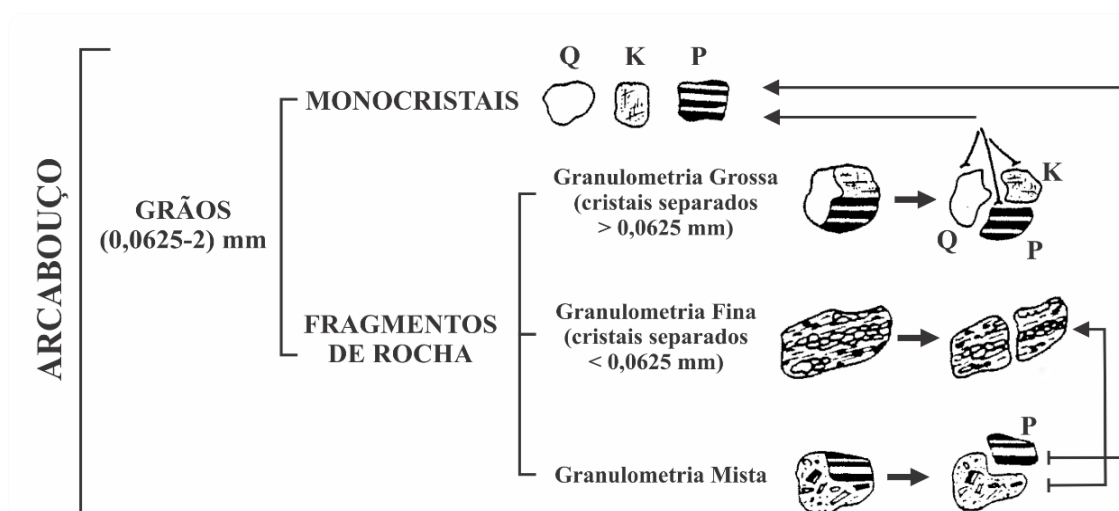


Figura 5. Fluxograma do método Gazzi-Dickinson de separação dos constituintes primários (adaptado de Zuffa, 1985).

As amostras foram classificadas em siliciclásticas, híbridas ou carbonáticas segundo uma classificação de alta hierarquia, baseada nos conceitos de Zuffa (1980). Posteriormente, as rochas siliciclásticas foram classificadas de acordo com Folk (1980), e as rochas carbonáticas de acordo com Embry & Klovan (1971; mod. Dunham, 1962).

4.3. Fotomicrografia

O registro fotomicrográfico das principais feições petrográficas primárias e diagenéticas foi realizado utilizando um microscópio Zeiss AXIO Imager A2 com câmera digital acoplada, utilizando o software ZEN™. Foram sistematicamente registradas as principais feições texturais, composicionais, diagenéticas e tipos de poros de todas as lâminas, com o objetivo de armazenar dados ilustrativos das características descritas.

4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada como ferramenta complementar em algumas lâminas petrográficas com minerais, hábitos, características ou relações paragenéticas de difícil reconhecimento e interpretação através da microscopia ótica. Este método é amplamente utilizado na petrologia sedimentar, principalmente para caracterização de constituintes diagenéticos devido à sua resolução de 20 a 50 Å. A análise foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul no Microscópio Eletrônico da marca JEOL JSM-6610LV com EDS (Energy Dispersive Spectrometer) Bruker acoplado.

Para realizar a análise, a superfície da amostra deve ser coberta por um material condutivo, como o carbono, para que ocorra a condução dos elétrons pela superfície. A amostra é então colocada sob vácuo para análise. A imagem formada

pela varredura eletrônica pode apresentar diferentes características, de acordo com os sinais emitidos pela amostra.

Os elétrons Secundários (*secondary electron*; SE) resultam da interação do feixe eletrônico com a superfície da amostra. Estes elétrons são de baixa energia (<50eV), e formam imagens tridimensionais com alta resolução (3-5 nm). O contraste de tonalidade na imagem é dado principalmente pelo relevo da amostra.

O sinal de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons*; BSE) é resultante das interações ocorridas mais para o interior da amostra e proveniente de uma região do volume de interação abrangendo um diâmetro maior do que o diâmetro do feixe primário. A imagem gerada por esses elétrons fornece informações sobre a composição da amostra, com o contraste de tonalidade sendo função do número atômico dos elementos presentes.

A espectrometria da energia dispersada (EDS) é utilizada acoplada ao MEV para determinar semi-quantitativamente a distribuição de elementos químicos na amostra. O feixe eletrônico promove liberação de energia em forma de raio-X específicos liberados pela excitação de elétrons dos elementos dos minerais, que migram para camadas mais externas ou são arrancados, criando um espaço preenchido por elétrons de camadas mais externas.

4.5. Integração dos dados

A integração dos dados foi etapa fundamental para caracterização faciológica e petrográfica do Membro Oiteirinhos, e envolveu a geração de perfis combinando informações e dados estratigráficos, sedimentológicos, geofísicos e petrográficos dos testemunhos, com as descrições petrográficas quantitativas, documentação fotomicrográfica das principais feições e definição de fácies e associações de fácies deposicionais.

5. ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Sergipe-Alagoas localiza-se na margem nordeste brasileira, entre os paralelos 9° e 11° 30' S (Fig. 6). A bacia é limitada a nordeste pelo alto de Maragogi com a Bacia de Pernambuco-Parnaíba, e a sudeste com a Bacia do Jacuípe pelo sistema de falhas Vaza-Barris (Mohriak, 2003). Trata-se de uma bacia de margem passiva e sua formação está relacionada à abertura do oceano Atlântico Sul no Mesozóico (Araújo *et al.*, 2009).

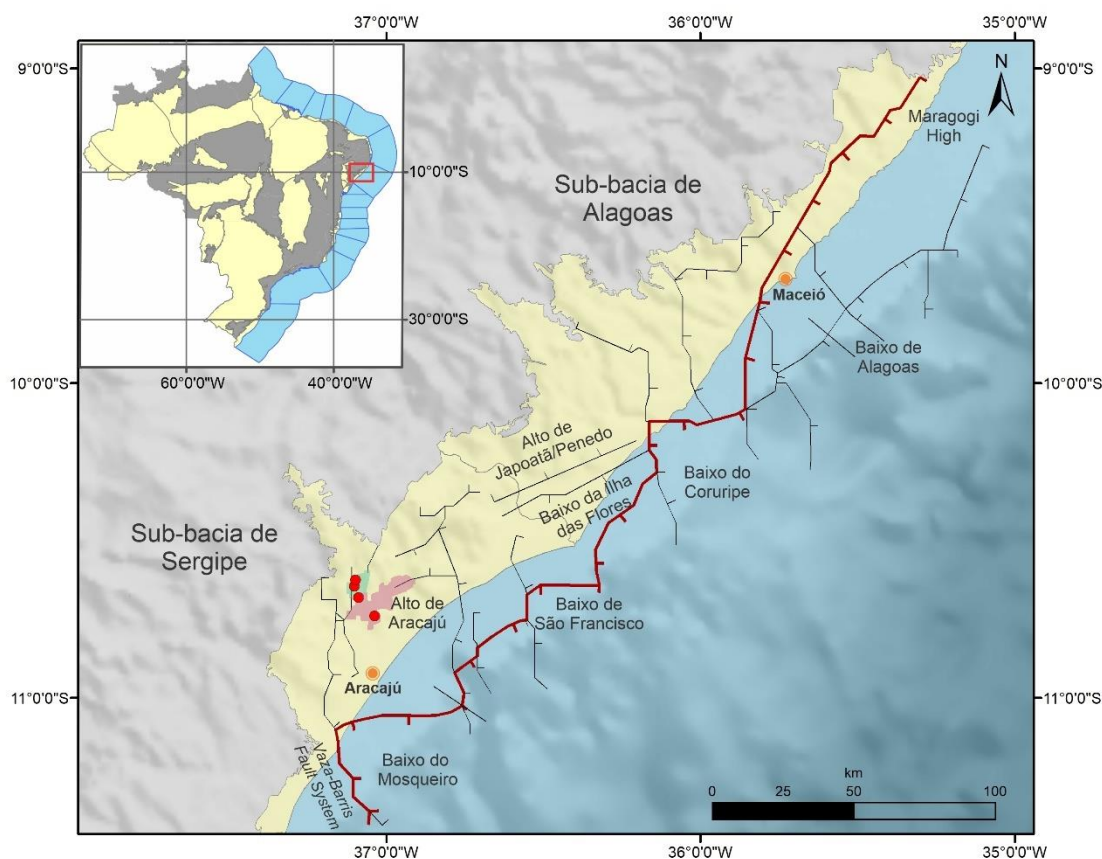


Figura 6. Mapa de localização da Bacia de Sergipe -Alagoas com os poços estudados posicionados (pontos vermelhos). Três poços localizam-se no campo de Sirizinho (em verde) e outro poço está inserido no campo de Carmópolis (em rosa). Falhas estão desenhadas em preto e a linha de Charneira em vermelho.

Alagoas está em vermelho. Estruturas foram definidas por Falkenhein *et al.*, (1986) e Van Der Ven *et al.* (1989).

5.1. Evolução Tectônica e Litoestratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas

O registro sedimentar da Bacia de Sergipe-Alagoas é um dos mais completos dentre as bacias de margem leste a sudeste (Cruz, 2008), com registro sedimentar dos estágios de Sinéclise Paleozóica, Pré-rifte, Rifte, Transicional e Drifte (Mohriak, 2003).

O preenchimento sedimentar da bacia foi controlado pelas fases tectônicas que originaram e modificaram a bacia. Grandes falhas limitam blocos ou compartimentos tectônicos que evoluíram de forma distinta, o que resultou em uma distribuição complexa das unidades crono e litoestratigráficas (Aquino & Lana, 1990).

Em função do arcabouço tectono-estratigráfico, e do diacronismo nos eventos de erosão e deposição que ocorreram nos estágios evolutivos da Bacia de Sergipe-Alagoas, ela é dividida nas sub-bacias de Sergipe e de Alagoas (Campos Neto *et al.*, 2007) (Figs. 7 e 8). No entanto, tendo em vista que o Alto de Japoatã-Penedo não caracteriza um divisor de águas e ocorre limitado apenas na porção emersa e de águas rasas da bacia, ela é considerada uma única bacia (Campos Neto *et al.*, 2007).

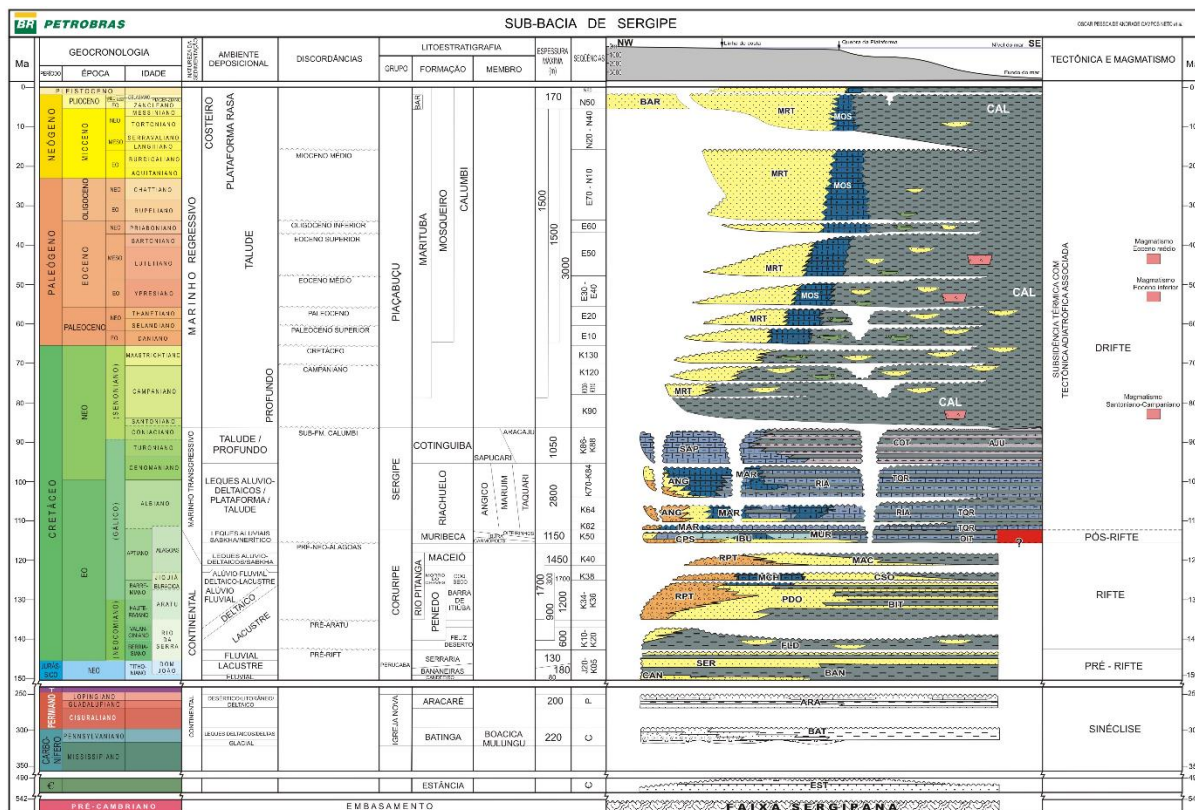


Figura 7. Carta cronoestratigráfica da Sub-Bacia de Sergipe (extraído de Campos Neto *et al.*, 2007).

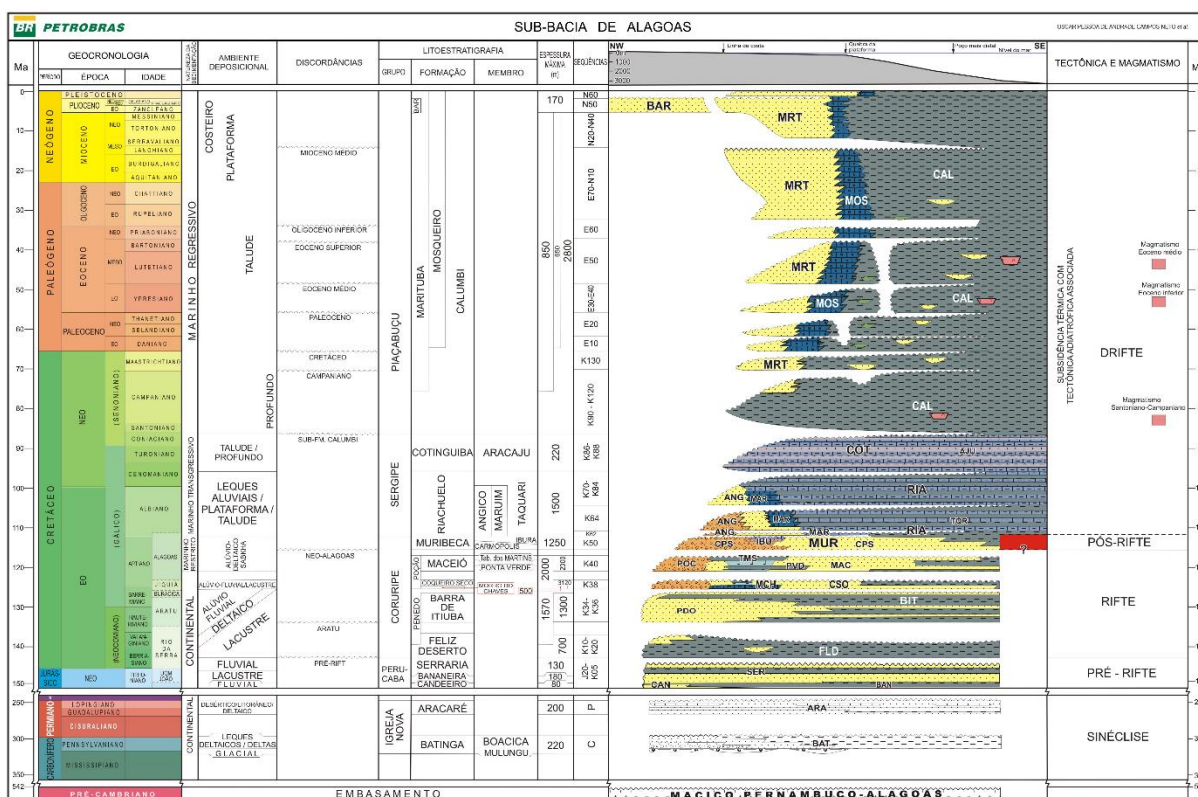


Figura 8. Carta cronoestratigráfica da Sub-Bacia de Alagoas (extraído de Campos Neto *et al.*, 2007).

O embasamento cristalino é distinto nas sub-bacias. Na Sub-bacia de Sergipe, o embasamento é constituído pelas rochas metamórficas de baixo grau dos grupos Miaba e Vaza-Barris e pelos metassedimentos da Formação Estância (Campos Neto *et al.*, 2007). O embasamento da Sub-bacia de Alagoas é formado pelas rochas graníticas proterozóicas, do maciço Pernambuco-Alagoas (Campos Neto *et al.*, 2007).

O preenchimento sedimentar da Bacia de Sergipe-Alagoas é formado por vinte e três seqüências deposicionais. As seqüências se correlacionam com os estágios evolutivos das bacias da margem leste brasileira, que culminaram com a formação do Atlântico Sul: sinéclise; pré-rifte; rifte e margem passiva/drifte (Campos Neto *et al.*, 2007).

5.1.1. Sinéclise

No estágio de sinéclise paleozóica ocorreu deposição em extensas áreas do continente Gondwana sob condições intracratônicas (Campos Neto *et al.*, 2007). Durante o Carbonífero foi depositada a Formação Batinga com conglomerados, diamictitos, siltitos e folhelhos sob condições de ambiente glacial subaquoso, com padrão predominantemente transgressivo. No Permiano ocorreu a deposição da Formação Aracaré em ambiente costeiro, com influência de tempestades e retrabalhamento eólico (Feijó, 1994).

5.1.2. Supersequência Pré-rifte

A fase Pré-rifte é caracterizada por estabilidade tectônica. Nesta fase depositaram os folhelhos vermelhos lacustres da Formação Bananeiras e os arenitos flúvio-deltaicos da Formação Candeeiro (Campos Neto *et al.*, 2007). A Formação Candeeiro é sobreposta em discordância com as rochas paleozoicas ou com o embasamento e é sotoposta concordantemente com a Formação Bananeiras (Feijó, 1994). Por fim, sistemas fluviais preencheram a ampla bacia com arenitos da Formação Serraria (Aquino & Lana, 1990; Campos Neto *et al.*, 2007).

5.1.3. Supersequência Rifte

Esta fase é marcada por intenso falhamento, os quais subdividem a bacia em compartimentos tectônicos (Aquino & Lana, 1990). A principal sistema de falhamentos tem direção norte-sul, interceptados por falhas de direção leste-oeste, gerando grábens e escalonados *en échelon*, antitéticos e paralelos entre si, que dão à bacia uma direção geral NE-SW (Van Der Ven *et al.*, 1989).

Pelo menos dois regimes tectônicos atuaram na bacia, pressupostos pela complexidade da deformação (Aquino & Lana, 1990). Na última revisão estratigráfica

da bacia, Campos Neto *et al.* (2007) admite que o início do rifte se deu durante o começo do Andar Rio da Serra (142 Ma), com a deposição em um sistema lacustre-deltaico da Formação Feliz Deserto.

Na revisão de Campos Neto *et al.* (2007), considera-se que o registro desta fase se inicia com a deposição da Formação Feliz Deserto em ambiente lacustre-deltaico. O lago da Formação Feliz Deserto apresenta características distintas do lago que depositou a Formação Bananeiras, relacionadas a um aumento na taxa de subsidência. Esse evento foi síncrono nas bacias do Recôncavo e Tucano, porém com menor tectonismo na Bacia de Sergipe-Alagoas (Campos Neto *et al.*, 2007). A discordância pré-Aratu separa estes depósitos dos folhelhos da Formação Barra de Itiúba, formada por pelitos lacustres com raros corpos arenosos intercalados (Van Der Ven *et al.*, 1989). Depósitos alúvio-fluviais eram restritos às bordas das sub-bacias, correspondentes aos conglomerados da Formação Rio Pitanga e aos arenitos da Formações Penedo (Campos Neto *et al.*, 2007).

A deposição do Folhelho Buracica marca o nível máximo do lago (Campos Neto *et al.*, 2007). Durante o primeiro pulso tectônico, o lago foi preenchido pelos sedimentos das formações Rio Pitanga e Penedo. Acima destes depósitos ocorrem os carbonatos da Formação Morro do Chaves e clásticos terrígenos flúvio-deltaicos da Formação Coqueiro Seco (Van Der Ven *et al.*, 1989). A porção intermediária da Formação Coqueiro Seco marca um evento transgressivo, localizado no horizonte de evaporitos de idade Neojiquiá (Campos Neto *et al.*, 2007).

A deposição durante o segundo pulso tectônico foi marcada pela ocorrência de arenitos, folhelhos, evaporitos e calcilitos da Formação Maceió. Conglomerados e arenitos de leques deltaicos, turbiditos arenosos e folhelhos marcam tratos transgressivos, resultantes de fluxos gravitacionais que ocorreram em períodos de clima úmido, e quanto em períodos de clima árido, a sedimentação era predominantemente de folhelhos e calcilitos algálicos, e em período de máxima aridez ocorria a deposição dos evaporitos “Paripueira” (Campos Neto *et al.*, 2007).

Grandes falhas associadas ao estágio rifte da bacia geraram uma série complexa de compartimentos tectônicos (Aquino & Lana, 1990). Os altos estruturais da bacia também foram estabelecidos durante o estágio Rifte, e o campo de óleo de Carmópolis é localizado em um destes altos: o Alto de Aracajú (Aquino & Lana, 1990). As armadilhas são principalmente estruturais, controladas por falhas que limitam o bloco a leste e a oeste; e componentes estratigráficos contribuindo para o fechamento da acumulação (Aquino & Lana, 1990).

É admitido que o término desta fase tenha ocorrido no Eoalagoas (116 Ma), quando o tectonismo foi bastante intenso e delineou-se a linha de charneira (Campos Neto *et al.*, 2007). Após o intenso tectonismo, uma discordância expressiva ocorreu em toda bacia, denominado de discordância pré-Neo-Alagoas (Campos Neto *et al.*, 2007). Esse evento erosivo também aconteceu nas bacias de Camamu, Almada, Espírito Santo, Campos e Santos, onde limita também o final do estágio rifte (Dias, 2005).

5.1.4. *Supersequência Transicional ou Pós-rifte*

Com o início da subsidência térmica, ocorreu basculamento da bacia para sudeste, levando à primeira grande incursão marinha (Campos Neto *et al.*, 2007). Esta fase registra a passagem dos ambientes continentais para marinhos sob severas condições de aridez. Feijó (1994) considera que nesta fase instalou-se a Linha de Charneira Alagoas, com direção NE, limitando duas províncias estruturais: a NW, onde houve maior estabilidade tectônica e depositou-se a Formação Muribeca e a SE, onde ocorreu pronunciada subsidência, com a formação de leques aluviais da Formação Maceió, intercalados por folhelhos e halita. Campos Neto *et al.* (2007) considera que esses intervalos pertencem às formações Muribeca e Riachuelo, respectivamente.

A Formação Muribeca é composta pelos depósitos siliciclásticos grossos do Membro Carmópolis; evaporitos, carbonatos microbiais e folhelhos do Membro Ibura

e intercalação de arenitos, rochas híbridas e carbonatos do Membro Oiteirinhos. A sequência de deposição da Formação Muribeca apresenta aspectos progressivamente menos restritos, evoluindo de ambientes siliciclásticos alúvio-fluviais e deltaicos para a deposição de evaporitos, carbonatos microbiais e folhelho (Campos Neto *et al.*, 2007).

5.1.5. Supersequência Drifte

A Supersequência Drifte compreende dois intervalos, um basal transgressivo e outro superior regressivo. Durante a subida do nível do mar estabeleceram-se condições marinhas, onde ocorreu a deposição da Formação Riachuelo (Koutsoukos, 1989). A Formação Riachuelo compreende principalmente rochas carbonáticas e rochas siliciclásticas grossas do Membro Angico (Campos Neto *et al.*, 2007). Em áreas com menor aporte sedimentar desenvolveu-se uma rampa carbonática com oólitos e oncólitos do Membro Maruim. Nas lagunas e no talude ocorria a deposição dos calcilitos e folhelhos do Membro Taquari (Falcone, 2006).

