

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



**Formação Coqueiros (Cretáceo, Aptiano), Bacia de Campos – uma
visão com base em análise faciológica e estratigrafia de sequências**

Thiago Alduini Mizuno

ORIENTADORA:

Prof^a. Dr^a. Ana Maria Pimentel Mizusaki

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rualdo Menegat (UFRGS)

Dra. Carla Klein (CPRM)

Dr. Francisco Eduardo Gomes da Cruz (PETROBRÁS)

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Geociências

Porto Alegre, 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Alduini Mizuno, Thiago

Formação Coqueiros (Cretáceo, Aptiano), Bacia de Campos - uma visão com base em análise faciológica e estratigrafia de sequências / Thiago Alduini Mizuno. -- 2018.

59 f.

Orientador: Ana Maria Pimentel Mizusaki.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Carbonato lacustre. 2. Bacia de Campos. 3. Coquina. 4. Estratigrafia de sequencias. I. Pimentel Mizusaki, Ana Maria, orient. II. Título.

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Petrobras pelo apoio financeiro e fornecimento dos dados que foram essenciais à elaboração deste estudo, estendo o agradecimento ao Instituto de Geociências da UFRGS, bem como a todos os profissionais do PPGGEO em especial a minha orientadora Ana Maria Pimentel Mizusaki, pelas discussões e criteriosa revisão do texto. Agradeço também ao colega Cristianini Trescastro Bergue, pelo auxílio na tradução do artigo e a Patrícia Zacca pela ajuda com as figuras.

Tenho um agradecimento especial aos colegas de trabalho envolvidos no projeto de P&D: “Uma abordagem atualizada das fácies, associações de fácies e seu controle deposicional no andar Jiquiá dos campos de Badejo, Linguado, Trilha e Pampo”, Ana Carla Bizotto, Carolina Correia, Eduardo Roemers Oliveira, João Paulo Olivito e Ricardo Lykawka, pelo apoio na descrição de amostras, análise e interpretação dos dados.

Por fim agradeço a minha família que sempre me apoiou em todos os momentos da minha vida, minha mãe Gleis Rosana Alduini, meu pai Eurico Tsutomu Mizuno e minha irmã Thais Alduini Mizuno.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da Bacia de Campos, destacando os campos de Badejo, Linguado, Trilha e Pampo (modificado Bruhn <i>et al.</i> , 2003).....	12
Figura 2 - Carta estratigráfica da Bacia de Campos com destaque para o intervalo analisado (modificado Winter <i>et al.</i> , 2007).....	14
Figura 3 - Formações litoestratigráficas e seqüências do Grupo Lagoa Feia (modificado Winter <i>et al.</i> , 2007).....	17
Figura 4 - Perfil típico do Grupo Lagoa Feia mostrando as idades, andares locais, perfis elétricos (GR=raios gama; IND = indução; SONIC = sônico) e as seqüências (modificado de Dias <i>et al.</i> , 1988)	21
Figura 5- Modelo paleogeográfico da seqüência, ressaltando a presença das coquinas em altos do embasamento. Extraído de Guardado <i>et al.</i> (1989)	22
Figura 6 - Bloco diagrama mostrando o contexto estrutural, associações de fácies e ambientes deposicionais para sedimentos siliciclásticos e carbonáticos. Extraído de Muniz (2013).....	22
5	
Figura 7 - Classificação para rochas carbonáticas (modificado de Dunham, 1962 e Embry & Klovan, 1971).....	25
Figura 8- Classes sugeridas para a quantificação dos parâmetros tafonômicos (proposição do autor).....	25
Figura 9 - Metodologia aplicada para a descrição e identificação das fácies (proposição do autor).....	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Evolução da classificação litoestratigráfica do Grupo Lagoa Feia (modificado Schaller, 1973; Rangel <i>et al.</i> , 1994; Winter <i>et al.</i> , 2007).....	15
--	----

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Bacia de Campos.....	11
2.1 Litoestratigrafia.....	14
Formação Atafona.....	15
Formação Itabapoana.....	16
Formação Coqueiros.....	16
Formação Macabu.....	16
Formação Gargaú	16
Formação Retiro.....	17
2.2 Sequências do Grupo Lagoa Feia.....	17
2.3 Evolução do entendimento das fácies e do modelo deposicional da sequência das “Coquinas”	18
3. Métodos de estudo.....	23
4. Resultados obtidos	26
5. Conclusões	26
6. Referências bibliográficas.....	27
7. Carta de submissão.....	30
8. Artigo Submetido.....	31

RESUMO

Na costa do leste do Brasil, destacam-se importantes acumulações de carbonatos lacustres do Cretáceo (Aptiano) relacionadas à fase de *rift* que precede a abertura do Oceano Atlântico, estes carbonatos consistem principalmente em espessos pacotes de bivalves associados a sedimentos siliciclásticos finos. Na bacia de Campos este intervalo equivale a Formação Coqueiros e é portador de hidrocarbonetos sendo reservatório nos campos de Badejo, Linguado, Pampo e Trilha. Estes reservatórios são o foco deste estudo, que teve como objetivo aprofundar o conhecimento desses depósitos através da análise das fácies e associações de fácies para definição de sequências seguindo a compreensão atual dos conceitos de estratigrafia de sequência. Foram descritos testemunhos de poços associados a análise de dados de perfil e sísmica através das quais foram definidas dezesseis fácies. A classificação das fácies utilizou critérios sedimentológicos associados a conceitos tafonômicos o que permitiu a interpretação dos processos sedimentares envolvidos em sua deposição. Estas fácies foram agrupadas em associações de acordo com gradiente hidrodinâmico de uma plataforma dominada por ondas o que permitiu a interpretação dos padrões de empilhamento e definição de tratos de sistema transgressivos e regressivos. Foi proposto um ciclo ideal de alta frequência com a sucessão esperada de fácies para cada trato que serviu de base para interpretação de sequências de alta e média frequência. Esta análise permitiu a definição de três sequências internas no intervalo conhecido como Coquina Inferior, correlacionadas entre os poços que possuíam a melhor amostragem do intervalo permitindo assim analisar a variação vertical e lateral de fácies. A metodologia proposta permite a interpretação da estratigrafia em uma escala de maior detalhe auxiliando a interpretação da ocorrência de fácies e sua distribuição espacial na escala de dezenas a centenas de metros. Este tipo de análise é importante para desenvolvimento da produção de campos de hidrocarbonetos sendo útil na construção de modelos geológicos. Pode ser aplicável a ambientes análogos com similaridades quanto à composição das rochas e os processos envolvidos em sua deposição, como a Formação Itapema análoga na Bacia de Santos.

Palavras-Chave: Carbonato lacustre, Bacia de Campos, Coquina, Estratigrafia de sequências.

ABSTRACT

On the eastern Brazilian coast there is an important accumulation of Cretaceous lacustrine carbonates linked to the rift phase, which precedes the opening of the Atlantic Ocean. These carbonates consist mainly of bivalve packages associated with fine siliciclastic sediments. In the Campos Basin this interval is denominated Coqueiros Formation and constitutes a hydrocarbon reservoir in the fields of Badejo, Linguado, Pampo and Trilha. These reservoirs are the focus of this study, which aimed to detail the knowledge of these deposits through the analysis of facies and their associations in order to define sequences according to the present understanding of sequence stratigraphy concepts. Core samples description, well logs and seismic data analyses have been carried out, allowing the definition of sixteen facies. The facies classification was based on sedimentary characteristics associated with taphonomic concepts that allowed the interpretation of sedimentary processes involved in the deposition. These facies were grouped in associations according to a hydrodynamic gradient of a wave-dominated platform, which allowed the interpretation of stacking patterns and the definition of both transgressive and regressive system tracts. It was proposed an ideal high frequency cycle with the facies succession from each tract which was used for the interpretation of high and medium frequency sequences. This analysis allowed the definition of three internal sequences in the so-called Lower Coquina Interval correlated among the best sampled wells, and the analysis of vertical and lateral variation of facies. The proposed methodology allows the interpretation of the stratigraphy in a small scale contributing to the interpretation of the occurrence of facies and their spatial distribution in a scale of tens to hundreds of meters. This type of analysis is important for the development of production in a hydrocarbon field and is useful for the construction of geological models and is applicable to similar environments with same composition of the rocks and similarities in the processes involved in their deposition, such as the Itapema Formation in the Santos Basin.

Key words: Lacustrine carbonate. Campos Basin, Coquina, Sequence stratigraphy.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está organizada sob a forma de um capítulo introdutório ao manuscrito “Facies identification and paleoenvironmental characterization of the Coqueiros Formation (Lower Cretaceous, Campos Basin): a high frequency stratigraphic model to support pre-salt “coquinas” reservoir development in the Brazilian continental margin”, submetido ao Journal of South American Earth Sciences.

Dessa forma, a estruturação do trabalho compreende os seguintes títulos:

- Introdução: contendo uma apresentação do tema e os objetivos da pesquisa;
- Localização da área e geologia da Bacia de Campos: contendo um resumo da evolução da tectônica da bacia, litoestratigrafia do Grupo Lagoa Feia, estratigrafia de sequências, taxonomia e bioestratigrafia;
- Evolução do entendimento das fácies e do modelo deposicional da sequência das “Coquinas”;
- Metodologia de estudo: descrevendo os métodos e materiais utilizados para o estudo;
- Resultados obtidos: síntese do manuscrito; carta de submissão para revista técnica e o artigo apresentado integralmente no seu formato original.