O ápice do evento transgressivo formou a rampa carbonática da Formação Cotinguiba (Koutsoukos, 1989). Os depósitos proximais da rampa correspondem aos calcilitos do Membro Sapucarí, e os depósitos de talude e bacia correspondem aos folhelhos, margas e calcilitos do Membro Aracajú (Campos Neto *et al.*, 2007).

Durante o posterior rebaixamento do nível do mar, houve a erosão das sequências subjacentes (Campos Neto *et al.*, 2007). Este evento erosivo regional é denominado como discordância Sub-formação Calumbi (Campos Neto *et al.*, 2007). No próximo evento transgressivo, a sedimentação mudou para siliciclástica com a deposição dos folhelhos e arenitos da Formação Calumbi. Com o aumento do aporte sedimentar, iniciou uma nova progradação, com a deposição das áreas costeiras e plataformais da Formação Marituba, enquanto nas porções distais permanecia a deposição da Formação Calumbi. Seguindo a progradação, na borda da Formação

Marituba foram acumulados os calcarenitos bioclásticos da Formação Mosqueiro (Feijó, 1994).

No Oligoceno, ocorreu uma subida do nível do mar com deposição em padrão agradacional (Campos Neto *et al.*, 2007). No Plioceno, outro evento regressivo depositou os sedimentos costeiros da Formação Barreiras na porção terrestre da bacia. O limite superior são os sedimentos atuais do fundo marinho (Campos Neto *et al.*, 2007).

5.2. Formação Muribeca

A Formação Muribeca corresponde é formada pelos depósitos do Aptiano Superior na Bacia de Sergipe-Alagoas, e sobrepõe-se em discordância com o embasamento ou com as unidades mais antigas (Feijó, 1994). A Discordância pré-Alagoas peneplanizou a topografia pré-existente durante uma intensa fase erosiva. Sobre a superfície de discordância, foram depositados os conglomerados do Membro Carmópolis, seguidos pelos depósitos microbiais e evaporíticos do Membro Ibura, e por fim, os depósitos carbonáticos, híbridos e siliciclásticos do Membro Oiteirinhos. O contato superior da unidade é por discordância local em Sergipe, onde a unidade é coberta pelos folhelhos marinhos da Formação Riachuelo, e nitidamente discordante em Alagoas (Schaller, 1969).

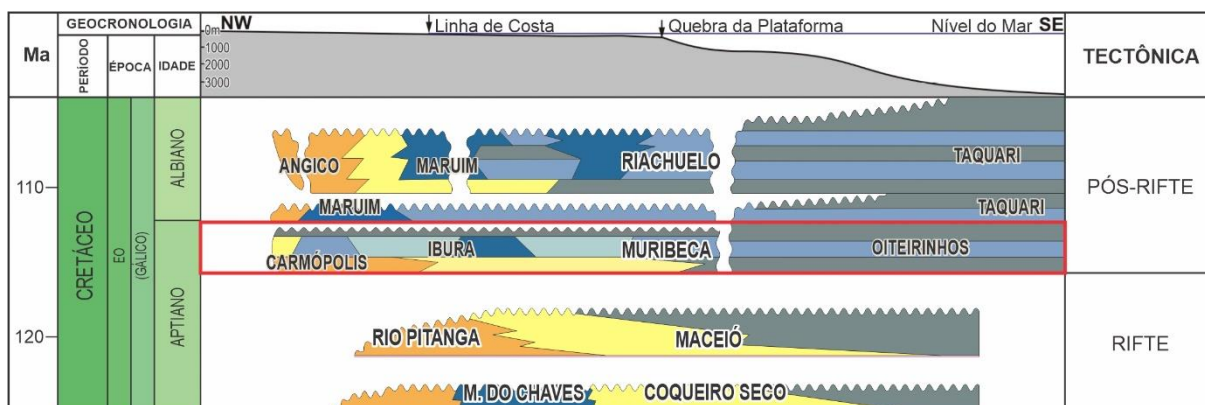


Figura 9. Carta cronoestratigráfica da seção Aptiana e Albiana da sub-bacia de Sergipe (adaptado de Campos Neto *et al.* 2007).

O termo Muribeca, foi primeiramente denominado por Bender (1957, *apud* Schaller, 1969) para caracterizar os sedimentos aflorantes próximos à cidade de Sergipe. Schaller (1969) caracterizou a Formação Muribeca como uma unidade de subsuperfície constituída pela intercalação de folhelhos betuminosos, calcários laminados, evaporitos, arenitos e conglomerado e a subdividiu em 5 unidades: membros Maceió, Tabuleiro dos Martins, Carmópolis, Ibura e Oiteirinhos.

Feijó (1994) separa o Membro Maceió da Formação Muribeca, o qual é elevado para a categoria de Formação Maceió. A denominação de Formação Muribeca fica reservada para os depósitos clásticos grossos, evaporíticos e carbonáticos de baixa energia presentes no bloco alto da Linha de Charneira Alagoas da sub-bacia de Sergipe (Feijó, 1994). Com isso, passa a ser subdividida em três membros: Carmópolis, Ibura e Oiteirinhos. Nas revisões de Souza-Lima *et al.* (2002) e Campos Neto *et al.* (2007), foi mantida a subdivisão proposta por Feijó (1994).

Koutsoukos *et al.* (1991) reporta as primeiras ocorrências de elementos da microfauna marinha durante o final do Aptiano. Isto sugere que o final da deposição da Formação Muribeca, os ambientes de deposição estariam relacionados à extensas planícies de maré ou marinho raso, em ambiente costeiro hipersalino com a influência de condições marinhas abertas. A natureza cíclica das mudanças no nível do mar durante os estágios marinhos iniciais também é verificada pela mudança na fauna,

indicada por ocasionais níveis com espécies de micropelecípodes e micrograstrópodes e sem foraminíferos e equinóides (Koutsoukos *et al.*, 1991). Microfauna característica de ambiente lagunar também é observada durante o Aptiano superior. A comum ocorrência de oóides nestes depósitos sugere a existência de barreiras oolíticas (*oolite shoals*).

5.2.1. Membro Oiteirinhos

O Membro Oiteirinhos foi depositado durante os estágios finais da fase transicional da bacia, entre o final do Aptiano e início do Albiano. Neste período na sub-bacia de Sergipe foi estabelecido um sistema de plataforma mista carbonática-siliciclástica. Feijó (1980) subdivide a formação Muribeca em oito intervalos deposicionais (Tab. 1), no qual o Membro Oiteirinhos representa os intervalos IIIb, IIIa, II e a parte inferior do intervalo I.

O Intervalo IIIb é formado por carbonatos, folhelhos e arenitos finos depositados em ambiente lagunar aberto. O intervalo IIIa é caracterizado pela feição chamada de "dois picos" observada no perfil de raio gama. Este marcador é relacionado com dois eventos de deposição de anidrita (Carvalho *et al.*, 2006a). No intervalo II ocorre a deposição de sedimentos finos nas porções mais fundas da laguna, favorecidos pela rápida subsidência. Na porção superior do intervalo II são identificadas *ripples*, indicando condições progressivamente mais rasas. O intervalo I inicia com Membro Oiteirinhos e continua com o Membro Taquari, da Formação Riachuelo. No intervalo I, amonóides, equinodermos, e foraminíferos bentônicos e planctônicos foram depositados sob condições de mar aberto. Apesar da grande variação litológica do intervalo que corresponde ao Membro Oiteirinhos, a predominância de depósitos finos, como calcilutitos e lamitos, indica uma tendência transgressiva.

Tabela 1. Ambientes deposicionais da Formação Muribeca (adaptado de Feijó, 1980).

<i>Intervalo</i>	<i>Litologia</i>	<i>Ambiente Depositional</i>	<i>Principais Características</i>
I	Intercalação de folhelhos e calcilutitos maciços	Marinho Aberto	Fósseis Marinhos
II	Siltitos, arenitos finos intercalados com folhelhos e calcilutitos laminados	Lagunar ligeiramente mais profundo	Forte subsidência com aumento do nível do mar
IIIa	Calcilutitos laminados intercalados com folhelhos, calcilutitos maciços, anidrita nodular	Lagunar aberto	Dois eventos de intensa anidritização (marcador "dois picos")
IIIb	Calcilutitos laminados, siltitos, arenitos finos	Lagunar aberto	"Anidrita principal" da Formação Muribeca
IVa	Calcilutitos laminados-maciços, intenso crescimento de nódulos de anidrita	Planície Costeira	
IVb	Calcilutitos maciços; anidrita nodular	Lagunar raso	
IVc	Calcilutitos laminados, folhelhos	Lagunar raso	
IVd	Calcilutitos laminados, folhelhos, anidritas, halitas	Lagunar raso	Primeira deposição de sal no Atlântico

A transição de uma lagoa salina para um ambiente marinho aberto é observada em dados de palinofácies (Carvalho *et al.*, 2006b). As palinofácies são fundamentais no reconhecimento do ambiente deposicional nos estágios de transição e de mar aberto da Formação Muribeca. Estas duas fases (transicional e mar aberto) são subdivididas em seis eventos ou ambientes deposicionais que foram controlados pelas mudanças do nível do mar (Carvalho *et al.*, 2006b). A análise de palinofácies permitiu uma reconstrução ambiental detalhada da sucessão transicional e de mar aberto, reconhecendo uma tendência transgressiva de longa duração. A deposição do Membro Oiteirinhos ocorreu ambiente de planície costeira lagunar (Carvalho *et al.*, 2006b).

6. SÍNTESE DOS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

- O estudo integrado dos dados estratigráficos, sedimentológicos, geofísicos e petrográficos do Membro Oiteirinhos, Formação Muribeca (Aptiano) da Bacia

de Sergipe-Alagoas, permitiu identificar uma ampla variedade de rochas sedimentares.

- As rochas carbonáticas são representadas por brechas de colapso, bioconstruções microbiais, doloespatitos, calcilutitos, calcissiltitos, calcarenitos e calcirruditos.
- Diversas texturas são identificadas nas rochas de composição híbrida siliciclástica-carbonática. Margas, heterolitos formados pela intercalação de margas e calcilutitos e/ou lamitos, arenitos híbridos, arenitos siliciclásticos com pseudomatriz micrítica e conglomerados carbonáticos intraclásticos com lama siliciclástica são descritos na unidade.
- As rochas carbonáticas e híbridas particuladas são principalmente constituídas de intraclastos microbiais, micríticos e de areia carbonática, oóides, pelóides, oncóides e bioclastos de ostracode, equinodermos e foraminíferos.
- Micro-organismos esféricos, com parede celular calcítica e preenchidos por dolomita, ocorrem inseridos nas bioconstruções carbonáticas. Possivelmente são bactérias trapeadas pela bioconstrução microbial durante seu desenvolvimento.
- Folhelhos, lamitos, e arenitos representam os depósitos siliciclásticos. Os arenitos têm composição predominantemente feldspática-lítica (litarenitos feldspáticos e arcóseos líticos *sensu* Folk, 1980), ricos em fragmentos metassedimentares da erosão dos terrenos orogênicos supracrustais do Proterozóico Superior.
- Os ambientes deposicionais se relacionam à transição de um complexo lacustre-lagunar até o estabelecimento de condições marinhas costeiras sob condições áridas. Na base da unidade predominam depósitos heterolíticos, margas e bioconstruções microbiais, intercalados com camadas de anidrita nodular e brechas carbonáticas. Esta associação de rochas indica condições deposicionais com circulação restrita e influenciada por um clima árido. A

passagem para condições menos restritas é marcada pela ocorrência de arenitos híbridos.

- Na porção superior, a deposição de calcarenitos peloidais e bioclásticos com foraminíferos bentônicos pode ter ocorrido já durante o estabelecimento das condições marinhas, como é interpretado para o topo da unidade.
- Os principais processos diagenéticos ocorreram em condições próximas à superfície, sob a influência de ambientes evaporíticos, continentais e marinhos rasos.
- A dolomita foi o principal produto diagenético, substituindo e cimentando grande parte das rochas, sejam elas siliciclásticas, híbridas ou carbonáticas. Essa dolomitização pode estar relacionada com a eodiagenese em ambientes evaporíticos.
- Outros constituintes diagenéticos são importantes na unidade, mesmo que de ocorrência local. A diagênese próxima à superfície foi responsável pela formação da anidrita nodular que desloca depósitos lamosos e cimenta conglomerados intraclásticos. Cutículas de argilas esmectíticas foram infiltradas mecanicamente devido a inundações episódicas. Nos arenitos sem argilominerais infiltrados, ocorrem crescimentos de K-feldspato ou franjas de calcita prismática. Analcima, barita e calcedônia ocorrem localmente preenchendo a porosidade intergranular.
- Na diagênese de soterramento, os principais produtos foram dolomita em sela, pirita de textura grossa e quartzo preenchendo porosidade intergranular, de fraturas e porosidade de dissolução.
- A porosidade petrográfica é similar entre os arenitos siliciclásticos e híbridos. No entanto, a porosidade dos arenitos híbridos apresenta uma leve vantagem devido à dissolução de partículas carbonáticas e feldspatos.
- Os arenitos siliciclásticos e híbridos com textura média representam as rochas com melhor potencial para constituir reservatórios de hidrocarbonatos, com

porosidade petrográfica de até 18%. Estes arenitos são cimentados por dolomita blocosa, que pode ocupar parte do espaço intergranular e expandir micas. Além da dolomita, crescimentos de K-feldspato e cutículas de argilominerais infiltrados podem afetar localmente a permeabilidade.

- As fácies e produtos diagenéticos indicam que as condições ambientais foram progressivamente menos evaporíticas durante a deposição do Membro Oiteirinhos. A anidrita ocorre principalmente na transição entre os membros Ibura e Oiteirinhos, seguido por depósitos carbonáticos, híbridos e siliciclásticos e carbonatos marinhos no topo da sucessão.
- A variação litológica observada no Membro Oiteirinhos implica rápidas e frequentes mudanças no ambiente deposicional influenciadas pelo clima durante o estabelecimento das condições marinhas na abertura da margem atlântica sul.

7. CONCLUSÃO

O Membro Oiteirinhos é caracterizado por uma grande diversidade de rochas sedimentares, e apresenta uma variação deposicional e diagenética muito mais diversa do que anteriormente descrita para a unidade, o que a torna uma unidade de importante relevância científica para a compreensão dos estágios iniciais da abertura do oceano Atlântico Sul. Os tipos litológicos descritos na unidade compreendem conglomerados intraclásticos anidritizados, microbialitos; rochas híbridas (margas, arenitos híbridos, arenitos siliciclásticos grossos com pseudomatriz micrítica e conglomerados carbonáticos com matriz siliciclástica); folhelhos, lamitos, arenitos, calcissiltitos, calcarenitos e calcirruditos. Os principais processos diagenéticos aconteceram próximo à superfície, influenciadas por condições evaporíticas, continentais e marinhas. A dolomita foi o principal produto diagenético, ocorrendo como preenchimento intergranular e substituindo a maioria das rochas. Essa grande

variação implica em mudanças rápidas e frequentes do ambiente deposicional, principalmente influenciada pelo clima.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino, G.D., & Lana, M.D.C. 1990. Exploração na Bacia de Sergipe-Alagoas: O “estado da arte”. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 4: 75-84.
- Araújo, C.S. de, Moretti Júnior, P.A., Madrucci, V., Carramal, N.G., Toczeck, A., & Almeida, A.B. 2009. Carbonatos aptianos do Campo de Carmópolis, Bacia de Sergipe-Alagoas: estratigrafia e modelo deposicional. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 17(2): 311-330.
- Arp, G., Helms, G., Karlinska, K., Schumann, G., Reimer, A., Reitner, J., Trichet, J. 2012. Photosynthesis versus Exopolymer Degradation in the Formation of Microbialites on the Atoll of Kiritimati, Republic of Kiribati, Central Pacific. *Geomicrobiology Journal*, 29(1): 29–65.
- Bender, F. 1957. *Geology of Sergipe Basin*. Rio de Janeiro, Petrobras, DEPEX. Divisão Regional de Exploração. Relatório, 69p.
- Bjørkum, P.A., Walderhaug, O. 1990. Geometrical arrangement of calcite cementation within shallow marine sandstones. *Earth Sciences Reviews*, 29(1-4): 145–161.
- Bonnell, B., Hurich, C. 2008. Characterization of Reservoir Heterogeneity: An Investigation of the Role of Cross-Well Reflection Data. *Oficial publication of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*, 33(2): 31–37.
- Bourillot, R., Vennin, E., Dupraz, C., Pace, A., Foubert, A., Rouchy, J.M., Patrier, P., Blanc, P., Bernard, D., Lesseur, J., Visscher, P.T. 2020. The Record of Environmental and Microbial Signatures in Ancient Microbialites: The Terminal Carbonate Complex from the Neogene Basins of Southeastern Spain. *Minerals* 10(3): 1–50.
- Brigmon, R.L., Morris, P., Smith, G. 2008. Evaporite Microbial Films, Mats, Microbialites and Stromatolites. In: Dilek, Y., Furnes, H., Muehlenbachs, K. (Eds.). *Links Between Geological Processes, Microbial Activities & Evolution of Life*. Springer Netherlands, Aiken, USA, p. 197–235.
- Burne, R. V., Moore, L. S. 1987. Microbialites: Organosedimentary Deposits of Benthic Microbial Communities. *Palaios*, 2(3): 241–254.
- Caetano-Filho, S., Dias-Brito, D., Rodrigues, R., Azevedo, R.L.M. 2017. Carbonate microfacies and chemostratigraphy of a late Aptian–early Albian marine distal section from the primitive South Atlantic (SE Brazilian continental margin): Record of global ocean-climate changes?. *Cretaceous Research*, 74: 23–44.

- Campos Neto, O.P. de A., Souza Lima, W., Gomes Cruz, F.E. 2007. Bacia de Sergipe-Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 405–415.
- Carvalho, Marcelo de Araújo, Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R. 2006a. Paleoenvironmental reconstruction based on palynofacies analysis of the Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Northeastern Brazil. *Marine Micropaleontology*, 59(1): 56–81.
- Carvalho, Marcelo de Araujo, Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R. 2006b. Palynofacies and sequence stratigraphy of the Aptian-Albian of the Sergipe Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 192(1-2): 57–74.
- Chiarella, D., Longhitano, S.G., Tropeano, M. 2017. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 617–627.
- Cruz, L.R. 2008. *Caracterização tectono-estratigráfica da sequência transicional na sub-bacia de Sergipe*. Natal, 169p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- D'Agostini, D.P., Bastos, A.C., Dos Reis, A.T., 2015. The modern mixed carbonate-siliciclastic abrolhos shelf: Implications for a mixed depositional model. *Journal of Sedimentary Research*, 85(2): 124–139.
- De Ros, L.F. & Goldberg, K. 2007. Reservoir Petrofacies: A Tool for Quality Characterization and Prediction. *In: AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California. Expanded Abstracts*, p. 33-33.
- De Ros, L.F. 1996. *Compositional Controls on Sandstones Diagenesis*, 24p. Tese de Doutorado, Institute of Earth Sciences, Uppsala University.
- Decima, A., McKenzie, J.A., Schreiber, B.C. 1988. The origin of “evaporative” limestones: an example from the Messinian of Sicily (Italy). *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(2): 256–272.
- Dias, J.L. 2005. Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 13(1): 7–25.
- Dolan, J.F. 1989. Eustatic and Tectonic Controls on Deposition of Hybrid Siliciclastic/Carbonate Basinal Cycles: Discussion with Examples. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73(10): 1233–1246.
- Dorsey, R.J., Kidwell, S.M. 1999. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation on a

- tectonically active margin: Example from the Pliocene of Baja California Sur, Mexico. *Geology*, 27(10): 935–938.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture, *In*: Ham, W.E. (Ed.). *Classification of Carbonate Rocks*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa, p. 108–121.
- Dupraz, C., Fowler, A., Tobias, C., Visscher, P.T. 2013. Stromatolitic knobs in Storr's Lake (San Salvador, Bahamas): A model system for formation and alteration of laminae. *Geobiology*, 11: 527–548.
- Dupraz, C., Reid, R.P., Braissant, O., Decho, A.W., Norman, R.S., Visscher, P.T. 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96(3): 141–162.
- Dupraz, C., Pattisina, R., Verrecchia, E.P. 2006. Translation of energy into morphology: Simulation of stromatolite morphospace using a stochastic model. *Sedimentary Geology*, 185(3-4): 185–203.
- Dupraz, C., Visscher, P.T. 2005. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*, 13(9): 429–438.
- Dupraz, C., Visscher, P.T., Baumgartner, L.K., Reid, R.P. 2004. Microbe-mineral interactions: Early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology*, 51(4): 745–765.
- Embry, A., Klovan, E. 1971. A late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, N. W. T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19(4): 730–781.
- Falcone, C.M.O. 2006. *Sedimentação mista carbonato-siliciclástico durante o Alboaptiano na porção emersa da Bacia Sergipe-Alagoas*. São Leopoldo, 193p. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Falkenhein, F.U.H. et. al. 1986. *Análise da Bacia Sergipe-Alagoas*. Relatório Interno da PETROBRAS, s/n, Aracaju, 9 vol. com mapas), PETROBRAS/DEPEX/CENPES, 210p
- Farmer, J.D., Des Marais, D.J. 1994. Biological versus inorganic processes in stromatolite morphogenesis: Observations from mineralizing sedimentary systems, *In*: Stal, L., Caumette, P. (Eds.). *Microbial Mats*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, p. 61–68.
- Feijó, F.J. 1994. Bacias de Sergipe e Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras*

8(1): 149–161.

- Feijó, F.J. 1980. Estudo dos carbonatos Muribeca e Riachuelo no Alto de Aracaju-Bacia de Sergipe/Alagoas nordeste do Brasil, *In: Anais Do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia*. Camburiú-SC, p. 320–332.
- Feng, J., Cao, J., Hu, K., Peng, X., Chen, Y., Wang, Y., Wang, M. 2013. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic-carbonate sediments, northwestern Qaidam Basin, northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 124–137.
- Flügel, E. 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks*. Berlin, Springer-Verlag, 995p.
- Folk, R.L. 1980. *Petrology of the Sedimentary Rocks*,. Austin, Texas, Hemphill Publishing Company, 184p.
- Fontana, D., Zuffa, G.G., Garzanti, E. 1989. The interaction of eustacy and tectonism from provenance studies of the Eocene Hecho Group Turbidite Complex (south-central Pyrenees, Spain). *Basin Research*, 2: 223–237.
- Fontana, D., McBride, E.F., Kugler, R. 1986. Diagenesis and Porosity Evolution of Submarine-Fan and basin-plain sandstones, Marnoso-Arenacea formations, northern Apennines, Italy. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 34(3): 313–328.
- Gerdes, G., Krumbein, W.E., Noffke, N. 2000. Evaporite Microbial Sediments. *In: Riding, R.E., Awramik, S.M. (Eds.). Microbial Sediments*. Berlin, Springer-Verlag, p. 196–208.
- Grotzinger, J., Al-Rawahi, Z. 2014. Depositional facies and platform architecture of microbialite-dominated carbonate reservoirs, ediacaran-cambrian ara group, sultanate of Oman. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 98(8): 1453–1494.
- Johnsson, M.J. 1993. The System Controlling the Composition of Clastic Sediments. *Geological Society of America Special Papers*, 284: 1–20.
- Koutsoukos, E.A.M., Mello, M.R., De Azambuja Filho, N.C., Hart, M.B., Maxwell, J.R. 1991. The Upper Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Brazil: an integrated paleoenvironmental assessment. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75(3): 479–498.
- Koutsoukos, E.A.M. 1989. *Mid to late Cretaceous microbiostratigraphy paleoecology and paleobiography of the Sergipe basin*. Plymouth, 542p. Tese de Doutorado,

Department of Geological Sciences of Polytechnics South West.

- Krumbein, Wolfgang E, Brehm, U., Gerdes, G., Gorbushina, A.A., Levit, G., Alinska, K.A.P. 2003. Biofilm, Biodictyon, Biomat Microbialites, Oolites, Stromatolites Geophysiology, Global Mechanism, Parahistology, *In: Krumbein, Wolfgang Elisabeth, Paterson, D.M., Zavarzin, G.A. (Eds.). Fossil and Recent Biofilms - A Natural History of Life on Earth.* Netherlands, Springer, p. 1–27.
- Machel, H.G. 2004. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal. *Geological Society Special Publication*, 235(1): 7–63.
- Mansurbeg, H., Caja, M.A., Marfil, R., Morad, S., Remacha, E., Garcia, D., Martín-Crespo, T., El-Ghali, M.A.K., Nystuen, J.P. 2009. Diagenetic evolution and porosity destruction of turbiditic hybrid arenites and siliciclastic sandstones of foreland basins: Evidence from the Eocene Hecho Group, Pyrenees, Spain. *Journal of Sedimentary Research*, 79(9): 711–735.
- McNeill, D.F., Cunningham, K.J., Guertin, L.A., Anselmetti, F.S. 2004. Depositional themes of mixed carbonate-siliciclastics in the south Florida Neogene: Application to ancient deposits. *Integration of outcrop and modern analogs in reservoir modeling: AAPG Memoir 80*, p. 23–43.
- Mohriak, W.U. 2003. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. *In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Eds.). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais Do Brasil.* CPRM, Brasília, p. 87–165.
- Molenaar, N., Martinius, A.W. 1990. Origin of nodules in mixed siliciclastic-carbonate sandstones, the Lower Eocene Roda Sandstone Member, southern Pyrenees, Spain. *Sedimentary Geology*, 66: 277–293.
- Morad, S., Ketzer, J.M., De Ros, L.F., 2012. Linking diagenesis to sequence stratigraphy: an integrated tool for understanding and predicting reservoir quality distribution. *In: Morad, Sadoon, Ketzer, M., De Ros, Luiz F. (Eds.). Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy.* John Wiley & Sons, Inc., p. 1–36.
- Mount, J.F. 1984. Mixing of Siliciclastic and Carbonate Sediments in Shallow Shelf Environments. *Geology*, 12(7): 432–435.
- Myshrall, K.L., Mobberley, J.M., Green, S.J., Visscher, P.T., Havemann, S.A., Reid, R.P., Foster, J.S., 2010. Biogeochemical cycling and microbial diversity in the thrombolitic microbialites of Highborne Cay, Bahamas. *Geobiology*, 8(4): 337–354.
- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T., Krumbein, W.E. 2001. Microbially Induced

Sedimentary Structures--A New Category within the Classification of Primary Sedimentary Structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5), 649–656.

- Pace, A., Bourillot, R., Bouton, A., Vennin, E., Galaup, S., Bundeleva, I., Patrier, P., Dupraz, C., Thomazo, C., Sansjofre, P., Yokoyama, Y., Franceschi, M., Anguy, Y., Pigot, L., Virgone, A., Visscher, P.T. 2016. Microbial and diagenetic steps leading to the mineralisation of Great Salt Lake microbialites. *Scientific Reports*, 6(1): 1–12.
- Riding, R. 2011. Microbialites, stromatolites and thrombolites. In: Reitner, J., Thiel, V. (Eds.). *Encyclopedia of Geobiology*. Dordrecht, Springer Netherlands, p. 635–654.
- Riding, R. 2000. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47(Suppl. 1): 179–214.
- Schaller, H. 1969. Revisão Estratigráfica da Bacia de Sergipe/Alagoas. *Boletim Técnico da Petrobras*, 12(1): 21–86.
- Souza-Lima, W., Andrade, E.D.J., Bengtson, P., & Galm, P.C. 2002. A Bacia de Sergipe-Alagoas: evolução geológica, estratigráfica e conteúdo fóssil. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix, Edição especial 1. 34p.
- Spadafora, E., De Ros, L.F., Zuffa, G.G., Morad, S., Al-Aasm, I.S. 1998. Diagenetic evolution of synorogenic hybrid and lithic arenites (Miocene), northern Apennines, Italy. In: Morad, S. (Ed.), *Carbonate Cementation in Sandstones*. Oxford, International Association of Sedimentologists - Blackwell Scientific Publications, p. 241–260.
- Surdam, R.C., Crossey, L.J., Hagen, E.S., Heasler, H.P. 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73(1): 1–23.
- Tucker, M. 1988. *Techniques in Sedimentology*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 391p.
- Van Der Ven, P.H., Cainelli, C., Fernandes, G.J.F. 1989. Bacia de Sergipe-Alagoas: Geologia e Exploração. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 3(4): 307–319.
- Van Lith, Y., Warthmann, R., Vasconcelos, C., McKenzie, J.A. 2003. Sulphate-reducing bacteria induce low-temperature Ca-dolomite and high Mg-calcite formation. *Geobiology*, 1(1): 71–79.
- Vasconcelos, C., McKenzie, J. 1997. Microbial mediation of modern dolomite

precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *Journal of Sedimentary Petrology*, 67(3): 378–390.

Warren, J.K. 2016. *Evaporites: A geological compendium*. Second Edition. Switzerland, Springer, 1813p.


Warren, J. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1-3): 1–81.

Zecchin, M., Caffau, M. 2012. The vertical compartmentalization of reservoirs: An example from an outcrop analog, Croton Basin, southern Italy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 96(1): 155–175.

Zuffa, G.G., 1985. Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results. In: Zuffa, G.G. (Ed.), *Provenance of Arenites*. Dordrecht, NATO-ASI Series C. D. Reidel Pub. Co., p. 165-18.

Zuffa, G.G., 1980. Hybrid arenites: their composition and classification. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50: 21-29


9. ARTIGO SUBMETIDO

Confirming submission to Cretaceous Research -
[EMID:22080da55a7be332]  Caixa de entrada x



Cretaceous Research <em@editorialmanager.com> 14 de jun. de 2021 16:13 (há 1 dia)



 para mim ▾

This is an automated message.

Depositional and diagenetic conditions during early South Atlantic opening: Evidence from the Oiteirinhos Member, Muribeca Formation of Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil

Dear Miss Trombetta,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Cretaceous Research.

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

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Cretaceous Research

Depositional and diagenetic conditions during early South Atlantic opening: Evidence from the Oiteirinhos Member, Muribeca Formation of Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil

Mariane Cristina Trombetta and Luiz Fernando De Ros

Geosciences Graduate Program, Rio Grande do Sul Federal University, Porto Alegre, RS, Brazil; mariane.trombetta@ufrgs.br; lfderos@inf.ufrgs.br

ABSTRACT

The Muribeca Formation from the Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazil, records the transition from continental to marine conditions during the initial South Atlantic opening. The formation is constituted by the basal coarse clastics of the Carmópolis Member, which are covered by the Ibura Member evaporites, and by the Oiteirinhos Member. The Oiteirinhos Member is characterized by a wide lithological variation, including siliciclastic, carbonate, and hybrid deposits. There are very few studies of the Oiteirinhos deposits, despite their considerable scientific importance as evidence on the conditions during this key time of South Atlantic evolution. In this article, we present a petrological study of the Oiteirinhos Member, integrated with sedimentological and geophysical data from five onshore wells. The studied rocks include siliciclastic sandstones, siliciclastic-carbonate hybrid arenites, marls, microbialites, calcarenites, and calcilutites. The composition of the sandstones is rich in low-grade metasedimentary fragments from the erosion of Upper Proterozoic supracrustal orogenic terrains. Intrabasinal carbonate constituents include ooids, peloids, oncoids, intraclasts, and bioclasts of ostracodes, benthic foraminifers, and echinoderms. Carbonate microbialites occur associated with laminated organic mud deposits, commonly rich in carbonaceous and phosphate fragments. The initial diagenetic evolution of Oiteirinhos deposits occurred under alkaline conditions, and the influence

of arid climate and the Ibura Member evaporites. The depositional and diagenetic aspects reveal progressively less evaporitic conditions during the deposition of the Oiteirinhos Member, dependent on the rapid and frequent changes in the depositional environment registered by the intense lithological variation.

KEYWORDS: Oiteirinhos Member; transitional sequence; hybrid deposits; diagenesis.

1. INTRODUCTION

The Aptian-Albian section of the Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazil, is represented by the mixed siliciclastic-evaporitic-carbonate succession of the Muribeca and Riachuelo formations (Campos Neto et al., 2007). The Muribeca Formation corresponds to the transitional phase from lacustrine to marine conditions, during the initial opening of the South Atlantic Ocean in the Aptian (Koutsoukos et al., 1991).

The Muribeca Formation is subdivided into three members: Carmópolis, Ibura, and Oiteirinhos (Feijó, 1994). The Oiteirinhos Member is characterized by a wide lithological variation, including mudrocks, lithic sandstones rich in low-grade metamorphic fragments, hybrid siliciclastic-carbonate oolitic-intraclastic arenites, carbonate breccias, calcilutites, and microbial deposits. These diverse deposits covered the Ibura Member evaporites still under arid climate, which influenced the depositional dynamics and diagenesis of the Oiteirinhos Member (Feijó, 1994).

This study presents the first petrological characterization of the Oiteirinhos Member. By integrating lithological and mineralogical information with sedimentologic, stratigraphic, and geophysical data, we intend to contribute to the understanding of a key moment in the evolution of the South Atlantic margin. The characterization of the depositional and diagenetic history of the complex Oiteirinhos Member will also assist the exploration for potential reservoirs in the unit and in the similar prospects in other basins in the South Atlantic margin.

2. GEOLOGICAL SETTING

The Sergipe-Alagoas Basin is located on the northeastern Brazilian margin, between parallels 9° and 11°30'S (Fig. 1). The basin is limited to NE by the Maragogi High with the Pernambuco-Parnaíba Basin and SW by the Vaza-Barris Fault System with the Jacuípe Basin (Mohriak, 2003). Its formation is related to the opening of the South Atlantic Ocean during the Mesozoic (Araújo et al., 2009).

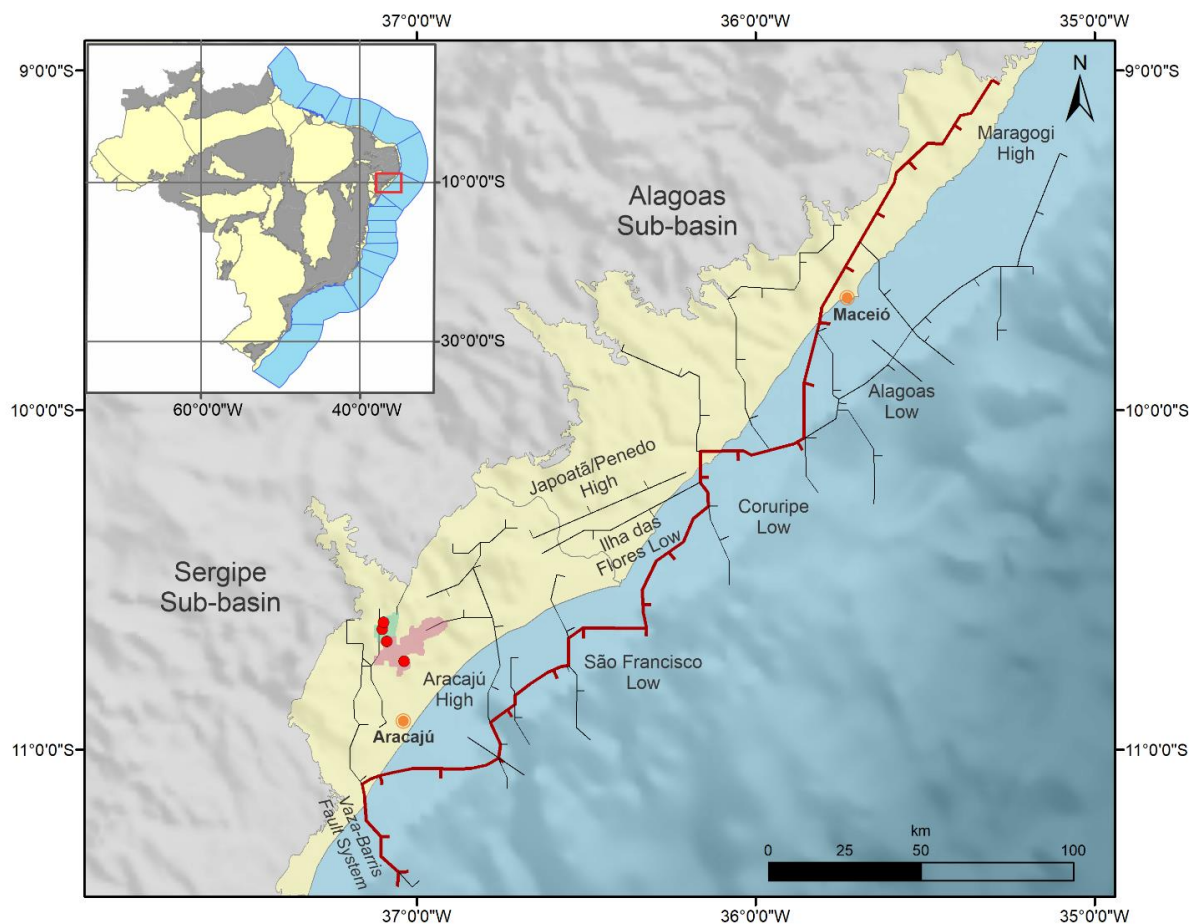


Figure 1. Location map of the Sergipe-Alagoas Basin with the studied wells (red dots). Three wells are in the Sirizinho field (green) and one in the Carmópolis field (pink). Main faults (black) and the Alagoas Hinge Line (red) were defined by Falkenhein et al. (1986) and Van der Ven et al. (1989).

Due to the tectonic-stratigraphic framework and the diachronic erosion and deposition events that occurred during its evolution, the Sergipe-Alagoas Basin is divided into the Sergipe and Alagoas sub-basins (Campos Neto et al., 2007). The crystalline basement is distinct in the sub-basins. In the Sergipe Sub-basin, the basement consists of low-grade metamorphic rocks from the Miaba and Vaza-Barris groups and the metasedimentary rocks of the Estância Formation (Campos Neto et al., 2007). The basement of the Alagoas Sub-basin is formed by the Proterozoic granitic rocks of the Pernambuco-Alagoas massif (Campos Neto et al., 2007).

The sedimentary record of the Sergipe-Alagoas Basin is one of the most complete among the Brazilian eastern margin basins, with a sedimentary record of the Paleozoic synclisis, Pre-rift, Rift, Transitional and Drift stages (Cruz, 2008). During the Paleozoic synclisis stage, deposition occurred on wide areas, under intracratonic conditions (Campos Neto et al., 2007). The Pre-rift stage is characterized by tectonic stability, with deposition of lacustrine mudrocks and fluvial-deltaic sandstones (Campos Neto et al., 2007). The Rift stage is marked by intense tectonic activity, which created the current configuration of the basin (Aquino and Lana, 1990). In the Transitional stage, a major marine incursion occurred, with the deposition of sediments of the Muribeca Formation (Fig. 2; Campos Neto et al., 2007). The Drift stage marks the stage of thermal subsidence, with marine sedimentation (Campos Neto et al., 2007).

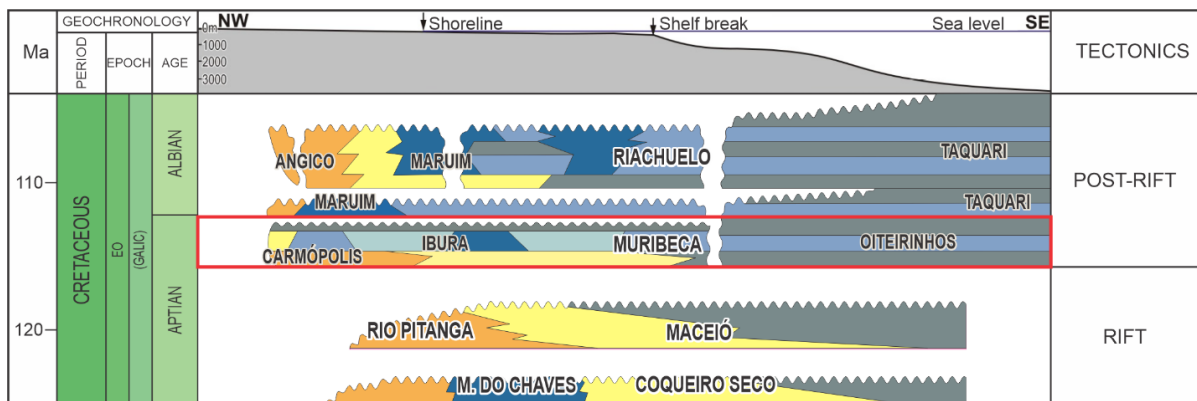


Figure 2. Chronostratigraphic chart of the Aptian and Albian section of the Sergipe sub-basin (modified from Campos Neto et al. 2007).

The Transitional stage is marked by the deposition of the Muribeca Formation, during the Aptian (Campos Neto et al., 2007; Cruz et al., 2010). This stage records the progressive separation of Africa and South America continents, with the creation of the South Atlantic Ocean. The Muribeca Formation was deposited during the Upper Aptian in the Sergipe-Alagoas Basin over the pre-Alagoas unconformity, generated by extensive erosion of the basement and older units (Feijó, 1994). In the Sergipe Sub-Basin, conglomerates and sandstones of the Carmópolis Member were deposited on this unconformity surface, followed by the microbial and evaporitic deposits of the Ibura Member, and finally by the carbonates, hybrid arenites, sandstones, and mudrocks of the Oiteirinhos Member. The Muribeca Formation is covered by the Albian marine carbonates and marginal clastics of the Riachuelo Formation.

The transition from a saline lagoon to an open marine environment is observed in the palynofacies data of the Muribeca and Riachuelo formations (Carvalho et al., 2006). The palynofacies are fundamental for recognizing the depositional conditions of transitional and open marine phases. Carvalho et al. (2006) subdivided the section into six events or six depositional environments controlled by sea-level changes in a long-term transgressive trend. The Oiteirinhos Member is interpreted as deposited in a coastal, lagoonal environment.

3. METHODS

The petrological study of the Oiteirinhos Member was performed through the systematic petrographic analysis of 69 thin sections from five cored wells. The petrographic characterization was executed in polarized light petrographic microscopes and using the Petroledge© software (De Ros et al., 2007) at the Geosciences Institute of the Federal University of Rio Grande do Sul.

The thin sections, prepared with representative samples impregnated with blue epoxy resin, were stained using a solution of Alizarin-S and Potassium Ferrocyanide to identify the composition of carbonate minerals (Tucker, 1988). Modal quantification of primary and diagenetic constituents and pore types was performed by counting 300 points per thin section, regularly distributed across transects perpendicular to the depositional structure and fabric.

The primary constituents were quantified according to the Gazzi-Dickinson method (Zuffa, 1985), which consists of recording separately the mineralogical composition of grains or crystals larger than the silt size (> 0.0625 mm) within the rock fragments. Only lithic fragments with fine texture (e.g., aphanitic volcanic rocks, chert, low-grade metamorphic rocks, mudrocks, and microcrystalline carbonate rocks) were counted as such. The method provides a better grouping of data obtained from sandstones of different grain sizes, emphasizing their provenance (Johnsson, 1993) by assuming that coarser polycrystalline components will break into monomineralic grains during transportation.

Scanning Electron Microscopy (SEM) was used as a complementary tool on 11 carbon-coated thin sections, providing a detailed characterization of minerals, habits, and paragenetic relationships that were difficult to recognize and interpret through optical microscopy. The analysis was carried out at the Isotopic Geology Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul using a JEOL JSM-6610LV Electron

Microscope with a coupled Bruker Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) for the identification of the elemental composition of the constituents.

4. PRIMARY STRUCTURES, FABRICS, TEXTURES AND COMPOSITION

The Oiteirinhos Member is composed of siliciclastic, hybrid, and carbonate particulate rocks, according to the proportion between extrabasinal, intrabasinal carbonate, and intrabasinal non-carbonate constituents (Fig. 3). In addition to particulate rocks, the unit contains microbialites (*sensu* Burne and Moore, 1987), and crystalline carbonate rocks formed by complete dolomitization.

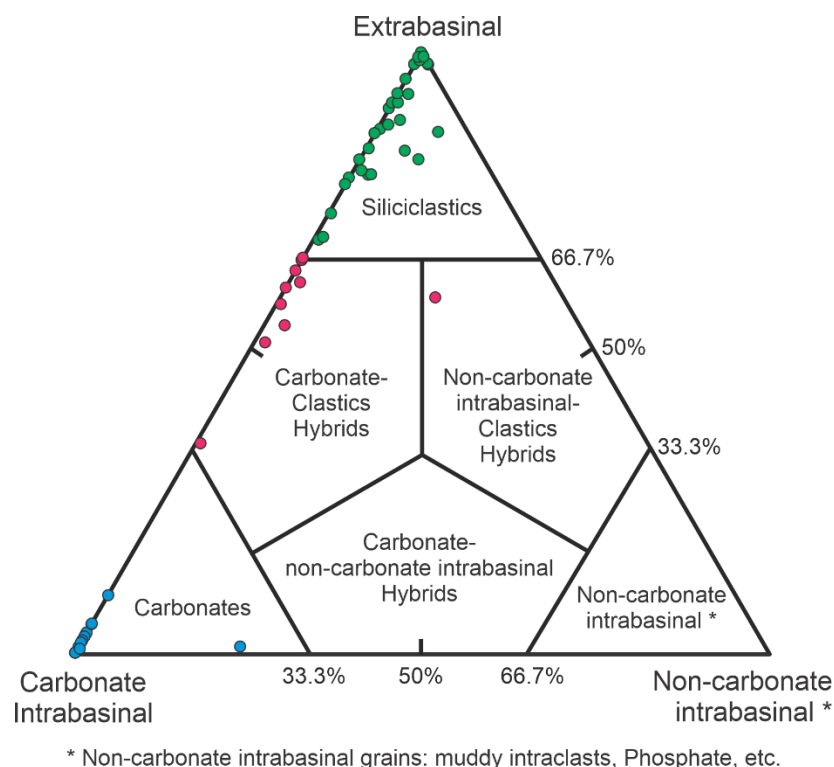


Figure 3. High-hierarchy compositional rock classification of the studied Oiteirinhos samples (based on the concepts from Zuffa, 1980; 1985).

The texture of siliciclastic deposits ranges from sandy mud to coarse conglomeratic sandstones (Fig. 4), with a predominance of fine- and medium-grained sandstones (*sensu* Folk, 1980). Sorting ranges from poor to good, predominantly moderate. Sand and gravel grains are sub-angular to rounded, with predominantly sub-rounded shapes. Most sandstones present massive structure, but some samples present irregular, parallel, or cross lamination (Fig. 5A), often marked by grain size (Fig. 5B) or compositional variation. The compositional lamination is frequently characterized by levels with a concentration of mica (Fig. 5C) or garnet grains.

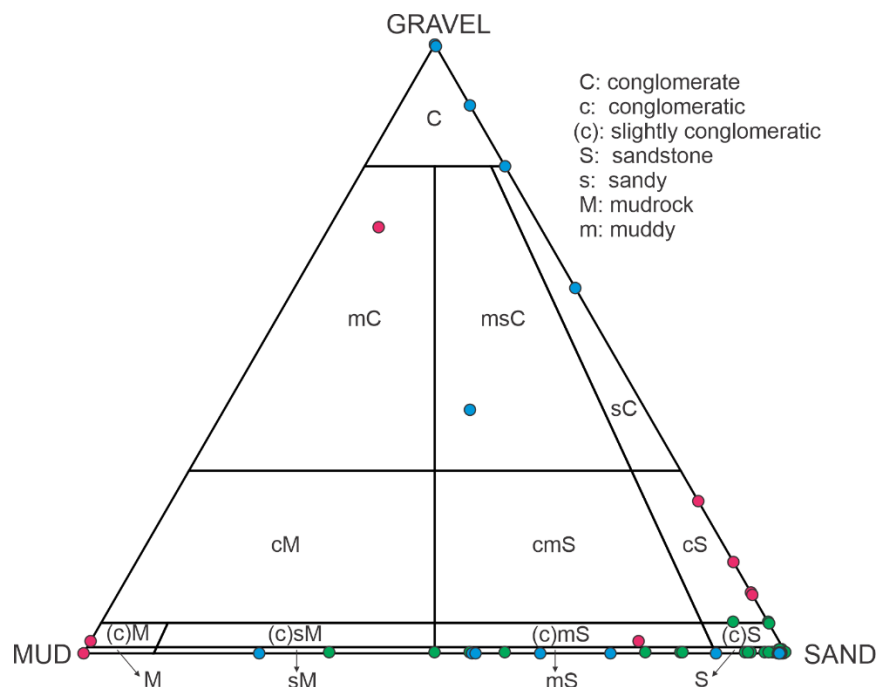


Figure 4. Folk (1968) textural classification of the studied siliciclastic (green), carbonate (blue) and hybrid (red) particulate rocks.