1. Introdução

A exploração de hidrocarbonetos na Bacia de Campos, margem continental brasileira, teve início na década de 70. A partir do ano de 1974 destacam-se os primeiros campos com produção nos carbonatos oncolíticos da Formação Quissamã (Albiano), e posteriormente nas coquinas da Formação Coqueiros, (Aptiano/Barremiano), demonstrando o potencial econômico desses reservatórios nas porções mais rasas da Bacia de Campos (Winter *et al.*, 2007). Recentes descobertas, agora em áreas mais profundas da bacia e também na Bacia de Santos, em intervalo considerado como análogo, renovaram o interesse e necessidade de um aprofundamento no estudo deste intervalo.

A descoberta de hidrocarbonetos em carbonatos aptianos/barremianos na Bacia de Campos ocorreu em 1975 no Campo de Badejo e foi seguida pelas descobertas dos campos de Linguado, Pampo e Trilha. Diversos estudos foram realizados (Castro & Azambuja Filho, 1981; Bertani & Carozzi, 1984; Baumgarten, 1985; Dias *et al.*, 1988; Abrahão & Warne, 1990; Horschutz & Scuta, 1992; Carvalho *et al.*, 2000; Muniz, 2013) com intuito de planejar o desenvolvimento dos campos descobertos e utilizar os modelos para novas descobertas com características similares.

Esta dissertação contempla parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.) cujo objetivo é propor uma metodologia de modelagem para reservatórios carbonáticos, em específico os do andar Jíquia das Formações Coqueiros (Winter *et al.*, 2007) e Itapema (Moreira, 2007). Diversos estudos para conhecimento do ponto de vista, estratigráfico, diagenético bem como de modelagem estão sendo realizados de forma paralela a esta pesquisa. São utilizados os dados dos campos de Badejo, Linguado, Trilha e Pampo pois são os que apresentam a maior gama de dados de rocha, perfilagem, sísmica e informações geológicas adquiridas durante sua produção.

Os 1.217 m de testemunhos retirados do intervalo reservatório da Formação Coqueiros foram novamente analisados agora por uma equipe única com intuito de uniformizar as descrições e a metodologia utilizada. Foi proposta uma classificação de fácies combinando a classificação de carbonatos de Dunham (1962) e de Embry & Klovan (1971) associada a parâmetros tafonômicos (Kidwell, 1991; Muniz, 2013). O objetivo é a interpretação dos processos envolvidos na formação das fácies visando

agrupá-las em associações que permitam a identificação de padrões de empilhamento e a aplicação dos conceitos estratigrafia de sequências em alta frequência (Catuneanu, 2011). Isto torna possível a correlação entre as diferentes áreas através da definição de tratos de sistema e superfícies chave de correlação para proposição de um modelo de evolução estratigráfica e de distribuição de fácies.

Este tipo de estudo estratigráfico tornou possível a elaboração de metodologia que pode ser aplicável aos campos das bacias da margem continental leste brasileira que possuem reservatórios de idade Jíquiá formados por rochas de mesmo sistema deposicional, visando correlacionar poços e dar suporte à caracterização de reservatórios.

2. Bacia de Campos

A Bacia de Campos estende-se da costa norte do estado do Rio de Janeiro ao sul do estado do Espírito Santo, perfazendo uma área de 100.000 km². É limitada a nordeste pela bacia do Espírito Santo, através do Alto de Vitória e, a sudoeste, com a bacia de Santos pelo Alto de Cabo Frio (Winter *et al.*, 2007) (Fig. 1).

A região de estudo está localizada a leste do estado do Rio de Janeiro à 70 km da costa, na área dos campos de Badejo, Linguado, Trilha e Pampo da Bacia de Campos (Fig. 1). A lamina d'água na região varia entre 80 a 120 m e os *ring fences* dos campos totalizam uma área de 518 km², onde foram perfurados um total de 83 poços (informação verbal)¹. A Formação Coqueiros foco do estudo e um dos principais reservatórios da área encontra-se a uma

3 profundidade média de 2.600 m nesta região.

¹ Informado por Ricardo Lykawka, Petrobras

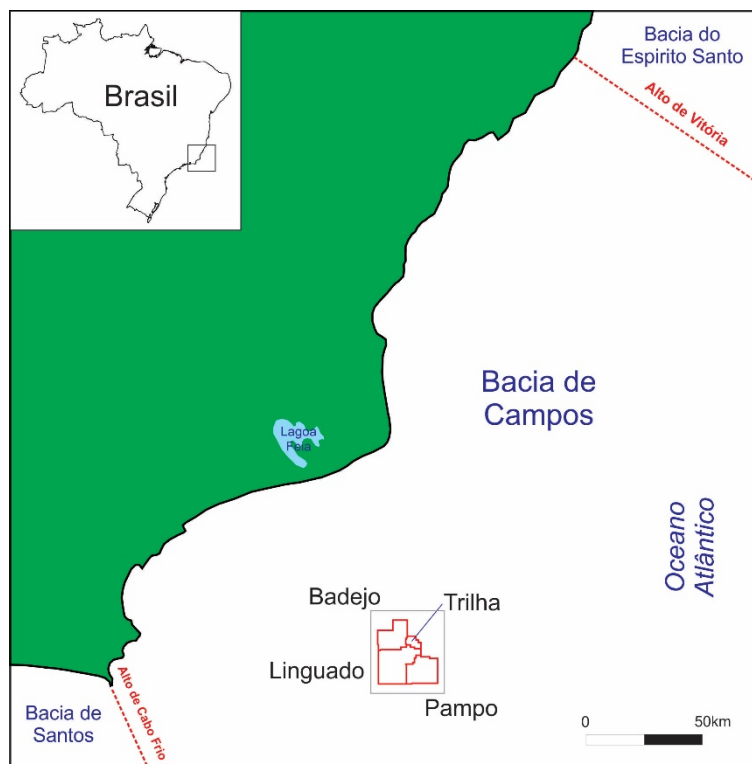


Figura 1- Localização da Bacia de Campos, destacando os campos de Badejo, Linguado, Trilha e Pampo.

A Bacia de Campos associa-se com a ruptura do Gondwana, que inicia no Jurássico a partir da plataforma argentina (Moriak *et al.*, 2008). Na região da Bacia de Campos, o rifte provavelmente tem início no Hauteriviano (Rangel *et al.*, 1994 *in* Davison, 1999). O embasamento econômico da bacia são os basaltos da Formação Cabiúnas, datados em torno de 124 Ma (Mizusaki, 1986) e correlatos ao evento ígneo Serra Geral, na Bacia do Paraná (Winter *et al.*, 2007).

Na evolução da bacia são inicialmente reconhecidas três fases (Asmus, 1975; Barros, 1980): (I) sin-rifte; (II) pós-rifte transicional e (III) pós-rifte marinho (transgressivo e regressivo). Em Winter *et al.* (2007), a divisão em três fases é mantida, porém passam a ser denominadas: (I) rifte; (II) pós-rifte e (III) drifte.

A fase rifte é marcada por magmatismo básico inicial associado a tectônica extensional, predomínio de subsidência mecânica com geração de falhamentos normais com direção N30°E ao sul e NNE nas porções mais ao norte da bacia (Dias *et al.*, 1990; Chang *et al.*, 1992). O preenchimento ocorre por uma sucessão vulcano-sedimentar, do Hauteriviano, sobreposta por uma sucessão predominantemente siliciclástica, barremiana-aptiana conhecida como Sequência Talco-estevensita (Dias *et al.*, 1988). Uma espessa sucessão de carbonatos bioclásticos aptianos denominada Sequência das

Coquinas é a última unidade depositada nesta fase, limitada por uma discordância conhecida como pré-neo-Alagoas (DPA) (Winter *et al.*, 2007).

A fase pós-rifte é marcada por um ambiente com decréscimo da atividade tectônica, predomínio de subsidência térmica e raros falhamentos. A sucessão sedimentar é composta por sedimentos clásticos gradando para carbonatos em direção ao depocentro da bacia, sendo o limite superior formado por evaporitos. Schaller (1973) denomina esse intervalo de Sequência Clástica Evaporítica.

A fase drifte corresponde à fase marinha franca com subsidência térmica e tectonismo adiastrófico. Ressalta-se o importante papel da tectônica salífera ocasionando desenvolvimento de falhas lítricas e estruturas dômicas tipo *rollovers*. A deposição se inicia com carbonatos marinhos de águas rasas que são sobrepostos por sedimentos clásticos finos e turbiditos, quando o processo de subsidência é intensificado. No Cenozoico o padrão de empilhamento sedimentar torna-se regressivo formando a sequência marinha regressiva que permanece até os dias atuais (Winter *et al.*, 2007).