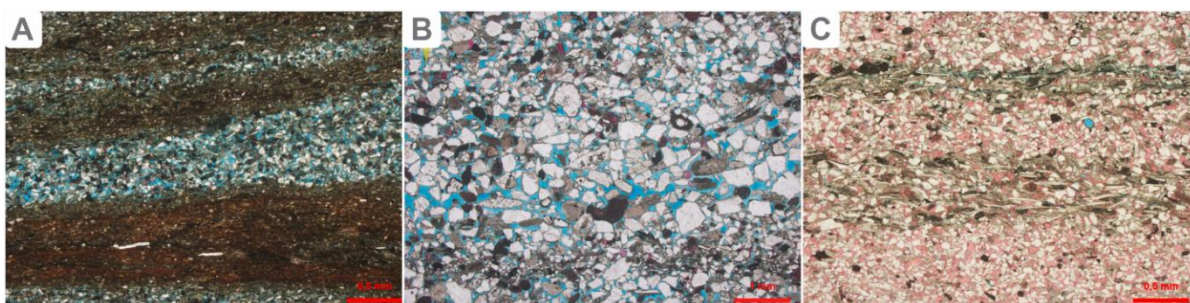


Figure 5. Examples of sedimentary structures found in siliciclastic samples. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Cross-lamination in a mud-sand heterolith. B) Medium-grained sandstone with irregular lamination marked by grain size variation. C) Fine-grained sandstone with granulometric lamination.

The texture of the hybrid deposits is highly variable. Some samples are laminated marls formed by the intercalation of micrite and siliciclastic mud (Fig. 6A). One sample is a fine-grained arenite with levels of carbonate pseudomatrix formed by compacted peloids (Fig. 6B). Conglomeratic hybrid arenites are common, with the conglomeratic fraction generally corresponding to carbonate intraclasts (Fig. 6C). The carbonate fraction of the better-sorted hybrid arenites corresponds mainly to oolites and peloids (Fig. 6D). Some hybrid rocks are muddy conglomerates formed by microbial intraclasts and siliciclastic mud (Fig. 6E). One sample was classified as a non-carbonate intrabasinal-clastic hybrid rock with a large proportion of mud intraclasts (Fig. 6F).

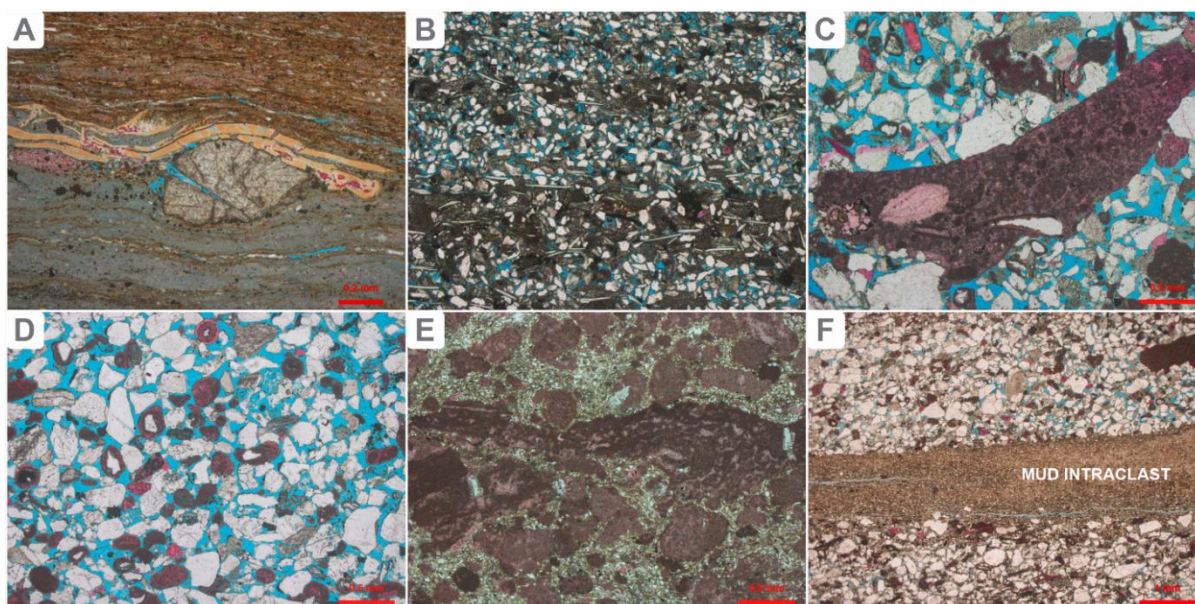


Figure 6. Examples of main textural characteristics of the hybrid samples. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Marl constituted by the intercalation of organic siliciclastic mud and dolomitized micrite, with phosphate bioclasts and a diagenetic phosphate nodule. B) Fine-grained hybrid arenite with levels of carbonate peloids compacted to pseudomatrix. C) Carbonate intraclast in conglomeratic medium-grained hybrid arenite. D) Medium-grained hybrid arenite with carbonate ooids, peloids, and intraclasts (stained pink). E) Intraclastic conglomerate with microbial intraclasts (stained pink) and siliciclastic sand. F) Conglomeratic hybrid arenite with large mud intraclasts and siliciclastic sand.

Oiteirinhos carbonate rocks also display a wide variety of structures and fabrics. Fractured crystalline rocks with unrecognizable primary texture, completely replaced by dolomite, are classified in this study as dolosparite or microdolosparite (Fig. 7A). Microbialites with characteristic clotted texture are frequently interlayered with organic mud. Some microbial colonies have grown in a concretionary style within organic mud, as suggested by the deformation of the mud laminations (Fig. 7B). Particulate carbonate rocks are represented by peloidal and bioclastic calcarenites, oncolitic-peloidal calcirudites (Figs. 7C, 7D and 7E), and intraclastic breccias (Fig. 7F).

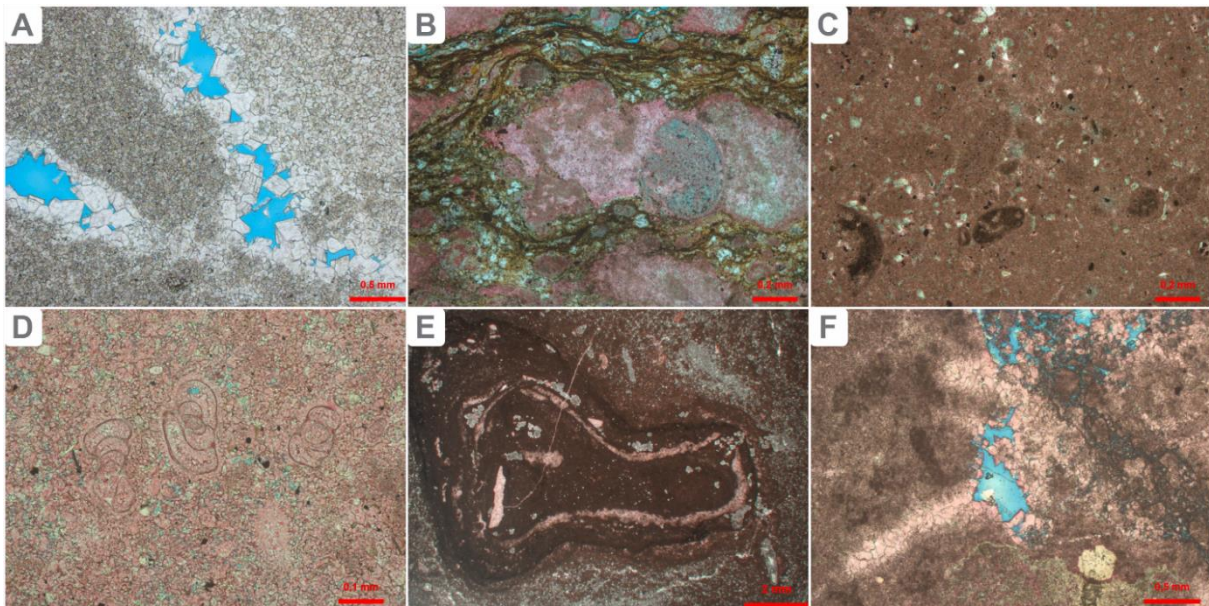


Figure 7. Examples of main textural characteristics of the carbonate samples. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Dolosparite with the blocky dolomite surrounding fracture porosity. B) Concretionary microbialite (stained pink) grown in organic siliciclastic mud. C) Peloidal calcarenite with some echinoderm bioclasts and quartz grains. D) Recrystallized bioclastic calcarenite with abundant benthic foraminiferous bioclasts and ostracodes (stained pink). E) Partially dolomitized oncolitic calcirudite. F) Carbonate breccia with calcite filling and surrounding fracture porosity.

The extrabasinal grains in the siliciclastic sandstones and hybrid arenites are represented mainly by quartz, feldspars, and low-grade metamorphic rock fragments (Table 1). Monocrystalline quartz grains are significantly more abundant than polycrystalline quartz grains. The feldspars are represented mainly by microcline, followed by orthoclase and plagioclase. Microcline is predominantly fresh, while orthoclase grains are often dissolved, and/or replaced by calcite, dolomite, or by diagenetic K-feldspar. The most abundant metamorphic rock fragments are phyllite and meta-siltstone, followed by schist and slate. Rounded, monocrystalline, ferroan, and non-ferroan calcite grains are interpreted as fragments of coarse crystalline carbonate rocks, like marbles. Sedimentary rock fragments are less abundant than metamorphic fragments and are represented mainly by sandstone and siltstone

fragments. Mica grains are common, with biotite predominant over muscovite, and rare chlorite.

Table 1. Maximum and average values of main primary constituents.

Primary composition of particulate rocks						
Primary Main Constituents	Siliciclastic		Hybrid		Carbonatic	
	Average (%)	Maximum (%)	Average (%)	Maximum (%)	Average (%)	Maximum (%)
Monocrystalline detrital quartz	21.5	34.7	16.1	27.0	1.5	6.5
Polycrystalline detrital quartz	1.8	4.0	1.4	3.0	-	-
Microcline	4.4	8.3	3.8	10.7	-	-
Orthoclase	4.1	8.7	1.8	3.7	-	-
Plagioclase	2.3	7.0	2.9	7.7	-	-
Undifferentiated detritic feldspar	3.3	8.7	2.8	8.7	-	-
Biotite	3.6	11.0	1.0	3.3	<1	1.3
Muscovite	2.3	11.0	<1	5.7	<1	1.3
Garnet	1.0	6.7	<1	1.3	-	-
Amphibole	<1	3.7	<1	2.3	-	-
Mud intraclast	<1	4.3	1.9	19.7	<1	5.0
Evaporite intraclast	-	-	-	-	<1	10.3
Phosphate bioclast	<1	1.3	<1	3.0	<1	<1
Siliclastic matrix	6.3	51.7	12.6	58.3	-	-
Phyllite fragment	5.4	12.0	1.3	5.3	<1	2.0
Metasiltstone fragment	2.6	6.3	1.3	5.0	-	-
Schist fragment	1.6	4.7	<1	1.3	-	-
Slate fragment	1.3	4.3	<1	1.7	-	-
Marble fragment	1.1	6.7	<1	1.7	-	-
Metasandstone fragment	<1	4.0	<1	<1	-	-
Undifferentiated metamorphic r. f.	<1	4.3	<1	1.0	-	-
Sedimentary rock fragment	<1	2.7	<1	4.3	-	-
Carbonate oncoid	-	-	-	-	6.2	55.3
Carbonate ooid	2.3	9.7	3.8	12.3	-	-
Carbonate peloid	2.1	14.7	5.3	32.7	7.7	50.3
Microcrystalline carbonate intraclast	1.3	8.7	2.8	10.7	<1	<1
Carbonate sand intraclast	1.1	4.3	2.6	9.3	-	-
Microbial carbonate intraclast	<1	7.0	7.4	62.7	30.7	100
Other carbonate intraclast	<1	5.7	<1	11.0	<1	1.3
Ostracode bioclast	<1	1.7	<1	<1	2.4	16.7
Bivalve bioclast	<1	1.3	<1	1.3	<1	<1
Foraminifer bioclast	<1	<1	<1	<1	4.0	30.4
Equinoderm bioclast	-	-	<1	<1	<1	1.3
Peloidal matrix	-	-	-	-	29.7	92.3
Micritic matrix	-	-	7.4	42.0	12.3	78.0

The siliciclastic sandstones are predominantly classified as feldspathic litharenites and lithic arkoses (*sensu* Folk, 1980; Fig. 8). The primary composition of the siliciclastic rocks and of the siliciclastic fraction of hybrid rocks indicates a predominantly mixed provenance origin (*sensu* Dickinson, 1985; Fig. 9), with sediments derived from orogenic recycling and basement uplift (Dickinson, 1985). However, this detrital composition reflects the composition of the adjacent basement, rather than the contemporary tectonic environment (Souza et al., 1995). Therefore, the large proportion of low-grade metamorphic fragments corresponds to Proterozoic metamorphic source terrains from the Sergipe Belt (Miaba and Vaza-Barris Groups) and meta-sediments of the Estância Formation, uplifted during the rift stage (Souza et al., 1995).

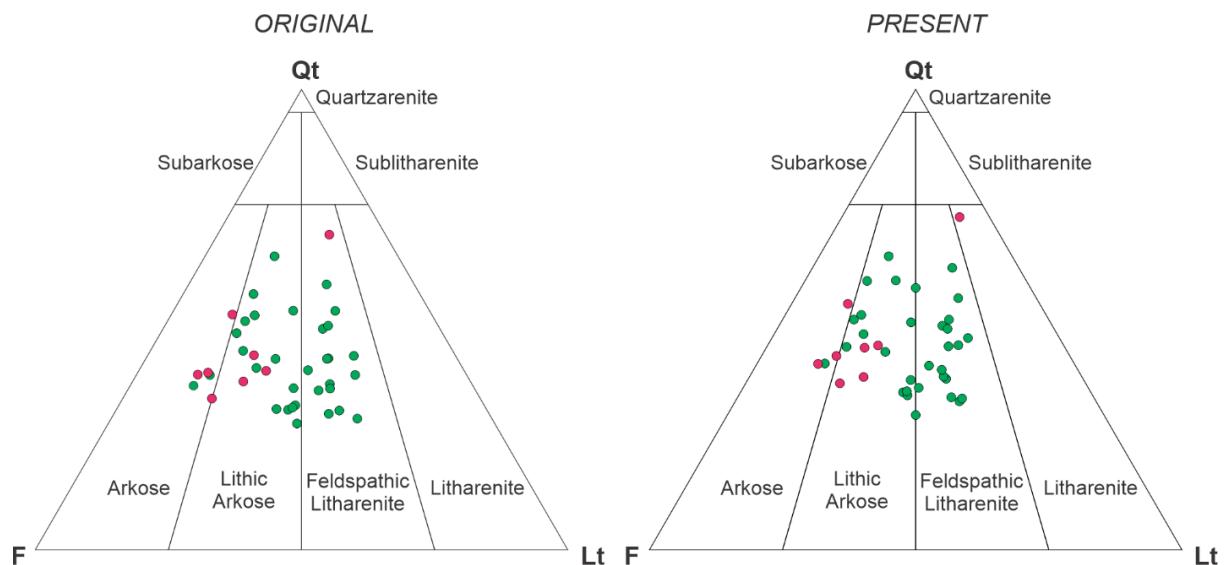


Figure 8. Original and present detrital composition of the siliciclastic rocks (green) and of the siliciclastic fraction of the hybrid arenites (red), plotted on Folk (1968) diagram.

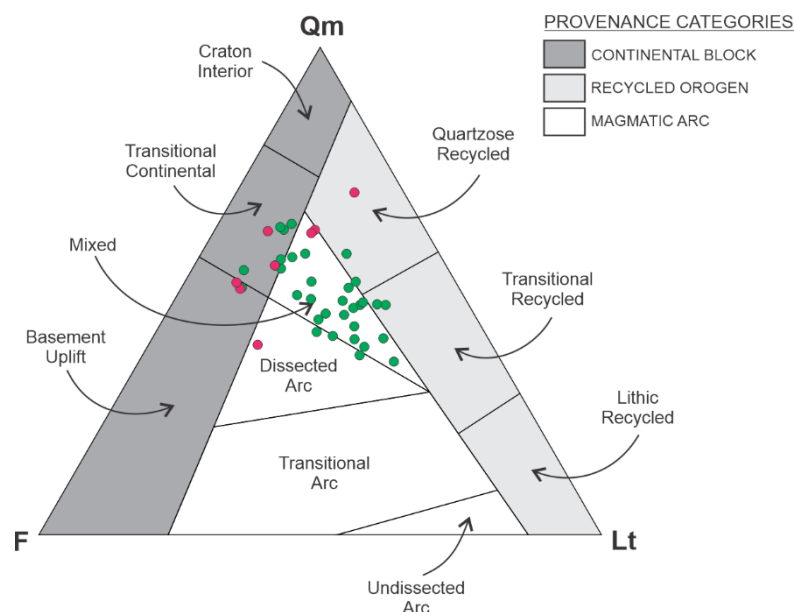


Figure 9. Original detrital composition of the siliciclastic rocks (green) and of the siliciclastic fraction of the hybrid arenites (red) plotted on Dickinson (1985) provenance diagram.

As noted in the high hierarchy compositional classification diagram (Fig. 3), intrabasinal carbonate grains constitute an important portion of the particulate rocks. In the hybrid and carbonate rocks, the most abundant intrabasinal carbonate particles are microbial, micritic and carbonate sand intraclasts, as well as peloids, ooids, oncoids, and ostracod, echinoderm, and foraminifer bioclasts. Micritic or peloidal carbonate matrix is abundant in some samples. Spherical microorganisms occur trapped within bioconstructions, some displaying a calcite wall and intraparticle filling by dolomite. Mud intraclasts are the main non-carbonate intrabasinal constituents. Phosphate bioclasts and carbonaceous fragments with well-preserved cellular textures are also found.

4.1. Facies and Facies Associations

The characterization of the main facies and facies associations was compiled from the sedimentological description of 8 drill cores from three onshore wells, and sidewall

cores from another well in the area. Twenty-three facies of siliciclastic, carbonate, evaporite, and hybrid composition, were identified and grouped into six facies associations (Table 2).

Table 2. Description of the recognized depositional facies and facies association (to be continued).

Facies Associations	Facies code	Sedimentary structures	Description	General depositional setting
6	CS	massive	Peloidal calcisiltites with vugular porosity and intense fracturing	Shallow marine
	CA	massive	Oncolitic and bioclastic calcarenites with vugular porosity and intense fracturing	
5	Sl	plane-parallel lamination	Medium to very fine-grained, well-sorted sandstones, with plane-parallel lamination, micaceous litharenites	Delta front / Fan delta / Alluvial plain
	Sm	massive and inverse gradation	Medium to very fine-grained, well-sorted sandstones, with reverse gradation or massive	
	Sc	convolute lamination	Medium to very fine-grained, well-sorted sandstones, with convolute lamination	
	Sx	low-angle cross lamination, unidirectional and wave ripples lamination	Medium to very fine-grained, well-sorted sandstones, with climbing ripple cross-lamination	
	St	through cross stratification	Medium to fine-grained sandstones, with through cross stratification	
4	gS	massive and low-angle cross lamination	Coarse to conglomeratic sandstones, with rounded quartz pebbles and fragments of phyllite, mudrocks and carbonate rocks	Basal channel deposits
	Gm	massive	Conglomerates with medium- to fine-grained sandstone matrix, massive or with reverse gradation	
3	F/Ma	plane-parallel lamination	Interlayered shales and marly siltstones with common carbonaceous fragments	Lagoonal / Prodelta
	Cl	plane-parallel lamination	Claystones with plane-parallel lamination	
	F	plane-parallel lamination and bioturbation	Shales with bioturbation and plane-parallel lamination, and centimetric anhydrite levels	
	CL	plane-parallel lamination	Calclutites with plane-parallel lamination	

Table 2. Description of the recognized depositional facies and facies association (continuation).

3	M	plane-parallel lamination	Mudstones with abundant organic matter and rare calcilutite intercalations	Lagoonal / Prodelta
	Ma/Bio	plane-parallel lamination, bioturbation	Interlayered marly siltstones (Ma) and microbialites (Bio), with plane-parallel lamination and intense bioturbation, carbonaceous fragments, pyrite concretions, and millimetric shale levels	
	M/SI	plane-parallel lamination	Interlayered mudstones and fine-grained sandstones, with plane-parallel lamination, and pyrite concretions	
	M/Sr	convolute and climbing ripple cross lamination	Interlayered mudstones and fine to medium-grained sandstones, with convolute, climbing ripple cross-lamination and bioturbation, pyrite concretions, and common carbonaceous fragments	
2	BC	massive	Carbonate breccias with microbial intraclasts	Marginal and intermediate lacustrine
	MB	plane-parallel lamination	Microbialites	
	Ma/CL	plane-parallel lamination	Interlayered marls (Ma) and calcilutites (CL), with plane-parallel lamination, and sin-depositional deformation	
	Ma	massive, convolute lamination	Massive marls or with convolute lamination	
	IC	massive, anhydritized	Anhydritized intraclastic conglomerates with microbial, mud and anhydrite intraclasts	
1	BC	massive, anhydritized	Anhydritized carbonate breccias with microbial intraclasts	Evaporitic Mudflat / Coastal sabkha / Lacustrine
	AD	nodular	Nodular anhydrites within interlayered marls and carbonate mudstones, with dissolution features, and calcite veins	

The base of the Oiteirinhos Member is constituted by the combination of nodular anhydrite beds, anhydritized intraclastic conglomerates, carbonate breccias, shales, and deformed calcilutite-marl heterolites with evidence of sin-depositional tectonism. Heterolites formed by interlayered fine-grained carbonates with probable microbial origin and marls overlap the anhydrite deposits. Breccias of fragments from these carbonate deposits and anhydrite occur among the heterolites.

Above the heterolites and carbonate breccias, progradational siliciclastic and hybrid sequences were deposited. The siliciclastic deposits correspond to predominantly laminated fine-grained sandstones and siltstones, with some portions showing a massive structure, cross laminations, or convolute structures, and abundant pyrite concretions. In the well that is located more to the northwest, marl packages with plane-parallel lamination occur at the base of progradational sequences. Their lamination is marked by the intercalation of very fine-grained sandstones/siltstones and micrite. The marls are overlapped by fine- to medium-grained sandstones, graded upwards to coarse to conglomeratic sandstones with siliciclastic-carbonate hybrid composition at the top of the progradational sequences.

Overlapping the sandstones and hybrid conglomerates there are laminated microbialite deposits, which are followed again by heterolites. These fine-grained deposits grade to fine- to medium-grained sandstones with lithic composition, characterized by the abundance of low-grade metamorphic rock fragments. The uppermost deposits of the Oiteirinhos Member are marine peloidal calcisiltites and calcarenites, oncolytic calcirudites, and dolosparites.

This general depositional sequence is observed in all the studied wells. The negative peaks in the gamma-ray that occur at the base of the CP-1914-SE well correspond to anhydrite and carbonate breccias. Above these deposits, an increase in gamma-rays values is observed, which is associated with the input of mud and marl sediments. Interlayered negative peaks correspond to sandstones and/or microbialites. The low gamma-ray values at the top of the sequence are associated with the marine carbonate

rocks, mainly represented by peloidal calcarenites and dolosparites (Figs. 10, 11, and 12).