2.1 Litoestratigrafia

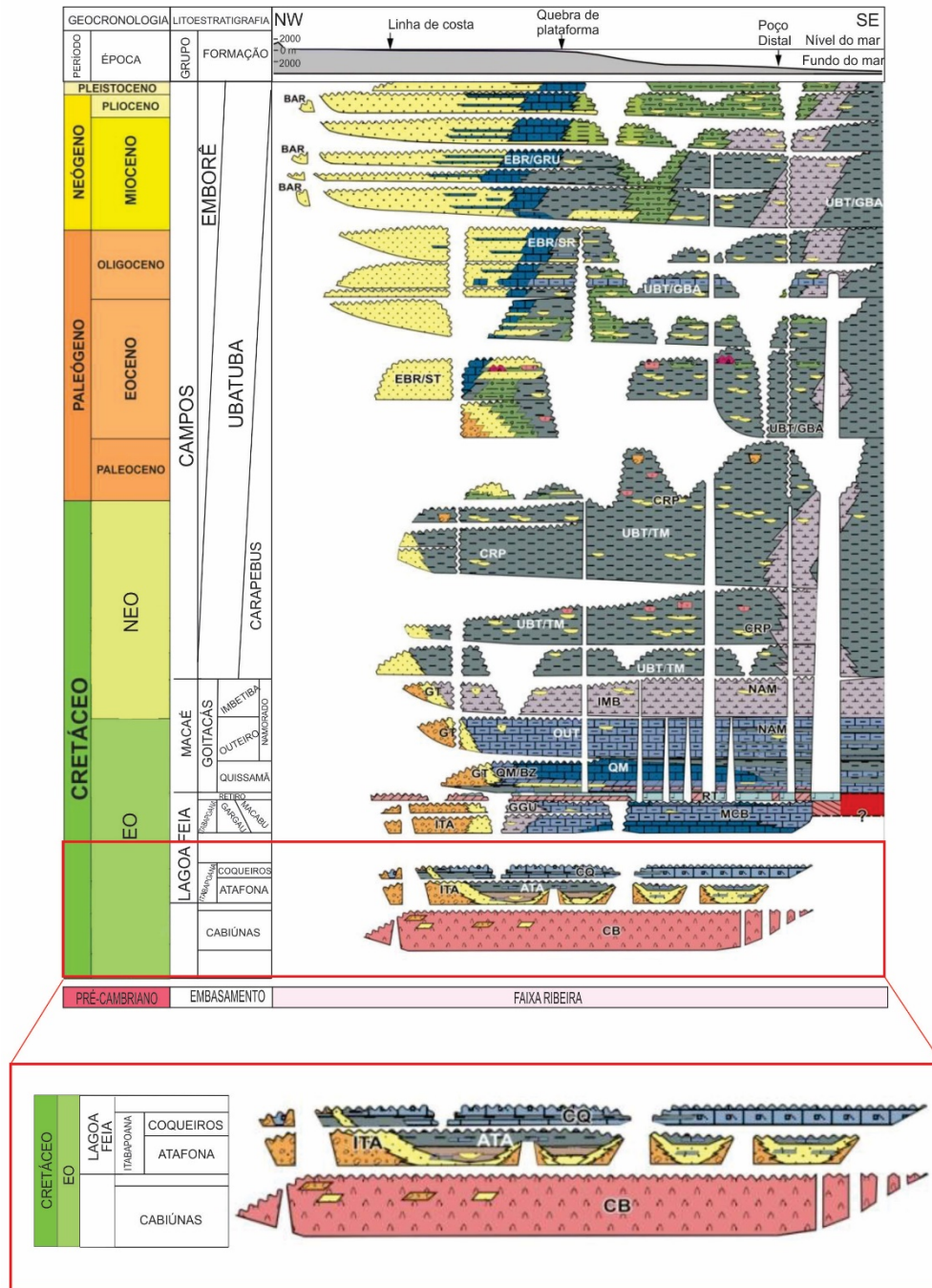


Figura 2 - Carta estratigráfica da Bacia de Campos com destaque para o intervalo analisado (modificado Winter *et al.*, 2007).

A carta estratigráfica da Bacia de Campos foi proposta por Schaller (1973) a partir dos resultados dos primeiros poços perfurados na Bacia. Nesta versão inicial é definida a Formação Lagoa Feia que originalmente compreendia o conjunto de rochas siliciclásticas, carbonáticas e evaporíticas abrangendo os andares Barremiano e Aptiano do Cretáceo.

A atualização da carta estratigráfica e a definição dos dois membros pertencentes à Formação Coqueiros foram propostos por Rangel *et al.* (1994) (Quadro 1):

- Membro Coqueiros que denomina de “Coquina” e é composto majoritariamente de bivalves que formam camadas de 15 a 50 metros;
- Membro Retiro é uma suíte evaporítica, composta principalmente de halita e anidrita, apresenta-se fortemente remobilizada formando domos de sal que deformam as rochas sedimentares subjacentes.

A carta estratigráfica utilizada atualmente onde a Formação Lagoa Feia foi elevada a grupo e os membros Coqueiros e Retiro são elevados a formações: Itabapoana, Atafona, Gargaú e Macabu é de Winter *et al.* (2007) (Quadro 1 e Fig. 2).

Quadro 1 – Evolução da classificação litoestratigráfica do Grupo Lagoa Feia (modificado Schaller, 1973; Rangel *et al.*, 1994; Winter *et al.*, 2007)

Litoestratigrafia			
Schaller (1973)	Rangel (1994)	Winter (2007)	
Formação Lagoa Feia	Membro Retiro	Grupo Lagoa Feia	Formação Retiro
			Formação Gargaú
			Formação Macabu
	Membro Coqueiros		Formação Coqueiros
			Formação Itabapoana
			Formação Atafona

Formação Atafona

A Formação Atafona consiste em siltitos, arenitos e folhelhos lacustres por vezes intercalados com camadas carbonáticas delgadas. Correspondem aos depósitos lacustres do início da fase rifte e formação da bacia e caracterizam-se pela presença de minerais do grupo talco-estevensita (Bertani & Carozzi, 1985; Rheim *et al.*, 1986). A Formação está distribuída na porção centro sul da bacia especialmente onde se localizam os depocentros lacustres. As rochas da Formação Atafona depositam-se discordantemente tanto sobre a Formação Cabiúnas como sobre a Formação Itabapoana. O contato superior com a Formação Coqueiros também é discordante.

Formação Itabapoana

A Formação Itabapoana conforme Winter et al., (2007) distribui-se nas proximidades da borda oeste atual da bacia (Fig. 3). São conglomerados polimíticos com seixos de basaltos, arenitos e raros carbonatos e arenitos líticos. Os depósitos correspondem a leques aluviais e *fan deltas* associados aos falhamentos da borda da bacia e aos altos estruturais internos do embasamento. O contato é discordante com os basaltos da Formação Cabiúnas (considerado como o embasamento econômico da bacia) e lateralmente, é gradual com as formações Atafona, Coqueiros e Gargaú.

Formação Coqueiros

A Formação Coqueiros é constituída principalmente por carbonatos bioclásticos a *bivalves* (Rangel et al., 1994) intercalados por camadas de folhelhos de origem lacustre. Caracteriza-se pela presença de acumulações de bivalves que chegam a formar camadas com espessuras superiores a 100 m. As acumulações são atribuídas a depósitos lacustres de alta energia, que em sua maioria encontram-se retrabalhados. Nesta formação ocorre uma importante camada de folhelho rico em matéria orgânica conhecida como folhelho Jíquiá, considerado o principal gerador da bacia. A Formação Coqueiros encontra-se discordantemente sobre a formação Atafona e, no topo, possui contato discordante com as formações Itabapoana, Gargaú, Macabu ou Retiro.

Formação Macabu

A Formação Macabu está representada por sedimentos carbonáticos interpretados como estromatólitos e laminitos microbiais de ambiente lacustre raso e árido. Estes sedimentos possuem raras intercalações com estratos arenosos e folhelhos. Ocorrem principalmente no centro sul da bacia, nas poções distais. Depositaram-se discordantemente sobre a Formação Coqueiros. O contato superior é com a Formação Retiro.

Formação Gargaú

A Formação Gargaú é formada por margas e calcilutitos, de ambientes costeiros rasos. As rochas pelíticas, por vezes, se intercalam com arenitos siliciclásticos de eventuais aportes continentais. Estes depósitos ocorrem comprovadamente na porção mais proximal do centro sul da bacia, sendo questionável a sua ocorrência na porção

mais distal. A Formação Gargaú deposita-se discordantemente sobre a Formação Coqueiros e grada lateralmente para a Formação Macabu. No topo, o contato com a Formação Retiro é discordante.

Formação Retiro

A Formação Retiro é caracterizada por uma suíte evaporítica composta principalmente por halita e anidrita (Rangel *et al.*, 1994). Nos depocentros desta formação encontram-se as maiores espessuras e também outros sais intercalados como carnalita e silvinita. É possível caracterizar ciclos da base para o topo: anidrita, anidrita + halita, anidrita + halita + carnalita/silvinita. A Formação encontra-se fortemente deformada por halocinese que teve um papel importante na evolução estrutural dos pacotes subsequentes. O contato inferior com as formações Itabapoana, Gargaú e Macabu é discordante assim como no topo com a Formação Goitacás, leques aluviais deltaicos e fandeltas de idade albiana/cenomaniana e Formação Quissamã que corresponde a bancos de calcarenitos oóliticos, oncolíticos e micro-oncolíticos de idade albiana.