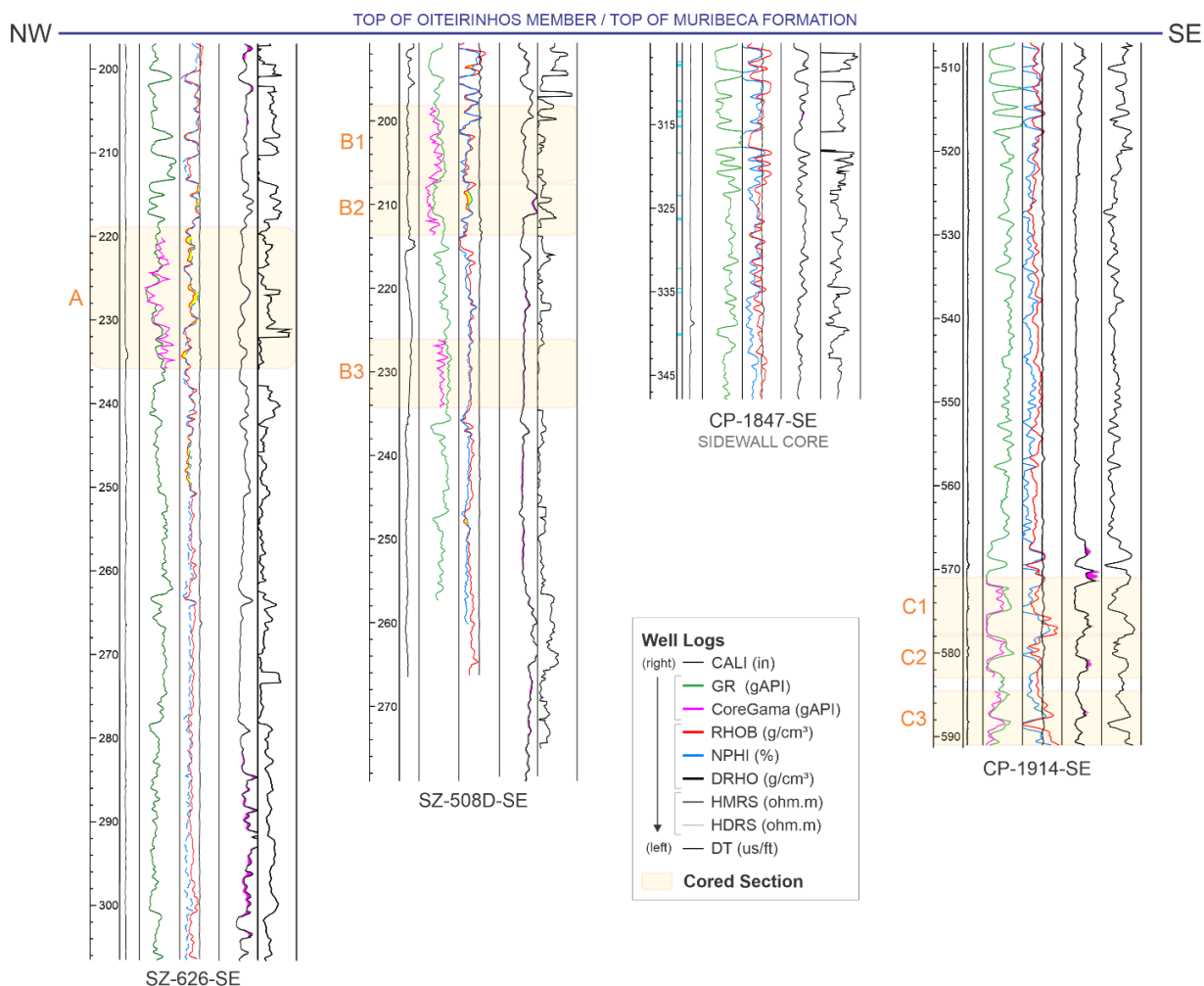


Figure 10. Interval corresponding to the Oiteirinhos Member in the studied wells. The yellow shaded areas correspond to the cored sections A, B1, B2, B3, C1, C2, and C3 correspond to the cores.

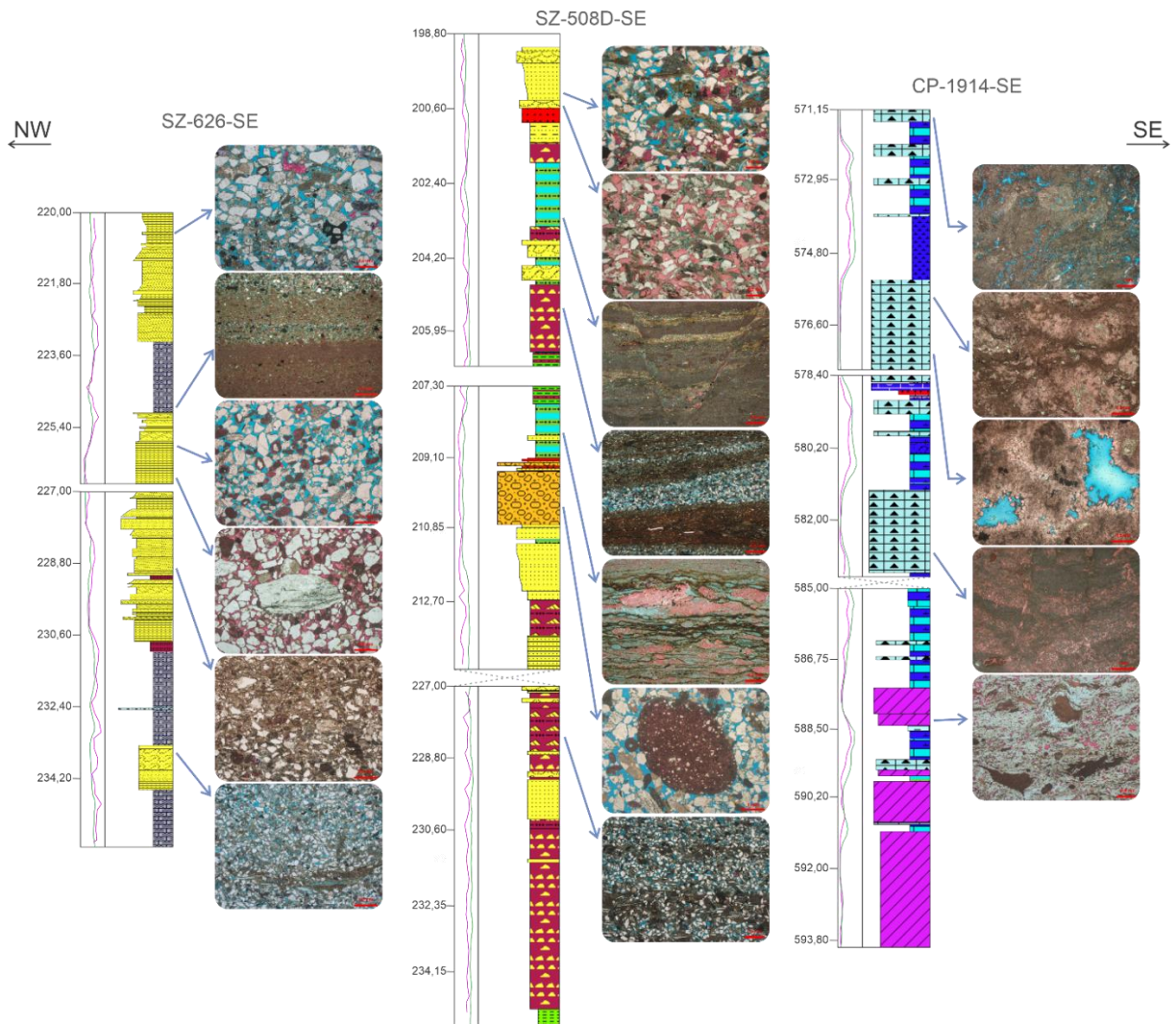


Figure 11. Characteristic vertical facies succession with photomicrographs of some representative rock types.

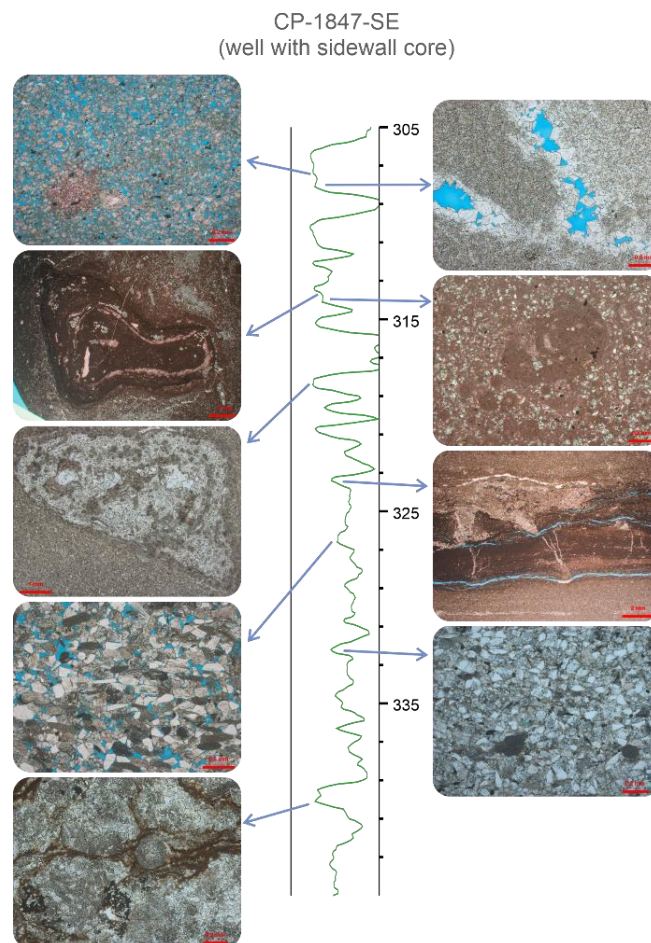


Figure 12. Photomicrographs of some representative rock types of sidewall samples.

4.2. Diagenetic processes and products in the siliciclastic and hybrid rocks

Blocky dolomite, macrocrystalline calcite, and K-feldspar overgrowths were the main diagenetic constituents in siliciclastic and hybrid rocks (Table 3). Coatings of infiltrated clay, transformed into chlorite/smectite (C/S) mixed-layer clays, are an important constituent in some samples. Framboidal pyrite is present in most samples, occurring widespread replacing constituents, and/or locally as pyrite concretions.

Table 3. Average and maximum volume of the main diagenetic constituents.

Diagenetic Main Constituents	Siliciclastic		Hybrid		Carbonatic	
	Average (%)	Maximum (%)	Average (%)	Maximum (%)	Average (%)	Maximum (%)
Total dolomite	12.4	42.7	9.6	28.3	27.2	93.8
Intergranular dolomite	5.5	23.0	2.0	8.0	<1	8.0
Intragranular dolomite	6.9	36.7	7.5	28.3	26.3	93.8
Fracture-filling dolomite	-	-	-	-	<1	5.0
Total calcite	5.7	28.7	5.6	32.0	2.6	11.7
Intergranular calcite	3.3	15.3	1.9	14.0	<1	9.3
Intragranular calcite	1.8	13.3	3.7	32.0	1.7	9.3
Fracture-filling calcite	-	-	-	-	<1	2.3
Intergranular ferroan calcite	<1	6.3	-	-	-	-
Intragranular ferroan calcite	<1	4.3	<1	<1	-	-
Total K-feldspar	3.0	9.3	2.8	9.0	-	-
Intergranular K-feldspar	2.2	7.3	2.4	8.7	-	-
Intragranular K-feldspar	<1	6.0	<1	2.0	-	-
Total pyrite	8.5	25.3	2.8	4.7	4.4	16.0
Intergranular pyrite	1.0	4.0	<1	1.0	<1	6.0
Intragranular pyrite	3.8	12.7	2.4	4.0	4.1	16.0
Total esmectitic clays	0.6	5.3	0.2	1.7	-	-
Intergranular esmectite	<1	5.3	<1	<1	-	-
Intragranular esmectite	<1	1.7	<1	1.0	-	-
Intergranular chlorite/smectite	<1	3.3	<1	2.0	-	-
Intragranular silica	-	-	-	-	1.5	19.0
Intragranular TiO ₂	<1	2.3	<1	1.0	-	-
Infiltrated clay	<1	6.0	-	-	-	-
Mud pseudomatrix	<1	3.0	<1	4.3	-	-
Lithic pseudomatrix	<1	1.0	<1	<1	-	-
Carbonate pseudomatrix	-	-	4.6	29.7	-	-
Total porosity	5.9	18.6	7.5	17.0	2.2	15.0
Intergranular pores	2.9	10.3	3.8	11.0	-	-
Intragranular pores	2.5	10.3	2.8	7.7	<1	4.0
Shrinkage pores	0.2	3.0	<1	<1	<1	1.3
Fracture pores	<1	<1	<1	1.0	<1	1.0
Moldic pores	<1	2.3	<1	3.0	-	-
Vugular/channel pores	-	-	<1	<1	1.2	11.3
Intercrystalline pores	-	-	-	-	<1	15.0

Dolomite is the most abundant diagenetic constituent in the studied siliciclastic and hybrid rocks, filling part of the intergranular space with blocky, macrocrystalline, or

microcrystalline habit (Fig. 13A; Table 3). In some hybrid arenites, saddle dolomite occurs as overgrowths covering the carbonate particles (Fig. 13B). Microcrystalline and blocky dolomite also replace grains (Fig. 13C), fill dissolution porosity, and expands micas (Fig. 13D) and micaceous metamorphic fragments. Carbonate particles, especially ooids and intraclasts are usually replaced by blocky or microcrystalline dolomite.

Calcite often fills intergranular pores with rim, macrocrystalline, and/or microcrystalline habits and variable iron content. Frequently, the grains were covered by prismatic rims, before filling the pores with macrocrystalline calcite (Fig. 13E). Calcite also replaces grains, fills dissolution porosity (Fig. 13F), and expands biotite grains.

K-feldspar discontinuous, epitaxial, and well-developed overgrowths are common in the siliciclastic sandstones and hybrid arenites (Fig. 13G). K-feldspar ingrowths and microcrystalline crystals partially fill the pores formed by the dissolution of feldspars and ooids (Fig. 15B). Albitized and sericitized plagioclases are common, however, their occurrence together with unaltered grains suggests that they are derived as such from source rocks affected by such alterations.

Infiltrated clay coatings are abundant in some siliciclastic sandstones. The coatings are thick, brownish-yellow, and continuously cover the grains (Fig. 13H). The smectitic infiltrated clays were transformed into C/S mixed-layer clays, and covered by fibrous **chlorite** during burial (Fig. 13H). In places, chlorite fibers constituted bridges between grains, locally filling intergranular porosity. Mud, lithic, and micritic **pseudomatrix** occur locally in some samples, generated by the compaction of mud intraclasts, low-grade metamorphic rock, and carbonate peloids.

Microcrystalline and framboidal **pyrite** occur widely distributed in the samples. Pyrite expanded and replaced biotite and metamorphic grains, and replaced carbonaceous and carbonate particles, mud, peloidal, and micritic matrix. In places, pyrite concretions

(Fig. 13I) and microcrystalline pyrite filled the intergranular porosity. Framboidal pyrite filled intraparticle pores in foraminifers.

Analcime occurs in some siliciclastic and hybrid samples with macrocrystalline and blocky habit, filling intergranular pores and carbonate particles dissolution pores (Fig. 13F).

Quartz overgrowths are quite rare. Small amounts of microcrystalline **titanium oxides** replace heavy minerals. **Phosphatic** nodules occur locally in marls close to phosphate bioclasts (Fig. 6A).

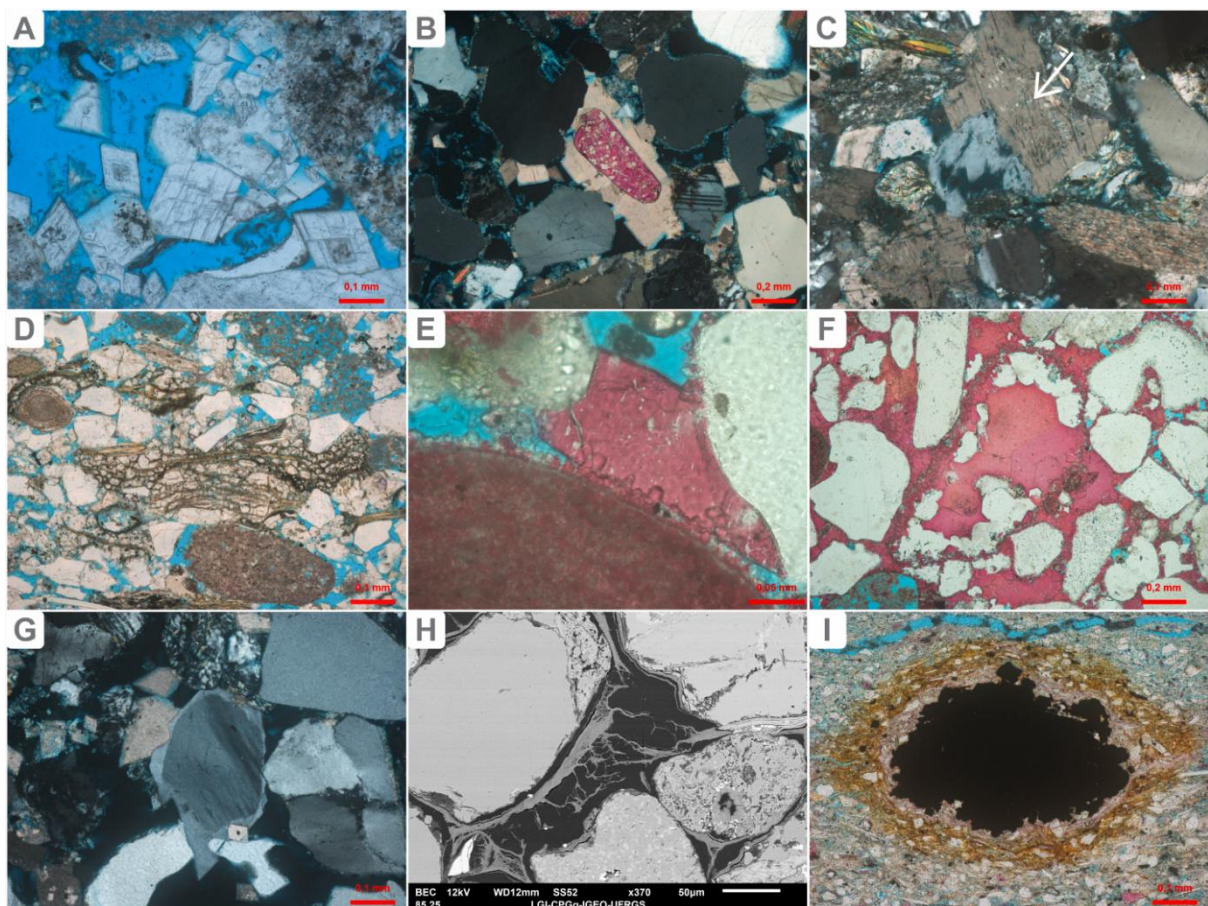


Figure 13. Main diagenetic features of siliciclastic and hybrid rocks. A) Blocky dolomite filling intergranular porosity. Uncrossed polarizers (//P). B) Saddle dolomite overgrowth covering a

monocrystalline calcite grain (stained red). Crossed polarizers (XP). C) Dolomite replacing a micaceous grain (white arrow). Orthoclase partially dissolved and with K-feldspar ingrowths. (XP). D) Blocky dolomite expanding biotite grain. (//P). E) Prismatic calcite rims covering a carbonate intraclast and blocky calcite filling the intergranular porosity (stained red; //P). F) Blocky analcime covering internally a moldic pore from carbonate particle dissolution. Macrocrystalline calcite filling porosity (stained red; //P). G) K-feldspar overgrowth covering microcline grain (XP). H) Backscattered electrons (BSE) image of infiltrated clay coatings transformed to C/S, and chlorite bridges. Contraction of the clay generated shrinkage porosity (//P). I) Pyrite concretion with an oxidation aureole in a fine-grained sandstone (//P).

4.3. Diagenetic processes and products in the carbonate rocks

In the carbonate rocks, dolomitization was the main diagenetic process, resulting in rocks partially or completely replaced by blocky and/or microcrystalline dolomite (Table 3). Fracture, channel, and vugular pores are commonly filled with **saddle dolomite** (Fig. 14A). Dolosparites were formed by the complete replacement of some samples by blocky and microcrystalline **dolomite**, making their primary texture and fabric unrecognizable. Some calcarenites and calcirudites were also strongly replaced by blocky and microcrystalline dolomite. Dolomitization generally started at the particle/matrix interfaces (Fig. 14B).

In the bioconstructions, dolomite filled the intraparticle porosity of preserved microorganisms (Fig. 14C). The calcite walls of these microorganisms were in places dissolved, preserving only the dolomite filling with a spherulitic habit (Fig. 14C; 14D). Some bioconstructions were pervasively dolomitized (Fig. 14E)

Macrocrystalline **calcite** also fills fracture, vugular, and channel pores in the studied carbonate rocks. In bioclastic calcarenites, calcite prismatic rims cover the particles (Fig. 14F). Rarely, calcite replaces siliciclastic mud matrix and fills the interparticle pores in the peloidal carbonate matrix.

Barite occurs with prismatic habit, filling vugular pores with calcite (Fig. 14G). **Sphalerite** with blocky habit replaces locally microbialites. **Chalcedony** fills vugular pores and replaces carbonate breccias. Microcrystalline **quartz** is locally abundant in microbialites and occurs replacing spherulites and filling dissolution pores (Fig. 14H).

Fibrous **anhydrite** fills the interparticle porosity in some intraclastic conglomerates (Fig. 14I), additionally replaces and displace the microbial and micritic intraclasts, and being replaced by calcite.

Pyrite occurs as framboids, concretions, or with a microcrystalline habit replacing peloids, oncoids, and bioclasts in particulate carbonate rocks, as well as in microbialites. Pyrite also typically replaces carbonaceous fragments and organic mud matrix.

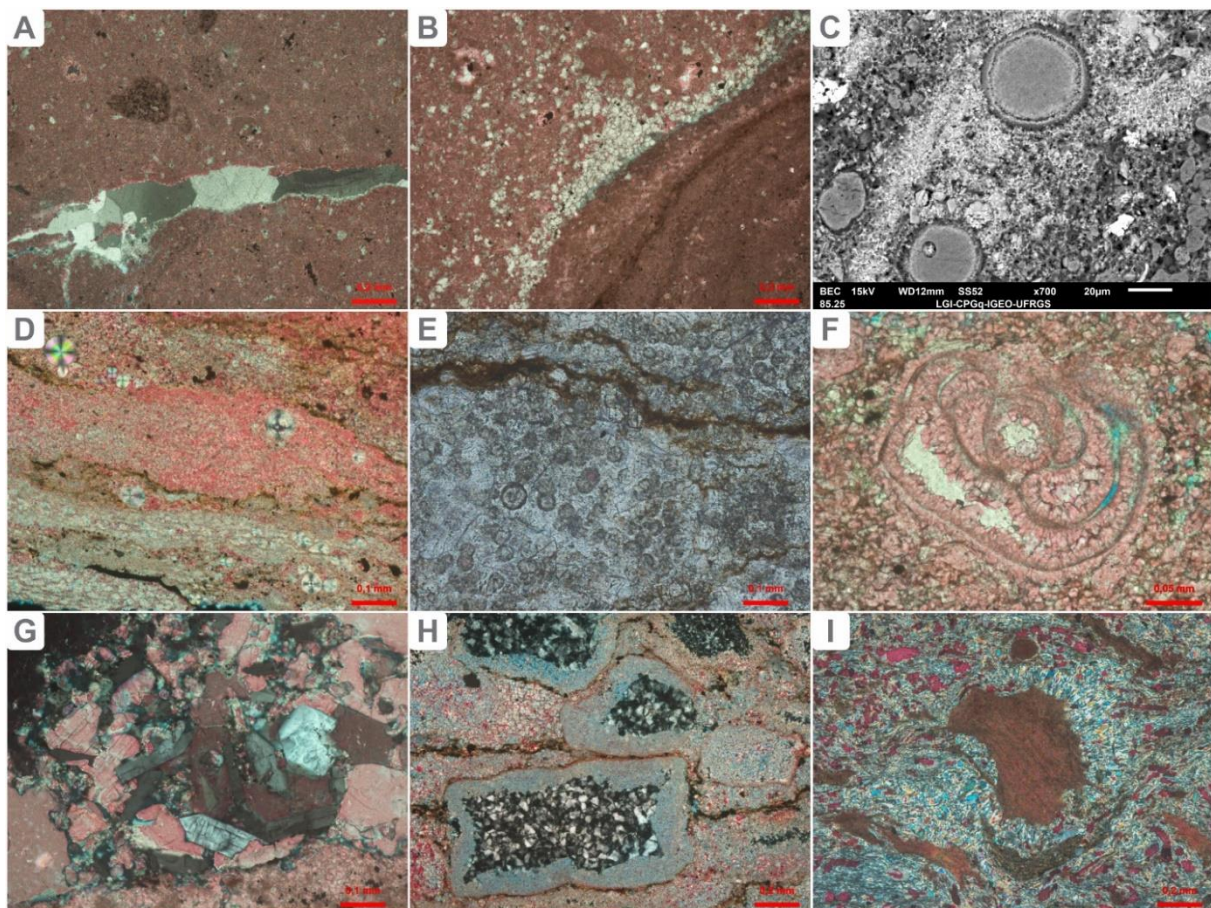


Figure 14. Main diagenetic constituents of carbonate rocks. A) Saddle dolomite filling channel porosity in a peloidal calcarenite (stained pink; //P). B) Microcrystalline dolomite replacing peloidal matrix in an oncolitic calcirudite, preferentially along the contact of the matrix with the oncoïd (stained pink; //P). C) BSE image of radial dolomite filling intraparticle porosity in microorganism trapped in bioconstruction. D) Spherulitic dolomite filling spherical microorganisms in a bioconstruction (stained pink; //P). E) Spherical microorganisms in a dolomitized bioconstruction interlayered with organic mud (//P). F) Spherical microorganisms in a dolomitized bioconstruction interlayered with organic mud (//P).