2.2 Sequências do Grupo Lagoa Feia

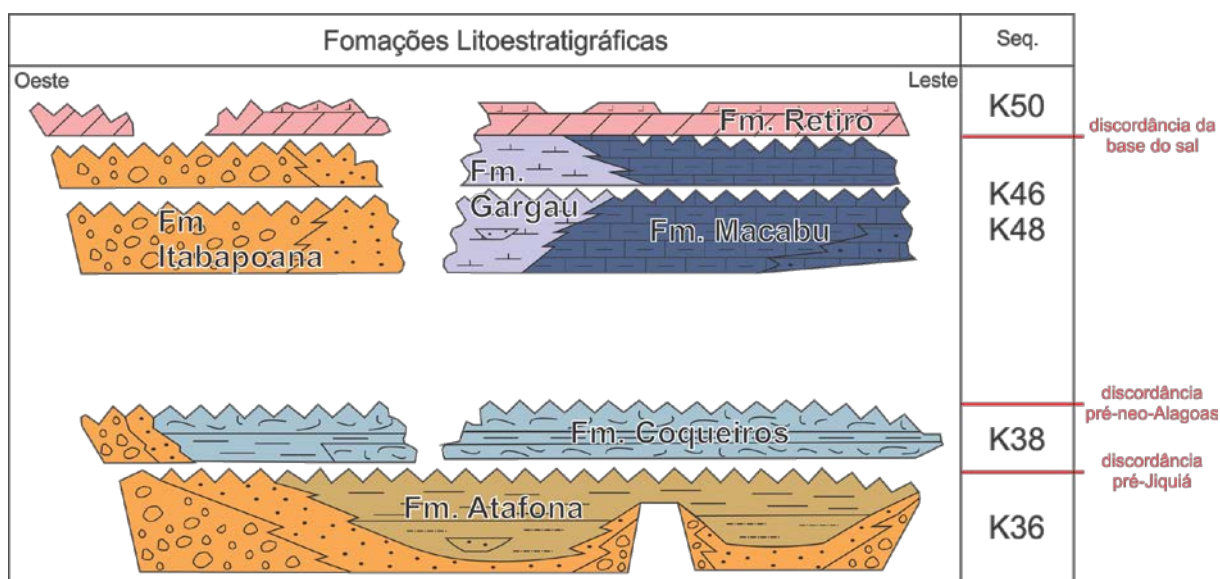


Figura 3 - Formações litoestratigráficas e seqüências do Grupo Lagoa Feia (modificado Winter *et al.*,

2007)

Na figura 3 pode-se observar a relação entre as formações litoestratigráficas e as sequências estratigráficas. Rangel *et al.* (1994) define três sequências dentro do que seria denominado Grupo Lagoa Feia: K30, K40 e K50. Estas sequências são refinadas em Winter *et al.* (2007) sendo propostas: K36, K38, K46, K48 e K50 (Fig. 3).

A sequência K36, também conhecida como a sequência talco-estevensita (Dias *et al.*, 1988), é composta pelas formações Itabapoana na porção proximal e Atafona, porção distal. Foi depositada no Barremiano, seu limite inferior é a discordância do topo dos basaltos da Formação Cabiúnas e o limite superior é a discordância pré-Jiquiá colocada em 125,8 Ma (Winter *et al.*, 2007).

A sequência K38 também identificada como “Sequência das Coquinas” (Dias *et al.*, 1988) é o foco deste trabalho, sendo constituída pelas formações Itabapoana na porção proximal e Coqueiros na porção mais distal e foi depositada do Barremiano superior ao Aptiano Inferior. O limite superior é a discordância pré-neo-Alagoas (DPA) de 120 Ma a 123,1 Ma.

As sequências K46 e K48 correspondem as formações Itabapoana mais proximal, Gargaú e Macabu na porção distal. A sequência foi depositada no Aptiano médio ao superior e é limitada no topo pela discordância da base da Sequência Evaporítica, de 112 Ma. O que diferencia as sequências K46 e K48 é o padrão de empilhamento, que na K46 é progradacional e na K48 é retrogradacional.

A sequência K50 corresponde à Formação Retiro presente nas porções proximal e distal da bacia. Winter *et al.* (2007) não define uma discordância no topo da formação descrevendo seu limite como a passagem para os sedimentos das Formações Goitacás e Quissamã já correspondente à fase drifte, francamente marinha (Fig. 2).

2.3 Evolução do entendimento das fácies e do modelo deposicional da sequência da “Coquinas”

O intervalo de rochas carbonáticas bioclásticas compostas principalmente por *bivalves*, de idade Jiquiá, foi chamado de sequência das “Coquinas” por Dias *et al.* (1988) (Fig. 4). Intervalos carbonáticos de mesma idade Jiquiá também ocorrem em outras bacias da margem leste brasileira, como na Sub-Bacia de Sergipe (Formação Morro do Chaves) e na Bacia de Santos (Formação Itapema).

A sequência “Coquinas” é composta basicamente por rudstones, grainstones e packstones bioclásticos, com predomínio de *bivalves*. Os *bivalves* têm baixa

diversidade, sendo descritas apenas oito espécies (Carvalho *et al.*, 1995). Secundariamente ocorrem gastrópodes, ostracodes, pólenes, esporos, fragmentos ósseos, dentes e escamas de peixes, além de fragmentos de estromatólitos e laminitos de origem microbiana (Abrahão & Warne, 1990; Carvalho *et al.*, 1995).

Bertani & Carozzi (1984) interpretam o ambiente de deposição da sequência como sendo fluvio-lacustre de alta complexidade devido ao baixo conteúdo de organismos marinhos e presença de componentes biogênicos que são comumente encontrados em lagos. Os autores descrevem dezessete microfácies que são agrupadas em quatro “sequências litológicas”, com base principalmente nos componentes predominantes das fácies: (1) terrígenos, (2) ostracodes, (3) pelecipodas – bivalves, (4) vulcanoclásticas de composição básica. Então a interpretação é de um ambiente lacustre que periodicamente se expande e se contrai em direção a planícies terrígenas, havendo dois estágios principais:

- *Playa lake* – dominado por ostracodes e
- *Pluvial lake* – dominado por *bivalves*.

Dias (1988) com base em dados sísmicos correlacionou áreas de maiores dimensões pela bacia definindo quatro sequências: (1) clástica basal, (2) talco-estevensítica, (3) “Coquinas” e (4) clasto-evaporítica (Fig. 4). A Sequência das “Coquinas” é o foco deste estudo e definida como “uma expressiva deposição carbonática composta principalmente por bioacumulados de *bivalves* delimitada no topo por uma discordância regional chamada de discordância pré-alagoas (DPA) e, na base por um marco estratigráfico definido em perfis elétricos de poço e mapeados através de um forte refletor sísmico, conhecido como marco “LF-35” de Baumgarten (1985).

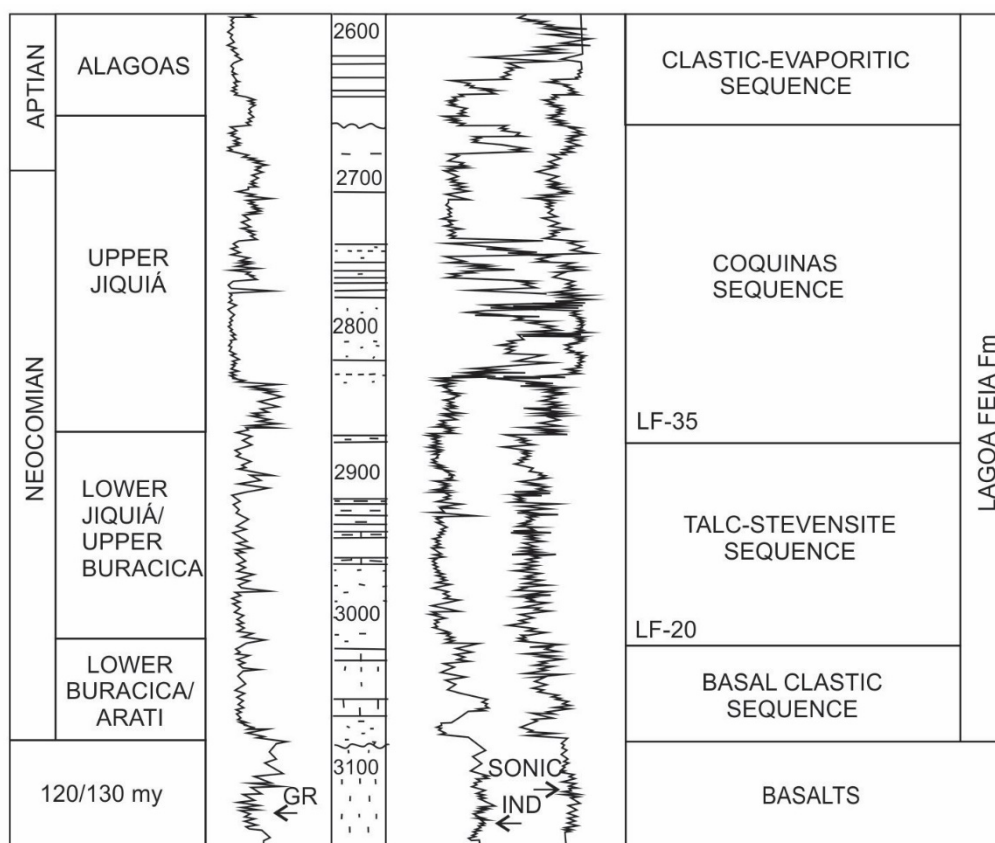


Figura 4 - Perfil típico do Grupo Lagoa Feia mostrando as idades, andares locais, perfis elétricos (GR=raios gama; IND = indução; SONIC = sônico) e as sequências (modificado de Dias *et al.*, 1988).

Guardado *et al.* (1989) ressalta a influência dos componentes estruturais na deposição e acumulação dos sedimentos da Sequência “Coquinas”. Sugere que bancos bioclásticos seriam depositados sobre altos estruturais do embasamento e ao longo de flancos dos falhamentos; nas áreas mais baixas relacionadas aos depocentros do sistema haveria deposição de sedimentos terrígenos com elevado teor de argilominerais (talco-estevensita). Em regiões proximais ao continente se desenvolveriam complexos de leques aluviais depositando conglomerados e arenitos de planície aluvial. (Fig. 5)