Prismatic calcite rims (stained pink) covering and filling a benthic foraminifer bioclast partially dissolved in a recrystallized calcarenite (//P). G) Prismatic barite and macrocrystalline calcite filling vugular porosity in a carbonate intraclastic breccia. Crossed polarizers (XP). H) Microcrystalline quartz replacing and filling dissolution pores in a microbialite. (XP). Fibrous anhydrite cementing and replacing partially the particles in an intraclastic breccia. (XP).

5. COMPACTION AND POROSITY

In siliciclastic sandstones and hybrid arenites, direct evidence of mechanical compaction is shown by the deformation of mica grains, metamorphic rock fragments, mud intraclasts, and peloids, locally converted into pseudomatrix (Fig. 15A). Nevertheless, intergranular contacts are commonly tangential and long, subordinately concave-convex, and sutured. Packing is predominantly normal in the coarse-grained sandstones and tight in the fine-grained sandstones.

Siliciclastic sandstones and hybrid arenites have similar average petrographic porosity. However, hybrid arenites show a small advantage over siliciclastic sandstones, owing to the dissolution of carbonate particles and feldspars. The siliciclastic fraction of hybrid arenites are generally more feldspathic than sandstones, which are richer in metamorphic lithic fragments (Fig. 8), and more compacted (Fig. 15B and 15C). Shrinkage porosity is important in some sandstones due to the dehydration and contraction of infiltrated clay coatings (Fig. 10H) and of mud intraclasts (Fig. 15D).

In the studied carbonate rocks, porosity is predominantly of the vugular and channel types. Channel porosity is favored in carbonate breccias, where the fractures were enlarged by dissolution. Bioconstructions have some minor porosity due to the degradation of carbonaceous fragments and the dissolution of spherulites (Fig. 15E). Intercrystalline porosity occurs in some dolomitized rocks and recrystallized bioclastic sandstones (Fig. 15F)

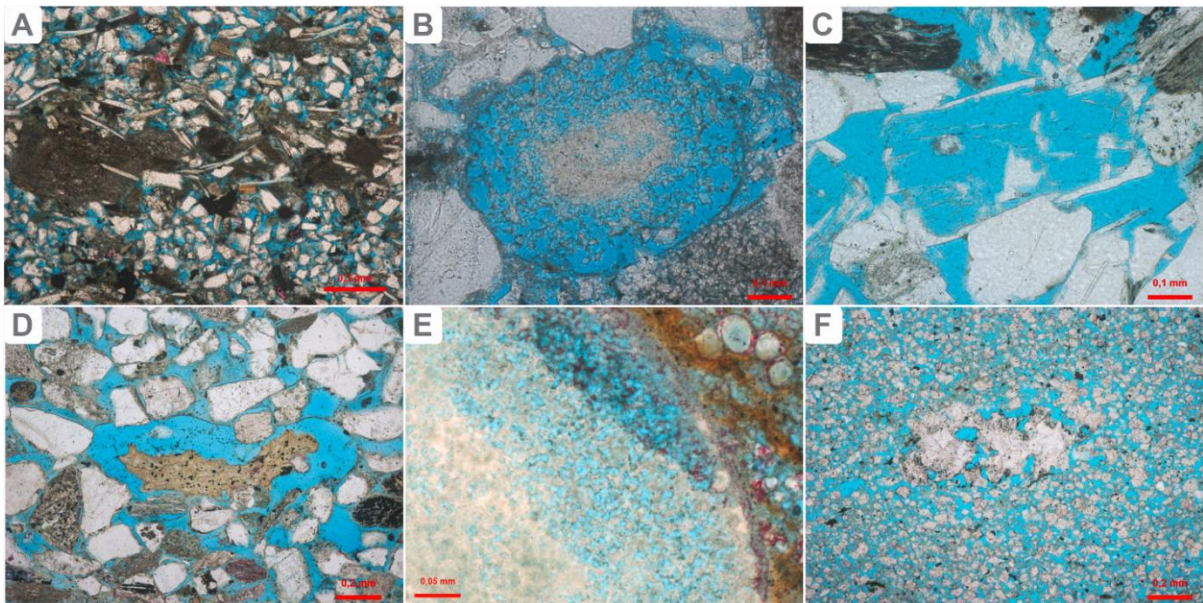


Figure 15. Main compaction features and porosity types. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Micritic pseudomatrix due to carbonate peloids compaction. B) Intraparticle porosity from carbonate ooid dissolution in hybrid arenite, partially filled by small, discrete K-feldspar crystals (//P). C) Moldic porosity from the dissolution of feldspar grain, with preservation of K-feldspar overgrowths. D) Shrinkage porosity generated by contraction of a mud intraclast. E) Microporosity from spherulite dissolution in carbonate bioconstruction. F) Intercrystalline porosity in a fine-textured dolosparite.

6. DISCUSSION

6.1. Depositional environments and stratigraphic framework

The depositional environments of the Oiteirinhos Member are related to the transitional context of the Muribeca Formation. The unit records the evolution from an evaporitic lacustrine-lagoonal complex to the establishment of marine conditions. During the depositional evolution, the restricted evaporitic conditions were replaced by coastal, through the marine incursions, probably influenced also by the action of storms (Araújo et al., 2009).

The evaporites of Ibura Member represent a large cycle of decreasing evaporitic conditions composed of several smaller cycles (Szatmari et al., 1979). The upper smaller record a trend of decreasing salinity (Selley, 2005), represented by potassium

salts, followed by halite, and by anhydrite at the transition between the Ibura and Oiteirinhos members, and at least by carbonates (Souza-Lima, 2008).

The lowermost part of Oiteirinhos Member shows extensive lithological variation, with a predominance of fine-grained heterolithic carbonate and marl deposits (Carvalho et al., 2006), deposited in a lacustrine or lagoonal environment, with intercalated nodular anhydrite beds indicating periods of more restrict and arid conditions. The feature known as “two peaks” in the Oiteirinhos gamma-ray logs is related to two such events of anhydrite deposition (Carvalho et al., 2006).

Although Szatmari et al. (1979) considered the anhydrite present in the Oiteirinhos Member as supratidal (sabkha) deposits, the evidence from the host deposits suggest that mud-displacive nodular anhydrite may be a product of shallow diagenetic precipitation under subtidal conditions, as well as subaerial precipitation in intertidal-supratidal flats (e.g., Hovorka, 1987; Dean et al., 1975; Souza-Lima, 2008). Even that the intrasequential conglomerates with anhydrite intraclasts may suggest re-sedimentation of these evaporitic deposits due to exposure. The lack of other exposure features suggests that the anhydrite intraclasts may have been generated under shallow water reworking of the carbonate and evaporite deposits.

Nevertheless, the carbonate breccias display characteristics that suggest brecciation by collapse owing to evaporite dissolution, including contacts abrupt with the underlying deposits and more gradual with the overlying deposits, as well as the arrange semi-continuous of intraclasts (Swennen et al., 1990). Similar collapse brecciation and deformation can be observed in the evolution of the Messinian post-evaporitic platform (Bourillot et al., 2010). However, while in the Messinian mixed siliciclastic/carbonate system an oobioclastic and ooid-dominated platform pass progressively to a microbialite-dominated system, the inverse condition is observed in the Oiteirinhos Member, with microbialites being covered by bioclastic calcarenites (Fig. 7d) and intraclastic conglomerates with fragments of microbial bioconstructions (Fig. 6d).

The common occurrence of microbialites and the scarcity of bioclasts in the lower and middle sections of the Oiteirinhos Member also indicate stressful initial depositional conditions. Many bacterial consortia are resistant to high salinities and can flourish in hypersaline lakes and lagoons where grazers are rare (Garrett, 1970; Gerdes et al., 1985). Arid conditions also promote low clastic influx, favoring microbial “blooms”. In the Messinian post-evaporitic platform, the microbialites were deposited under fluctuating salinities due to the dissolution of underlying evaporites, in addition to the input of freshwater that mixed with the marine waters (Bourillot et al., 2010).

The lithological trend to the top of the Oiteirinhos suggests both a slightly wetter climate and increasing marine influence. Less restricted conditions are indicated by the deposition of interlayered marls, calcilutites and mudrocks, in the distal areas, and of hybrid arenites, with abundant carbonate intraclasts (derived mainly from reworking of microbialites, micrite, and mud) and ooids formed in shallow and agitated waters. Wave ripples in the upper part of this interval indicate progressively shallower conditions.

In the alkaline lacustrine system of the Green River Formation mudstones, marls, calcarenites, and sandstones were deposited by episodic flooding of the playa flats fringing the alkaline lake (Eugster and Surdam, 1973). The shallow lacustrine deposits are represented by stromatolites, ooids, pisoids, and interference and oscillation ripples (Lundell and Surdam, 1975). During flooding periods, organic shales accumulated in the central lake, and micrite deposited in marginal mudflats (Eugster and Hardie, 1975). During dry periods, the muds were subject to desiccation, and micritic intraclasts were transported to the lake (Eugster and Hardie, 1975). Similar conditions and processes may have been responsible for the deposition of micritic and microbial intraclasts in the hybrid arenites of the Oiteirinhos Member.

The composition of the Oiteirinhos hybrid arenites reflects *in situ* compositional mixing at a bed scale (cf. Chiarella et al., 2017). Compositional mixing occurs by the contemporary accumulation of carbonate and siliciclastic fractions due to mixed transport or in environments where the terrigenous inflow does not inhibit carbonate

production (Mount, 1984; Chiarella et al., 2017). The deposition of the studied hybrid arenites, occurred by the mixing of carbonate intraclasts and ooids from shallow and marginal lacustrine deposits with first-cycle terrigenous alluvial sediments derived from uplifted source areas, with plutonic and old orogenic terrains (Fig. 9).

In addition to the *in situ* mixing, the common fine-grained heterolithic deposits reflect strata mixing at a lithofacies scale. Strata mixing results from the intercalation of two heterolithic layers (Chiarella et al., 2017). The observed heterolithic alternation of mudrocks or marls and calcilutites may be related to seasonal and/or climatic variations (alternation of humid and arid periods), to fluctuation in carbonate productivity, terrigenous influx, and/or local base level (Araújo et al., 2009; Carvalho et al., 2006b; Chiarella et al., 2017).

Cruz et al. (2010) suggested a depositional evolution and stratigraphic model for the transitional third-order sequences of the Sergipe Sub-Basin (Fig. 16). According to them, the record of the interval initiates with the deposition in a lowstand system tract, where evaporitic conditions predominate. During the transgression, marls and fine-grained carbonate deposits prevailed and, in the highstand system tract, marine conditions were established, with carbonate deposition towards SE and the inflow of siliciclastic sediments from the NW source area. Araújo et al. (2009) present a similar depositional environment model, with the presence of a wide floodplain with small lakes connected to a lagoon to the east. Eventually, the inflow of water from the lagoon to the lakes would occur due to marine incursions or storms.

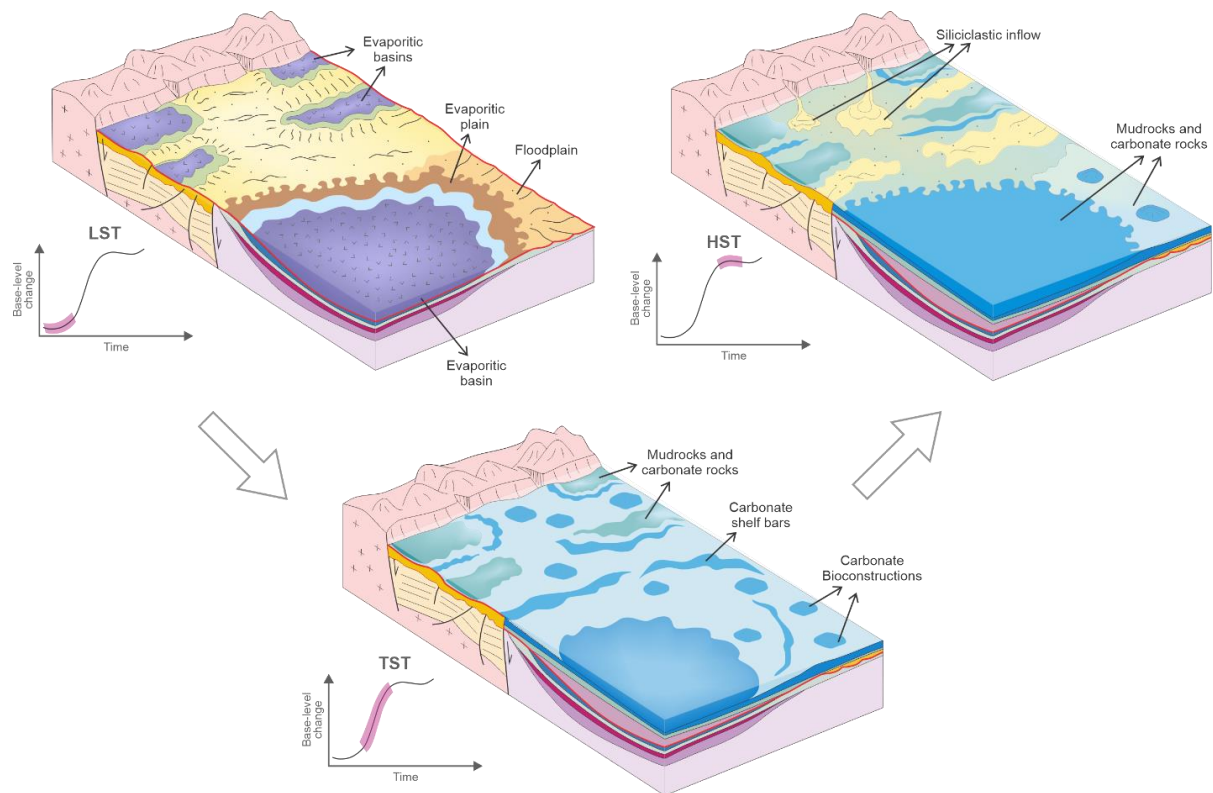


Figure 16. Schematic block diagrams illustrating the depositional evolution of the Oiteirinhos Member, corresponding to lowstand, transgressive, and highstand system tracts (modified from Cruz et al., 2010).

Fischer (2014) suggested that the members of the Muribeca Formation correspond to second-order sequences. According to such a general view, the Carmópolis Member would correspond to a lowstand system tract (LST). Initial marine transgression allowed the deposition of the Ibura evaporites. Further marine transgression ceased the precipitation of evaporites and allowed the deposition of the Oiteirinhos platform carbonates, followed, at last, by the inflow of siliciclastic sediments in the highstand system tract (HST) at the top of the succession.

6.2. Diagenetic Evolution

The main diagenetic processes and products that affected the Oiteirinhos Member occurred in near-surface conditions (eodiagenesis *sensu* Choquette and Pray, 1970).

The close association with the Ibura evaporites indicates arid climatic conditions during the end of Aptian, which directly influenced the diagenetic evolution of the analyzed rocks. Dolomitization was the main process in the sandstones, hybrid arenites, and carbonate rocks, having initiated at near-surface and proceeded during burial diagenesis. In the sandstones and hybrid arenites, macrocrystalline calcite and K-feldspar overgrowths are also occurring widely.

Three eodiagenetic environments were recognized: (1) lacustrine/lagoonal evaporitic; (2) shallow marine; and (3) continental under dry climate. The main diagenetic sequences are shown in Figure 17. The following discussion addresses the origin of the main diagenetic products.

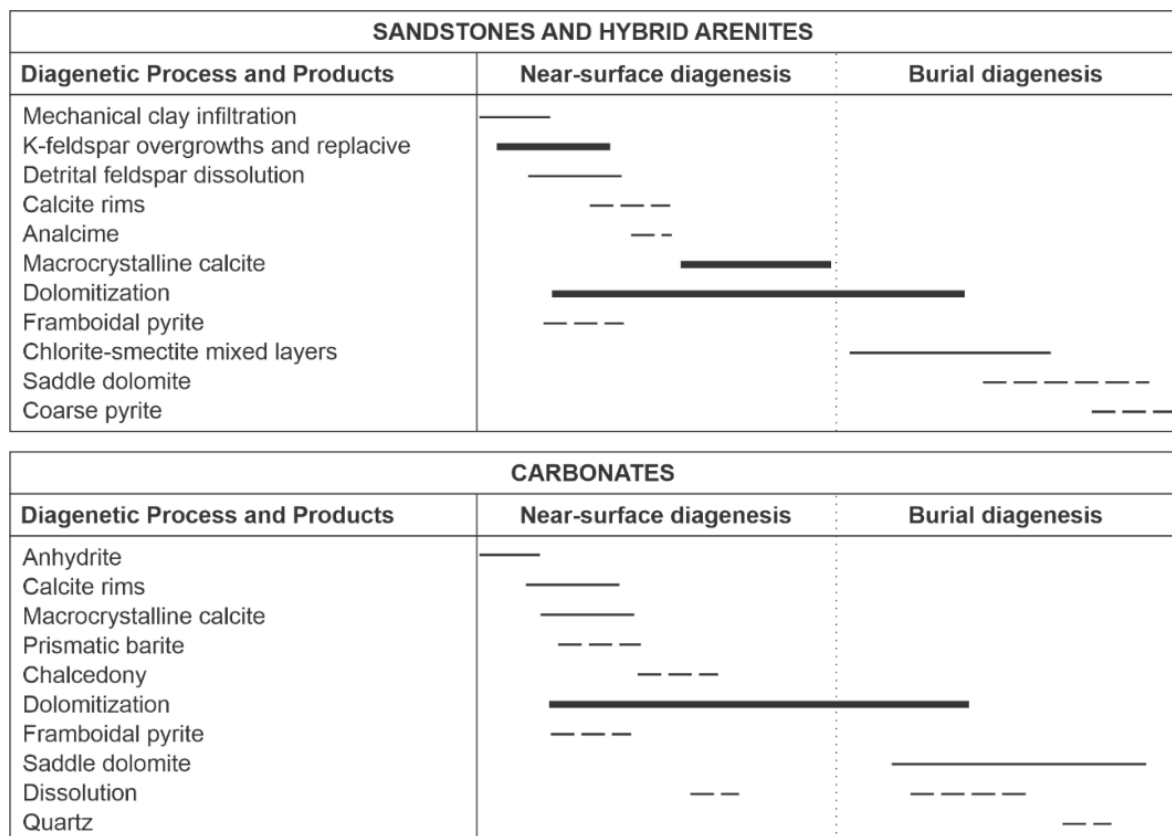


Figure 17. Interpreted main diagenetic sequences for the studied siliciclastic, hybrid and carbonate Oiteirinhos deposits. Thicker and dashed lines correspond to more and less intense processes and products, respectively.

Near-surface diagenesis

The lacustrine/lagoonal evaporitic conditions resulted in the precipitation of nodular anhydrite and dolomitization. With inflow of marine water, calcite cementation and framboidal pyrite were the characteristic products (Morad et al., 2010). Under continental dry climate conditions, the main products included clay infiltration, and the precipitation of calcite, barite, K-feldspar overgrowths, and analcime.

Displacive early fibrous anhydrite cementation in the intraclastic conglomerates were products of diagenesis under evaporitic conditions that persisted after the deposition of the Ibura evaporites. Such early anhydrite precipitation may have taken place from concentrated pore fluids in the capillary and upper phreatic zones beneath a sabkha surface, or under shallow subaqueous conditions within lacustrine/lagoonal bottom sediments (Dean et al., 1975; Warren, 2016).

Mechanical clay infiltration is a process characteristic of siliciclastic sediments deposited in subaerial environments under semi-arid climate (Walker et al., 1978; Moraes and De Ros, 1990). Considering the depositional conditions, it is more likely that such infiltration occurred when episodic floods percolating through the vadose zone of siliciclastic and hybrid sands concentrated the clays along the lowered phreatic level.

In the hybrid arenites and clastic sandstones devoid of infiltrated clays covering the grains, well-developed K-feldspar overgrowths were the first diagenetic products. They continuously cover the feldspar grains as well as feldspar dissolution pores, what indicates that they postdate, at least partially, the dissolution. Considering their association with the early overgrowths, the K-feldspar ingrowths that precipitated within dissolved feldspar grains were probably formed still under eodiagenetic conditions.

Authigenic K-feldspars are commonly precipitated under high K^+/H^+ ratio and silica activity conditions (Morad et al., 2000). The dissolution of detrital feldspars and rock fragments by meteoric waters may provide the ions necessary for such precipitation

(Morad et al., 1989). The dissolution of detrital K-feldspar was the source of K, Si, and Al ions for the precipitation of early K-feldspar overgrowths in British Permo-Triassic sandstones (Waugh, 1978). Early K-feldspar authigenesis can also be related to evaporitic environments. This process occurs due to the reflux of dense brines concentrated in K^+ through the sediments (Sandler et al., 2004). In the siliciclastic/evaporitic sequence of the Catalan Coastal Range, NE Spain, the abundance of K-feldspar in sabkha facies are attributed to greater availability of K^+ in evolved marine porewaters (Morad et al., 1995).

Calcite rims were the first cement formed in the hybrid arenites, preferentially covering the carbonate particles. The prismatic calcite rims may represent an early meteoric cement (James and Choquette, 1989). After the rims, macrocrystalline calcite cement, probably formed still owing to near-surface meteoric diagenesis, obliterated the intergranular porosity in some samples. However, part of the calcite rims may also be a product of neomorphism of aragonite fibrous rims precipitated near-surface by marine fluids (Moore and Wade, 2013), what would correspond to Araújo et al. (2009) suggestion that diagenesis may have partially occurred in a restricted environment with marine influence.

The pervasive dolomitization that affected the siliciclastic, hybrid, and carbonate rocks can be also related to eodiagenesis in evaporitic environments, most probably related to evaporitic seepage-reflux (Adams and Rhodes, 1960; Melim and Scholle, 2002). In evaporitic restrict lacustrine/lagoonal environments, anhydrite and gypsum precipitation remove calcium and sulfate from the water and increase the Mg/Ca ratio in the waters, which infiltrate into the bottom sediments due to their higher density (Kendall, 1989; Tucker, 2001). Dolomitization was one of the earliest diagenetic processes in the playa-lake deposits of Pimenta Bueno Formation, Parecis Basin, central Brazil, where dolomite precipitated as micro-rombs in playa-lake mudstones and dolosparite, associated with anhydrite growth (Goldberg et al., 2011).

In the studied microbial carbonate rocks, dolomite spherulites are relatively common. The spherulites are replacing the carbonate nodules within microbialites, which were later commonly dissolved and silicified. Bacteria-mediated precipitation of high Mg-calcite with fibrous radiated internal structure (spherulites) was promoted in some laboratory studies (e.g. Balci and Demirel, 2016; Al Disi et al., 2017). Al Disi et al. (2017) interpreted that aerobic bacteria may have contributed to the formation of high Mg-calcite in the Dohat Faishakh Sabkha samples, which has been suggested as a precursor to ordered dolomite. Unlike the magnesian clays associated with calcite spherulite in the Brazilian pre-salt deposits (Lima and De Ros, 2019), the mud associated to the Oiteirinhos dolomite spherulites has a mixed-layer C/S composition. Analcime precipitated in some hybrid arenites after the dissolution of carbonate particles, lining intraparticle and moldic porosity after calcite rims, and preceding macrocrystalline calcite cementation. Na-rich zeolites such as analcime, mordenite, phillipsite, natrolite, and clinoptilolite are commonly precipitated from sodium-rich brines in evaporative environments, and can be formed by the interaction of such highly concentrated brines with detrital clays (Warren, 2016).

In the Upper Yacoraite Formation, Western Argentina, analcime is more abundant in the transgressive intervals and can be interpreted as a diagenetic product that reflects a higher flux of freshwater into the evaporative lake (Gomes et al., 2020). Zeolites are also reported in the open-lacustrine proximal facies of the Parachute Creek Member of the Green River Formation, while in the more distal areas analcime is rare (Cole and Picard, 1978). Analcime frequently has its origin from precursor zeolites in saline-alkaline lake settings (Langella et al., 2001). The authigenesis of analcime is observed both in proximal and distal areas in hypersaline lakes, controlled by the alkalinity of the lake waters (Gomes et al., 2020).

The precipitation of prismatic barite filling vugular porosity in carbonate breccias may have also been related to evaporitic conditions (Warren, 2016), especially if Ba-rich brines, formed by the leaching of K-feldspars and micas by Cl-rich waters combine with

sulfate-rich waters from dissolution of sulfate evaporites (Warren, 2016). In the Yacorite Formation, barite is associated with silica and vuggy porosity, as result of highly evaporative periods followed by exposure and dissolution of carbonate (Gomes et al., 2020). A similar mineral association of dolomite, calcite, anhydrite, K-feldspar, chlorite/smectite, and barite was observed in the e sabkha/mudflat facies of the Middle Muschelkalk from the Catalan Coastal Range, NE Spain (Morad et al., 1995). The widespread framboidal and microcrystalline pyrite is probably related to bacterial sulfate reduction (Berner, 1984; Machel et al., 1995; Souza et al., 1995).

Burial diagenesis

During burial diagenesis, dolomitization continued and saddle dolomite filled vuggy and fracture porosity. Infiltrated smectites were transformed into C/S mixed layers and chlorite. Nodular and coarse pyrite precipitated replacing the previous products and filling intergranular porosity. Quartz cement filled dissolution porosity in microbialites.

Burial dolomite precipitate mainly in macrocrystalline and saddle morphologies, with a distribution, frequently controlled by fractures and residual porosity (Warren, 2000). Saddle dolomite is commonly precipitated during the burial at temperatures above 60°C (Spötl and Pitman, 1998), up to 150°C, equivalent to the oil window (Warren, 2000). Although often associated, saddle dolomite does not necessarily indicate hydrothermal activity (Machel, 2004). The saddle dolomite that fills fractures, vugular, and channel pores in the studied carbonate rocks may be attributed to mesodiagenetic precipitation from supersaturated solutions (Machel, 1987; Spötl and Pitman, 1998; Warren, 2000).

The transformation of infiltrated clays into C/S mixed-layers and chlorite is probably related to the flow of Mg-rich brines derived from evaporites during burial (Souza et al., 1995). Ion sources for chlorite authigenesis may include detrital and eodiagenetic smectites, ferromagnesian grains, and evaporites (Morad et al., 1995; Anjos et al.,

2009; Worden and Morad, 2009). Evaporative conditions lead to enrichment of Mg^{2+} and dissolved SiO_2 (Worden and Morad, 2009). An example of this is the increasing amount of C/S mixed-layer at the vicinity of sabkha/mudflat facies of the Middle Muschelkalk succession, related with the increasingly evaporative-marine conditions (Morad et al., 1995).

Coarse-crystalline and nodular pyrite was apparently the last diagenetic product in the studied rocks, replacing other diagenesis products and primary constituents, as well as locally filling the intergranular porosity. Coarse pyrite with such characteristics is normally ascribed to thermochemical sulfate reduction (Machel et al., 1995). Quartz that locally filled dissolution porosity in the microbialites may have originated from the dissolution of siliciclastic grains and clay minerals by evaporite-related alkaline fluids.

For comparison, it is important to notice that the diagenetic evolution of the Carmópolis Member, located below the evaporites of the Ibura Member, was directly influenced by fluids ascending through faults during burial (Souza et al., 1995; Schrank et al., 2017). These fluids promoted partial cementation and pervasive replacement of eodiagenetic carbonates by ferroan dolomite/ankerite (Souza et al., 1995). In contrast, the Oiteirinhos Member does not present this diagenetic evolution, indicating less influence of burial fluids, probably owing to the limitation of fluid flow during burial by the evaporite barriers.

7. RESERVOIR QUALITY ASPECTS

In general, the HST sandstones and hybrid arenites present the better potential to constitute reservoirs in the Oiteirinhos Member, despite their maximum petrographic porosity is of only slightly above 18%. These sandstones are predominantly medium-grained, moderately sorted, and present a lithic arkose composition, with intergranular and mica-expansive blocky dolomite as the main cement. K-feldspar overgrowths and

infiltrated clays affected moderately their permeability. The porosity in these facies was locally increased by the dissolution of detrital feldspars and carbonate particles.

Although the carbonate particles may act as source and nuclei for carbonate cementation, this is not observed in most of the coarser hybrid arenites, where the partial dissolution of carbonate particles contributed to better reservoir quality.

Considering the relations among siliciclastic composition, grain size, and porosity, the feldspathic litharenites display some tendency to have a finer texture and lower porosities than the lithic arkose sandstones (Fig. 18). The feldspathic litharenites show lower potential for porosity preservation and/or enhancement during diagenesis, owing to the compaction of low-grade metamorphic rock fragments.

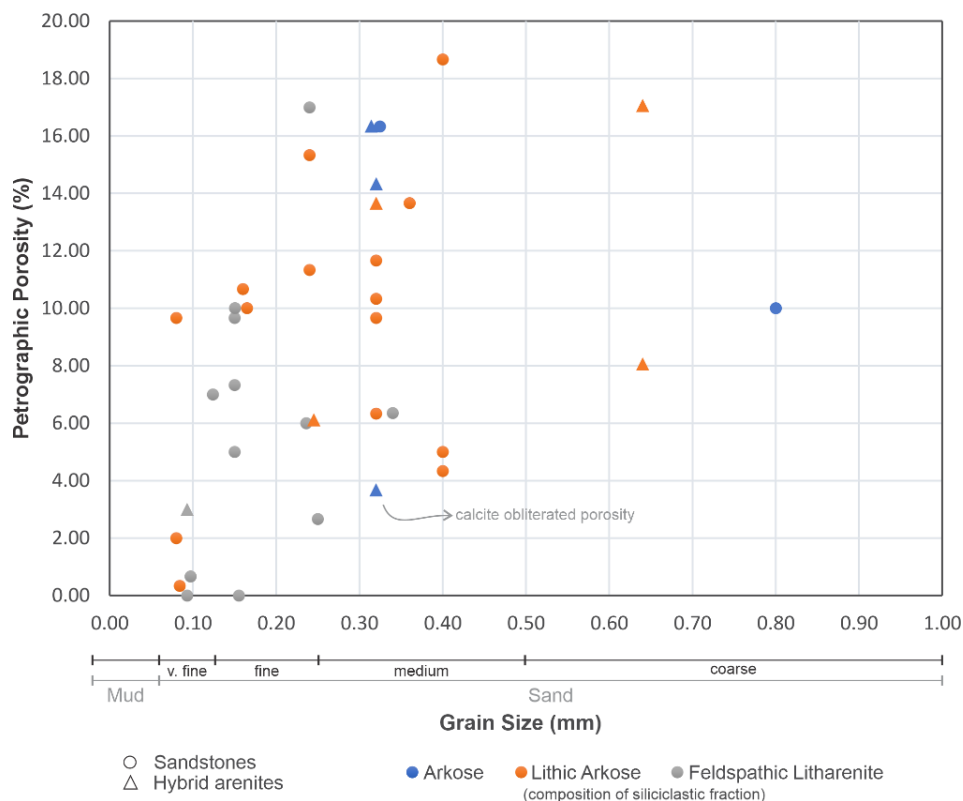


Figure 18. Petrographic porosity versus grain size, according to the original detrital composition of the sandstones and the siliciclastic fraction of hybrid arenites

The dolosparites, which display up to 15% intercrystalline porosity, seem to represent the best reservoir potential among the studied carbonate rocks. Fractured microbialites and carbonate breccias with dissolution porosity present porosities of up to 11%. However, the small pore size and cementation by prismatic calcite rims may impose a significant impact on the permeability of the carbonate breccias. Figure 19 shows examples of log signatures of the considered potential reservoir facies.

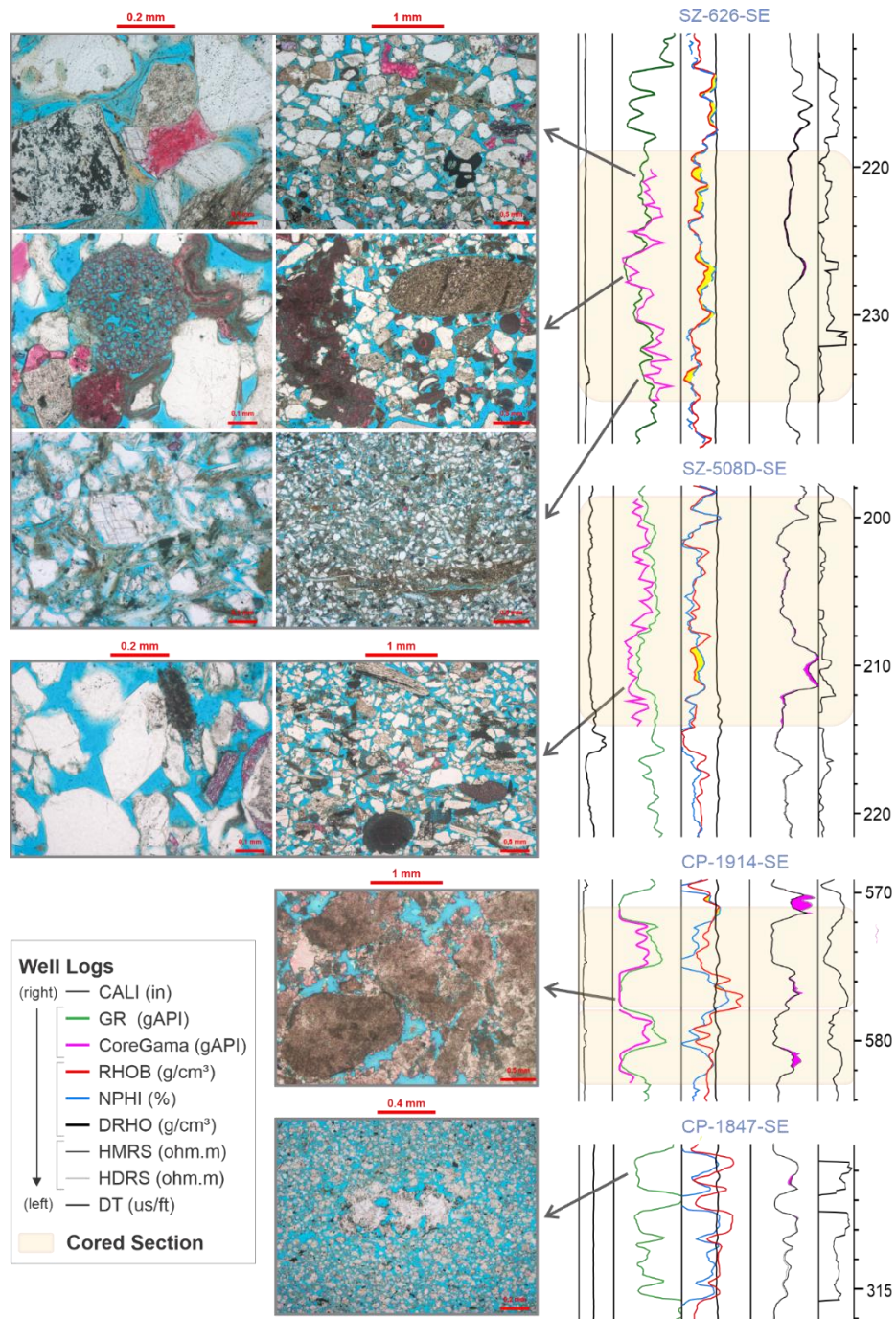


Figure 19. Examples of the petrographic and log aspects of potential reservoirs in the Oiteirinhos Member. Sandstones and hybrid arenites show the higher porosities. Among the carbonate rocks, breccias and dolosparites can represent potential reservoirs, but calcite rim cementation may reduce their permeability.

8. CONCLUSIONS

- The Upper Aptian Oiteirinhos Member from the Muribeca Formation of Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazilian margin, is characterized by a wide variety of sedimentary rocks, presenting a depositional and diagenetic variation considerably more significant than previously described.
- Carbonate rocks are represented by carbonate breccias, microbialites, dolosparites, calcilutites, calcisiltites, calcarenites and calcirudites.
- A diversity of textures is identified in the siliciclastic-carbonate hybrid rocks, which include marls, calcilutite/mudrock/marls heterolites, hybrid arenites, sandstones with micritic pseudomatrix, and intraclastic carbonate conglomerates with siliciclastic mud matrix.
- Shales, mudstone, and sandstones represent the siliciclastic deposits. The sandstones are litharenites and lithic arkoses (*sensu* Folk, 1980) rich in low-grade metasedimentary fragments from the erosion of Upper Proterozoic supracrustal orogenic terrains.
- The described depositional facies represent a transition from lacustrine-lagoonal environments to coastal marine conditions. Fine-grained carbonate and hybrid deposits predominate at the base up to the middle of the unit, interlayered with nodular anhydrite and carbonate breccias. These deposits were generated in environments with restricted circulation under arid climatic conditions. The transition to less restricted conditions is marked mainly by the occurrence of hybrid arenites.
- The peloidal and bioclastic calcarenites with the abundance of benthic foraminifers probably already had their deposition induced by shallow marine conditions.
- The main diagenetic process took place near-surface, under influence of evaporitic, dry climate continental, and marine conditions.
- Dolomite was the main diagenetic product, both as a replacive and cementing phase, in the siliciclastic, hybrid, and carbonate rocks. The pervasive dolomitization was mostly related to eodiagenesis in evaporitic environments. However, dolomite

formation continued during burial diagenesis, as indicated mainly by the occurrence of saddle dolomite.

- Others diagenetic constituents have an important, yet local, occurrence in the unit. Nodular anhydrite was formed during early, close to surface diagenesis, displacing mud deposits, and fibrous anhydrite cemented intraclastic conglomerate. Smectite coatings mechanically infiltrated by episodic floods were transformed into C/S mixed-layers upon burial. In sandstones devoid of infiltrated smectite coatings, K-feldspars overgrowths, calcite rims, and macrocrystalline pore-filling calcite are common.
- Although the studied siliciclastic sandstones and hybrid arenites show similar petrographic porosity, hybrid arenites may show slightly better reservoir potential, owing to the dissolution of carbonate particles, and to the larger dissolution of feldspars.
- The described facies and diagenetic products indicate that the environmental conditions were progressively less evaporative during the deposition of the Oiteirinhos Member. Anhydrite occurs in the Ibura/Oiteirinhos transition, followed by carbonates, hybrid, and siliciclastic deposits, and by marine carbonate sedimentation at the top of the succession, characterizing an evolution that would later develop towards oceanic conditions during the opening of the South Atlantic.
- The lithological variation observed in the Oiteirinhos Member implies rapid and frequent changes in the depositional environment, influenced by the climate, during the establishment of marine conditions in the opening in the South Atlantic margin.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Petrobras for granting access to the data, providing the thin sections, as well as for the authorization to publish this work. The Brazilian National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels – ANP is also acknowledged for data

access. The Brazilian National Research Council – CNPq is thanked for a scholarship granted to the first author.

REFERENCES

- Adams, J.E., Rhodes, M.L., 1960. Dolomitization By Seepage Refluxion. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.* 44, 1912–1920.
- Al Disi, Z.A., Jaoua, S., Bontognali, T.R.R., Attia, E.S.M., Al-Kuwari, H.A.A.S., Zouari, N., 2017. Evidence of a Role for Aerobic Bacteria in High Magnesium Carbonate Formation in the Evaporitic Environment of Dohat Faishakh Sabkha in Qatar. *Front. Environ. Sci.* 5, 1–11.
- Anjos, S.M.C., De Ros, L.F., Silva, C.M.A., 2003. Chlorite authigenesis and porosity preservation in the Upper Cretaceous marine sandstones of the Santos Basin, offshore eastern Brazil, in: Worden, R.H., Morad, S. (Eds.), *Clay Mineral Cements in Sandstones*. International Association of Sedimentologists, pp. 291–316.
- Aquino, G.S. De, Lana, M.D.C., 1990. Exploração na Bacia de Sergipe-Alagoas: o “estado da arte.” *Bol. Geociências da Petrobras* 4, 75–84.
- Araújo, C.C. de, Moretti Júnior, P.A., Madrucci, V., Carramal, N.G., Toczeck, A., Almeida, Â.B., 2009. Carbonatos aptianos do Campo de Carmópolis, Bacia de Sergipe-Alagoas: estratigrafia e modelo deposicional. *Bol. Geociências da Petrobras* 17, 311–330.
- Balci, N., Demirel, C., 2016. Formation of Carbonate Nanoglobules by a Mixed Natural Culture under Hypersaline Conditions. *Minerals* 6, 1–21.
- Berner, R.A., 1984. Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, 605–615.
- Bourillot, R., Vennin, E., Rouchy, J.M., Durllet, C., Rommevaux, V., Kolodka, C., Knap, F., 2010. Structure and evolution of a Messinian mixed carbonate-siliciclastic

-
- platform: the role of evaporites (Sorbas Basin, South-east Spain). *Sedimentology* 57, 477–512.
- Burne, R. V., Moore, L. s., 1987. Microbialites: Organosedimentary Deposits of Benthic Microbial Communities. *Palaios* 2, 241–254.
- Campos Neto, O.P. de A., Souza Lima, W., Gomes Cruz, F.E., 2007. Bacia de Sergipe-Alagoas. *Bol. Geociencias da Petrobras* 15, 405–415.
- Carvalho, Marcelo de Araújo, Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R., 2006. Paleoenvironmental reconstruction based on palynofacies analysis of the Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Northeastern Brazil. *Mar. Micropaleontol.* 59, 56–81.
- Carvalho, Marcelo de Araujo, Mendonça Filho, J.G., Menezes, T.R., 2006. Palynofacies and sequence stratigraphy of the Aptian-Albian of the Sergipe Basin, Brazil. *Sediment. Geol.* 192, 57–74.
- Chiarella, D., Longhitano, S.G., Tropeano, M., 2017. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments. *Mar. Pet. Geol.* 88, 617–627.
- Choquette, P.W., Pray, L.C., 1970. Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 54, 207–250.
- Cole, R.D., Picard, M.D., 1978. Comparative mineralogy of nearshore and offshore lacustrine lithofacies, Parachute Creek Member of the Green River Formation, Piceance Creek Basin, Colorado, and eastern Uinta Basin, Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89, 1441–1454.
- Cruz, L.R., 2008. Caracterização Tectono-Estratigráfica da Sequência Transicional na sub-bacia de Sergipe. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Cruz, L.R., Córdoba, V.C., Jardim De Sá, E.F., 2010. Análise estratigráfica e evolução geodinâmica da “Sequência Transicional” na porção sul da Bacia de Sergipe-Alagoas. *Bol. Geociencias da Petrobras* 18, 31–49.

- De Ros, L.F., Goldberg, K., Abel, M., Victorinetti, F., Mastella, L., Castro, E., 2007. Advanced Acquisition and Management of Petrographic Information from Reservoir Rocks Using the PETROLEDGE® System, in: AAPG Annual Convention and Exhibition. Long Beach, California. Expanded Abstracts, p. 6.
- Dean, W.E., Davies, G.R., Anderson, R.Y., 1975. Sedimentological significance of nodular and laminated anhydrite. *Geology* 3, 367–372.
- Dickinson, W.R., 1985. Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones, in: Zuffa, G.G. (Ed.), *Provenance of Arenites*. Springer, Dordrecht, pp. 333–361.
- Eugster, H.P., Hardie, L.A., 1975. Sedimentation in an Ancient Playa-Lake Complex: The Wilkins Peak Member of the Green River Formation of Wyoming. *Geol. Soc. Am. Bull.* 86, 319–334.
- Eugster, H.P., Surdam, R.C., 1973. Depositional Environment of the Green River Formation of Wyoming: A Preliminary Report. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84, 1115–1120.
- Falkenhein, F.U.H. et.al. 1986. Análise da Bacia Sergipe-Alagoas. Relatório Interno da PETROBRAS, s/n, Aracaju, 9 vol. com mapas, PETROBRAS/DEPEX/CENPES, 210p.
- Feijó, F.J., 1994. Bacias de Sergipe e Alagoas. *Bol. Geociências da Petrobras* 8, 149–161.
- Fischer, C.M., 2014. Formação Muribeca - Compilação de dados e interpretações dos membros Carmópolis, Ibura e Oiteirinhos. Petrobras Internal presentation - Laboratory of Sedimentology and Stratigraphy of Sergipe-Alagoas Operations Unit - Aracaju/SE.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of the Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Company. Austin, Texas.

- Garrett, P., 1970. Phanerozoic Stromatolites: Noncompetitive Ecologic Restriction by Grazing and Burrowing Animals. *Science* 69, 171–173.
- Goldberg, K., Morad, S., Al-Aasm, I.S., De Ros, L.F., 2011. Diagenesis of Paleozoic playa-lake and ephemeral-stream deposits from the Pimenta Bueno Formation, Siluro-Devonian (?) of the Parecis Basin, central Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 32, 58–74.
- Gomes, J.P.B., Bunevich, R.B., Tonietto, S.N., Alves, D.B., Santos, J.F., Whitaker, F.F., 2020. Climatic signals in lacustrine deposits of the Upper Yacoraite Formation, Western Argentina: Evidence from clay minerals, analcime, dolomite and fibrous calcite. *Sedimentology* 67, 2282–2309.
- Hovorka, S., 1987. Depositional environments of marine-dominated bedded halite, Permian San Andres Formation, Texas. *Sedimentology* 34, 1029–1054.
- James, N.P., Choquette, P.W., 1989. Diagenesis 9. Limestones: The meteoric diagenetic environment, in: Scholle, P.A., James, N.P., Read, J.F. (Eds.), *Carbonate Sedimentology and Petrology*. American Geophysical Union, pp. 45–78.
- Johnsson, M.J., 1993. The System Controlling the Composition of Clastic Sediments. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*
- Kendall, A.C., 1989. Brine mixing in the Middle Devonian of western Canada and its possible significance to regional dolomitization. *Sediment. Geol.* 64, 271–285.
- Koutsoukos, E.A.M., Mello, M.R., De Azambuja Filho, N.C., Hart, M.B., Maxwell, J.R., 1991. The Upper Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Brazil: an integrated paleoenvironmental assessment. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 75, 479–498.
- Langella, A., Cappelletti, P., De’Gennaro, R., 2001. Zeolites in closed hydrologic systems. *Rev. Mineral. Geochemistry* 45, 235–260.

- 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. *Sediment. Geol.* 383, 55–81.
- Lundell, L.L., Surdam, R.C., 1975. Playa-lake deposition: Green River Formation, Piceance Creek Basin, Colorado. *Geology* 3, 493–497.
- Machel, H.G., 2004. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 235, 7–63.
- Machel, H.G., Krouse, H.R., Sassen, R., 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Appl. Geochemistry* 10, 373–389.
- Melim, L.A., Scholle, P.A., 2002. Dolomitization of the Capitan Formation foreereef facies (Permian, west Texas and New Mexico): Seepage reflux revisited. *Sedimentology* 49, 1207–1227.
- Mohriak, W.U., 2003. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira, in: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais Do Brasil*. CPRM, Brasília, pp. 87–165.
- Moore, C.H., Wade, W.J., 2013. Marine diagenetic environment, in: Moore, C.H., Wade, W.J. (Eds.), *Developments in Sedimentology*. Elsevier, pp. 93–131.
- Morad, S., Al-Aasm, I.S., Longstaffe, F.J., Marfil, R., De Ros, L.F., Johanseny, H., Marzo, M., 1995. Diagenesis of a mixed siliciclastic/evaporitic sequence of the Middle Muschelkalk (Middle Triassic), the Catalan Coastal Range, NE Spain. *Sedimentology* 42, 749–768.
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J.M., De Ros, L.F., 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional fades and sequence stratigraphy. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 94, 1267–1309.
- Morad, S., Ketzer, J.M., De Ros, L.R., 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: Implications for mass transfer in

- sedimentary basins. *Sedimentology* 47, 95–120.
- Morad, S., Marfil, R., De La Peña, J.A., 1989. Diagenetic K-feldspar pseudomorphs in the Triassic Buntsandstein sandstones of the Iberian Range, Spain. *Sedimentology* 36, 635–650.
- Moraes, M.A.S., De Ros, L.F., 1990. Infiltrated clays in fluvial Jurassic sandstones of Reconcavo Basin, northeastern Brazil. *J. Sediment. Petrol.* 60, 809–819.
- Mount, J.F., 1984. Mixing of Siliciclastic and Carbonate Sediments in Shallow Shelf Environments. *Geology* 12, 432–435.
- Sandler, A., Harlavan, Y., Steinitz, G., 2004. Early formation of K-feldspar in shallow-marine sediments at near-surface temperatures (southern Israel): Evidence from K-Ar dating. *Sedimentology* 51, 323–338.
- Schrank, A.B.S., Altenhofen, S.D., De Ros, L.F., 2017. Diagenetic preservation and modification of porosity in aptian lithic reservoirs from the sergipe-alagoas basin, Ne Brazil. *J. Sediment. Res.* 87, 1156–1175.
- Selley, R.C., 2005. Sedimentary Rocks| Mineralogy and Classification, in: *Encyclopedia of Geology*. Elsevier, London, pp. 25–37.
- Souza-Lima, W., 2008. Sequencias Evaporíticas da Bacia de Sergipe-Alagoas, in: Mohriak, W., Szatmari, P. & Anjos, S.M.C. (org) (Eds.), *Sal: Geologia e Tectônica Exemplo Nas Bacias Brasileiras*. Beca Edições Ltda, São Paulo, pp. 232–251.
- Souza, R.S. de, De Ros, L.F., Morad, S., 1995. Dolomite Diagenesis and Porosity Preservation in Lithic Reservoirs: Carmopolis Member, Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazil. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 79, 725–748.
- Spötl, C., Pitman, J.K., 1998. Saddle (baroque) dolomite in carbonates and sandstones: a reappraisal of a burial-diagenetic concept, in: Morad, S. (Ed.), *Carbonate Cementation in Sandstones*. International Association of Sedimentologists - Blackwell Scientific Publications, pp. 437–460.

- Swennen, R., Viane, W., Cornelissen, C., 1990. Petrography and geochemistry of the Belle Roche breccia (lower Visean, Belgium): evidence for brecciation by evaporite dissolution. *Sedimentology* 37, 859–878.
- Szatmari, P., Carvalho, R.S., Simões, I.A., 1979. A comparison of evaporite facies in the late Paleozoic Amazon and the middle cretaceous South Atlantic Salt Basins. *Econ. Geol.* 74, 432–447.
- Tucker, M., 1988. *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Tucker, M.E., 2001. *Sedimentary petrology - An introduction to the origin of sedimentary rocks*, Third edit. ed, Geoscience Texts. Blackwell Science.
- Van der Ven, P. H., Cainelli, C. e Fernandes, G. J. F. 1989. Bacia Sergipe-Alagoas: Geologia e Exploração. *Bol. Geoc. Petrobras*, 3 (4): 307-319.
- Walker, T.R., Waugh, B., Grone, A.J., 1978. Diagenesis in first-cycle desert alluvium of Cenozoic age, southwestern United States and northwestern Mexico. *Bull. Geol. Soc. Am.* 89, 19–32.
- Warren, J., 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Rev.* 52, 1–80.
- Warren, J.K., 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*, 2nd ed, Diagenesis. Springer International Publishing, Switzerland.
- Waugh, B., 1978. Authigenic K-feldspar in British Permo-Triassic sandstones. *J. Geol. Soc. London.* 135, 51–56.
- Worden, R.H., Morad, S., 2009. *Clay Minerals in Sandstones: Controls on Formation, Distribution and Evolution, Clay Mineral Cements in Sandstones*.
- Zuffa, G.G., 1985. *Optical Analysis of Arenites: influence of methodology on composition results, Provenance of Arenites*. NATO-ASI Series C. D. Reidel Pub. Co, Dordrecht.

9. ANEXOS

Anexo I. Perfis integrados dos testemunhos

Anexo II. Tabela de resultados de petrografia quantitativa

Anexo III. Descrições petrográficas individuais

Anexo IV. Documentação fotomicrográfica

Anexo V. Resultados das análises de microscopia eletrônica de varredura com suporte EDS

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
Condições Depositionais e Padrões Diagenéticos do Membro Oiteirinhos, Bacia de Sergipe-Alagoas
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: MARIANE CRISTINA TROMBETTA □
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros
Examinador: Profa. Dra. ANA MARIA PIMENTEL MIZUSAKI
Data: 16/07/2021
Conceito: B
PARECER:
<p>O volume da dissertação cumpre os requisitos exigidos pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS (PPGGEO) apresentando um capítulo introdutório, manuscrito de artigo e a respectiva carta de submissão em periódico técnico.</p> <p>Sugere-se que o volume passe por uma revisão pois há erros ortográficos, de crase, maiúsculas e plurais além de pequenos problemas de digitalização. Torna-se necessário ainda uniformizar a apresentação das referências bibliográficas pois, por exemplo, observa-se (Dorsey & Kidwell, 1999) e (Dorsey and Kidwell, 1999), além de outros pontos (como figuras) que não seguem um formato único.</p> <p>O capítulo 3. ESTADO DA ARTE apresenta um bom referencial bibliográfico porém seria adequado incluir algumas referências mais recentes. A forma de apresentação e a linguagem também podem ser revistas pois o texto, em certas partes, está confuso. Alguns pontos como o segundo parágrafo da página 17 aparentemente são relacionados a tradução. O mesmo pode ser comentado de alguns termos técnicos cuja tradução é discutível.</p> <p>O sub-item -3.2.2. Diagênese e potencial qualidade como reservatórios (relacionado ao item 3.2. Depósitos microbiais associados a evaporitos) apresenta texto sobre a diagênese mas não se consegue ver nenhuma relação com a qualidade de reservatórios.</p> <p>O capítulo 4. MATERIAIS E MÉTODO - comenta que “Os métodos adotados neste estudo compreenderam: revisão bibliográfica, petrografia quantitativa, aquisição fotomicrográfica, microscopia eletrônica de varredura, e integração dos dados e resultados obtidos”. Em relação a petrografia foram descritas 69 lâminas delgadas de cinco poços testemunhados (página 27). Na figura 6 (página 31) onde é apresentada a localização dos poços estudados e também no manuscrito do artigo, comenta-se que foram analisados três poços no campo de Siririzinho e um no campo de Carmópolis. É um erro de digitação ou foram analisados os 5 poços e depois somente quatro foram utilizados? Neste caso, qual seria o motivo?</p> <p>Os poços poderiam ser identificados tanto na figura 6 do capítulo inicial como na figura 1 do artigo pois as siglas são posteriormente colocadas no manuscrito e em figuras (como na página 73, figura10). Outro ponto que traz dúvidas refere-se aos testemunhos, suas metragens e características que não são descritos. Posteriormente comenta-se também que 3 poços tem testemunhos convencionais e um poço seria uma amostragem lateral.</p>

Na página 29, item - 4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura, não há referência bibliográfica quanto ao protocolo destas análises.

O item 4.5. Integração dos dados (página 30) relata que a integração envolveu, entre outros dados, a geração de perfis combinando informações e dados estratigráficos, sedimentológicos, geofísicos....” As descrições dos testemunhos e a análise de perfis elétricos foram realizados pela autora? Os dados geofísicos? Sugere-se que estas técnicas sejam incluídas na metodologia mas destacando o que foi realizado pela autora e o que é de referência bibliográfica.

O item 5. ÁREA DE ESTUDO - comenta sobre outras bacias como as do Recôncavo e Tucano (página 36) sendo interessante indicar estas bacias talvez na figura 6 (?).

Na página 42 - “O estudo integrado dos dados estratigráficos, sedimentológicos, geofísicos e petrográficos do Membro Oiteirinhos, Formação Muribeca (Aptiano) da Bacia Sergipe-Alagoas, permitiu identificar uma ampla variedade de rochas sedimentares.” Aqui questiona-se o uso do termo Bacia de Sergipe-Alagoas. Pelo apresentado anteriormente, o Membro Oiteirinhos ocorre no Alto de Aracaju, sub-bacia de Sergipe e com maiores registros na porção tendendo para offshore. Não ocorreria na sub-bacia de Alagoas (página 34, figura 8). Na página 41, inclusive, cita-se a sub-bacia de Sergipe e na página 40, Bacia de Sergipe.

O manuscrito submetido ao periódico “Cretaceous Research” apresenta os resultados, interpretações e discussões da pesquisa. O texto do manuscrito será analisado pelos revisores da revista mas pequenos comentários podem ser feitos. Um dos pontos questionáveis refere-se a não identificação dos poços e pontos onde amostras foram coletadas para a confecção de lâminas petrográficas, que considero essenciais para a correta análise dos resultados e das interpretações. As fotomicrografias não tem nenhuma identificação tanto em termos de poço (no Campo de Carmópolis ou Siririzinho ?), testemunho amostrado como profundidade.

Na página 61, qual a legenda para a figura 3?

Na página 63, na figura 5 falta a descrição da fotomicrografia “C”. Seria recomendável também rever as descrições no texto e o que foi colocado na respectiva legenda da fotomicrografia.

Na figura 6, foto F, o intraclasto argiloso não sofreu nenhum tipo de compactação/deformação?

As Tabelas 1 e 3 parecem estar repetidas.

Na página 68, 4.1.Facies and Facies Associations – comenta-se que as fácies e associações de fácies foram compiladas de descrições sedimentológicas de 8 testemunhos relativos a três poços e amostras laterais de outro poço. A Tabela 2 (página 70) apresenta estas informações. A Tabela 2 foi confeccionada pela autora? Quais os critérios utilizados para a definição das fácies e associações nos testemunhos?

Como foi definido o contato entre o Membro Ibura e o Membro Oiteirinhos ?

A figura 10 apresenta a perfilagem elétrica dos poços analisados. Somente comenta-se sobre o perfil de raios gama. Os outros perfis elétricos não foram utilizados? Quais as características do Membro Oiteirinhos em perfilagem?

Observa-se que os poços do campo de Siririzinho, de acordo com o datum apresentam o Membro Oiteirinhos em profundidades médias entre 200 e 300 metros. No campo de Carmópolis, as profundidades são maiores. Seria um condicionamento tectônico?

Na figura 11, incluir uma legenda e a escala.

Na figura 12, o perfil é o de raios gama? Escala? A profundidade está em metros?

Na figura 13, foto H, o que levou a identificar o interestratificado clorita-esmectita e “pontes” de clorita (ou esmectita?)

Considero que o volume apresentado pela autora está de acordo com o exigido para

uma dissertação de mestrado. As observações acima tem como intuito contribuir para aprimorar o trabalho realizado. Parabenizo a autora e orientador pelo trabalho realizado.

Assinatura: 

Data: 16/07/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
Condições Depositionais e Padrões Diagenéticos do Membro Oiteirinhos, Bacia de Sergipe-Alagoas
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: MARIANE CRISTINA TROMBETTA
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros
Examinador: Profa. Dra. MARCELA MARQUES VIEIRA
Data: 14/07/2021
Conceito: A (EXCELENTE)
PARECER:
<p><i>As três partes desta dissertação (pré-artigo, artigo e anexos) encontram-se muito bem redigidas, organizadas e ilustradas. Foram observados os seguintes erros de digitação, os quais, pela pouca quantidade, não comprometem a qualidade do texto:</i></p> <p>“... relevam revelam? condições progressivamente menos evaporíticas durante a deposição do Membro ...” (RESUMO)</p> <p>“... deste estudo, é a unidade que registra o início das condições marinhas na bacia se de? ...” (página 11)</p> <p>“... climáticas estão diretamente relacionadas à evolução deposicional e diagenéticas diagenética? de ...” (página 11)</p> <p>“... margem leste Brasileiras brasileira?.” (página 12)</p> <p>“... partículas carbonática carbonáticas?, comumente a cimentação concentra-se em torno das ...” (página 17)</p> <p>“... segundo uma classificação de alta hierarquia, baseada nos conceitos de (Zuffa, 1980) Zuffa (1980)?. Posteriormente, as rochas siliciclásticas foram classificadas de acordo com (Folk, 1980) Folk (1980)?, ...” (página 29)</p> <p>“... foi mantida a subdivisão proposta por (Feijó, 1994) Feijó (1994)?.” (Página 40)</p> <p>“... eventos de deposição de anidrita (Carvalho <i>et al.</i>, 2006a). O No? intervalo II ocorre a ...” (página 41)</p> <p>“A variação litológica observada no Membro Oiteirinhos implica em em rápidas e ...” (página 45)</p> <p>“... aconteceram sob sob próximo à superfície, influenciadas por condições evaporíticas, ...” (página 45)</p> <p>“... Yacorite Formation, barite is associated d with silica and vuggy porosity, as result of highly ...” (página 91)</p> <p><i>Seguem algumas dúvidas, observações e sugestões sobre a dissertação:</i></p>
<p>Figura 4. Texturas carbonáticas evaporíticas em ambientes costeiros e subaquosos (Warren, 2016).</p>

→ A figura que está entre “Laminitos fraturados...” e “Estromatolitos...” são gretas de contração?

Figure 4. Textural classification of the studied siliciclastic (green), carbonate (blue) and hybrid (red) particulate rocks.

→ Classificação baseada em que autor? Ela se aplica às rochas híbridas e carbonáticas, também?

Figure 5. Examples of **main textural** characteristics of the siliciclastic samples. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Cross-lamination in a mud-sand heterolith. B) Medium-grained sandstone with irregular lamination marked by grain size variation. **C)????**

→ Sugestão: modificar para “Examples of sedimentary structures found in siliciclastic samples ...”. Apesar de as estruturas se caracterizarem pela diferença nas características texturais, acho melhor que a ênfase seja dada às estruturas.

Figure 6. Examples of main **textural** NÃO SOMENTE TEXTURAIIS, MAS COMPOSICIONAIS, TAMBÉM characteristics of the hybrid samples. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Marl constituted by the intercalation of organic siliciclastic mud and dolomitized micrite, with phosphate bioclasts and a diagenetic phosphate nodule. B) Fine-grained hybrid arenite with levels of carbonate peloids compacted to pseudomatrix. C) Carbonate intraclast in conglomeratic medium-grained hybrid arenite. D) Medium-grained hybrid arenite with carbonate **oids** APENAS OÓIDES APARECEM TINGIDOS? PARECE HAVER PELÓIDES, TAMBÉM (stained pink). E) Intraclastic conglomerate with microbial intraclasts (stained pink) and siliciclastic sand. F) Conglomeratic hybrid arenite with large mud intraclasts and siliciclastic sand.

→ SUGESTÃO: colocar letras e setas para indicar as feições nas fotos, como, por exemplo os bioclastos fosfáticos.

Figure 7. Examples of main textural characteristics of the carbonate samples. All photomicrographs with uncrossed polarizers. A) Dolosparite with the blocky dolomite surrounding **fracture** porosity. B) Concretionary microbialite (stained pink) grown in organic siliciclastic mud. C) Peloidal calcarenite with some echinoderm bioclasts and quartz grains. D) Recrystallized bioclastic calcarenite with abundant benthic foraminiferous bioclasts and ostracodes (stained pink). E) Partially dolomitized oncolitic calcirudite. F) Carbonate breccia with calcite filling and surrounding **fracture** porosity.

→ Trata-se de porosidade de fatura, mesmo?

Table 1. Maximum and average values of main **primary** DIAGENÉTICOS + POROSIDADE? constituents.

→ SUGESTÃO: valores totais deveriam vir após os valores individuais. Por exemplo, dolomita total, após os três tipos de dolomita.

→ DÚVIDA: porosidade é um constituinte?

→ REPETIÇÃO DA TABELA 3

Figure 11. Characteristic vertical facies succession with photomicrographs of some representative rock types.

→ SUGESTÃO: legenda para mostrar as litologias e estruturas. Faltam limites dos valores do GR e coregama, no eixo horizontal. Fazer menção às correspondências com as letras A, B1, B2, B3, C1, C2 e C3 da figura 10.

Figure 12. Photomicrographs of some representative rock types of sidewall samples.

→ SUGESTÃO: comentar algumas feições das fotos na legenda.

Table 3. Average and maximum volume of the main diagenetic constituents.

→ REPETIÇÃO DA TABELA 1

In the alkaline lacustrine system of the **Green River Formation** mudstones, marls, calcarenites, and sandstones were deposited by episodic flooding of the playa flats fringing the alkaline lake (Eugster and Surdam, 1973).

→ SUGESTÃO: Informar a que Bacia (com localização) pertence esta formação.

Figure 16. Schematic block diagrams illustrating the depositional evolution of the Oiteirinhos Member, corresponding to lowstand, transgressive, and highstand system tracts (modified from Cruz et al., 2010).

→ DÚVIDA: Não haveria influxo de terrígenos, a partir da rocha-fonte (Membro Carmópolis?)?

6.1. Depositional environments and stratigraphic framework

→ SUGESTÃO: O texto está baseado, predominantemente, em trabalhos de outros autores. Não está claro, salvo em alguns trechos, a contribuição deste trabalho, com referência às fácies descritas na tabela 2 e às fotos dos testemunhos.

Finalizo este parecer, ratificando que a dissertação atende ao objetivo de um curso de mestrado, razão pela qual sou favorável a sua APROVAÇÃO com conceito A (EXCELENTE).

Assinatura:



Data: 14/07/21

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
Condições Depositionais e Padrões Diagenéticos do Membro Oiteirinhos, Bacia de Sergipe-Alagoas
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: MARIANE CRISTINA TROMBETTA
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros
Examinador: Prof. Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli
Data: 13/07/2021
Conceito: B
PARECER:
<p>A dissertação de mestrado de Mariane Trombetta apresenta a caracterização petrológica do Membro Oiteirinhos (Formação Muribeca), com resultados e discussões petrológicas e diagenéticas da transição continental-marinha da Bacia SEAL durante o período da abertura do Oceano Atlântico Sul. A pesquisa inclui sucessões sedimentares de intervalos siliciclástico-carbonáticos (híbridos), e também evaporíticos, com mediação biogênica significativa, desenvolvidas em cenários climático e paleogeográfico complexos. A dissertação está estruturada em dois textos. O primeiro (pré-artigo) apresenta uma revisão bem organizada e muito bem escrita sobre conceitos, em especial controles deposicionais e potencial qualidade como reservatórios, e o estado da arte da sucessão de interesse (tarefa difícil frente a escassez de material para o intervalo em questão). Minhas únicas críticas em relação a esse primeiro texto referem-se a: 1) entendo que os objetivos específicos a) e b) sejam etapas metodológicas, não objetivos propriamente ditos; 2) ausência de como os dados de perfilagem de poço foram analisados, processados e utilizados na pesquisa; 3) algumas frases soltas, a exemplo do parágrafo relacionado aos <i>tepees</i> (ver pg. 25). No entanto, nenhuma dessas objeções causam prejuízo à leitura e compreensão do texto ou comprometem a qualidade final da dissertação.</p> <p>Em relação ao texto do artigo, comento abaixo aspectos que considero úteis para o seguimento do processo de revisão do manuscrito no periódico <i>Cretaceous Research</i>.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) A introdução não apresenta elementos obrigatórios, como hipótese de trabalho e o <i>gap</i> de conhecimento que o trabalho vai buscar contribuir ou solucionar. Ou seja, o problema científico, muito relevante nesta pesquisa, resume-se (no item Introduction) a informar o leitor que trata-se da primeira caracterização petrológica do Mb. Oiteirinhos. 2) A relação da evolução deposicional do Mb. Oiteirinhos com o contexto da abertura do Atlântico Sul foi indicada no texto mas, de fato, não constituiu o foco do trabalho. Acredito que haja dados suficientes para que esse vínculo

seja melhor explorado no manuscrito, dado o interesse científico neste tema.

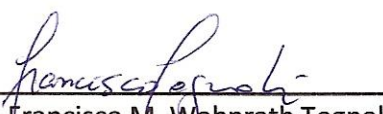
- 3) Em relação à linguagem, uma leitura cuidadosa revelará pequenos problemas de grafia, a exemplo do uso da palavra *metasediments* ao invés de *metasedimentary rocks* (ver pg. 58), dentre outras. Muitas frases e parágrafos apresentam uma estrutura de linguagem nitidamente de origem portuguesa/brasileira. Isso é comum em escritores não-nativos e não considero um problema grave. No entanto, no decorrer do processo de avaliação do manuscrito poderá ser indicado a necessidade de uma revisão formal para adequação do estilo de linguagem.
- 4) O item *Methods* apresenta um descritivo das atividades de análise petrológica que se mostrou demasiadamente sucinto a partir da leitura dos itens de texto subsequentes. Cito como exemplo os resultados de classificação litológica e de proveniência apresentados como resultados, mas sequer mencionados no item *Methods*. Além disso, dados de perfilagem foram apresentados em resultados (integrados a dados petrográficos), mas não foram mencionados no item *Methods*. Do ponto de vista científico, o item *Material and Methods* deve apresentar os materiais utilizados e a estrutura metodológica proposta para obter resultados, passível de ser reproduzida por outros pesquisadores interessados.
- 5) Falta na Fig. 5 a descrição da fotomicrografia C na legenda de texto da figura.
- 6) Como sedimentólogo/estratígrafo, sinto falta de uma coluna de processos na Tabela 2 (item 4.1), que registra as estruturas sedimentares, as fácies e associações de fácies e descrição. Os processos sedimentares são elementos-chave para associar os elementos mencionados anteriormente com a interpretação dos depósitos. Geralmente trabalhos de cunho estritamente petrográfico (leia-se microscopia) não consideram tais informações. Mas como este trabalho teve a oportunidade de realizar a análise faciológica dos testemunhos de sondagem, a inclusão de uma coluna com os processos relacionados a cada fácies/associação de fácies valorizará ainda mais os resultados obtidos. Isso se faz necessário especialmente em razão de terem sido geradas representações da evolução deposicional do Mb. Oiteirinhos, apresentadas na Fig. 16 do artigo.
- 7) O item 4.1 – Facies and Facies Associations apresenta de forma repentina informações e figuras relacionadas a dados de perfilagem. Minha experiência com análise de perfis de poços e modelagem de eletrofácies permitiu entender a tentativa de relação entre as características dos perfis e as fácies reconhecidas e descritas em lâminas petrográficas. No entanto, destaco que essa tarefa será de grande dificuldade para o leitor em razão de não haver menção anterior aos dados de perfilagem (ex: item *Methods*), de não haver um item do artigo específico para a apresentação dos padrões de perfis e seu significado, da dificuldade de ler as curvas sobrepostas na seção estratigráfica da Fig. 10, da falta de escala horizontal para os perfis caliper, gama, densidade, neutrão, correção de densidade, resistividade e sônico (que impede, por exemplo, de verificar potenciais problemas de leitura ou mesmo de verificar o valor de porosidade a partir da leitura direta dos perfis) e da ausência na legenda do significado das letras A, B e C.
- 8) Especificamente nas Figs. 11 e 12, é nítida a variabilidade textural,

composicional e de porosidade ao longo das sucessões dos poços mostrados. Mas considerando o propósito multiescalar do estudo, recomendo indicar as associações de fácies nos intervalos mostrados, como forma do leitor ter subsídios para relacionar a variabilidade faciológica lateral e os padrões de porosidade em diferentes intervalos estratigráficos. Além disso, falta uma legenda que informe o leitor sobre os perfis mostrados (GR e CGR) e as fácies no perfil colunar (os símbolos e cores utilizados no AnaSeTe nem sempre correspondem aos símbolos clássicos utilizados na representação das fácies).

- 9) A partir da Fig. 10, todas as legendas de texto das figuras são demasiadamente sucintas. Há aspectos informativos que podem ser inseridos nas legendas para orientar o leitor sobre elementos fundamentais a serem observados.
- 10) Usualmente usa-se siglas para poços de companhias petrolíferas, inclusive para poços de campos maduros. A autora possui autorização para publicação destes poços com suas identificações?
- 11) Há uma citação ao trabalho de Goldberg et al (2011), na página 89, que considero imprópria. No caso desta citação ser indispensável, há que estabelecer vínculo entre o que foi relatado na Bacia do Parecis com aquilo que a autora identificou na Bacia SEAL.
- 12) Os anexos mencionados no item 9 não foram encontrados no arquivo da dissertação, de forma que não foram analisados para a elaboração deste parecer.

Por fim, gostaria de agradecer pelo convite e pela oportunidade de compor esta banca. Os itens elencados acima são sugestões de melhoria que poderão ser úteis durante o processo de revisão do artigo. A aluna Mariane Trombetta teve a oportunidade de desenvolver pesquisa em uma sucessão sedimentar faciológica e diageneticamente muito variada e complexa, cheia de desafios. Desejo-lhe sucesso nas próximas etapas acadêmicas e/ou profissionais.

O conjunto de imperfeições no trabalho não comprometem a qualidade da formação da aluna, mas me impedem de atribuir a nota máxima. De qualquer forma, reitero que considero o trabalho Muito Bom, opção que gostaria de ter encontrado nos conceitos de avaliação.

Assinatura:  Prof. Dr. Francisco M. Wohnrath Tognoli Data: 13/07/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: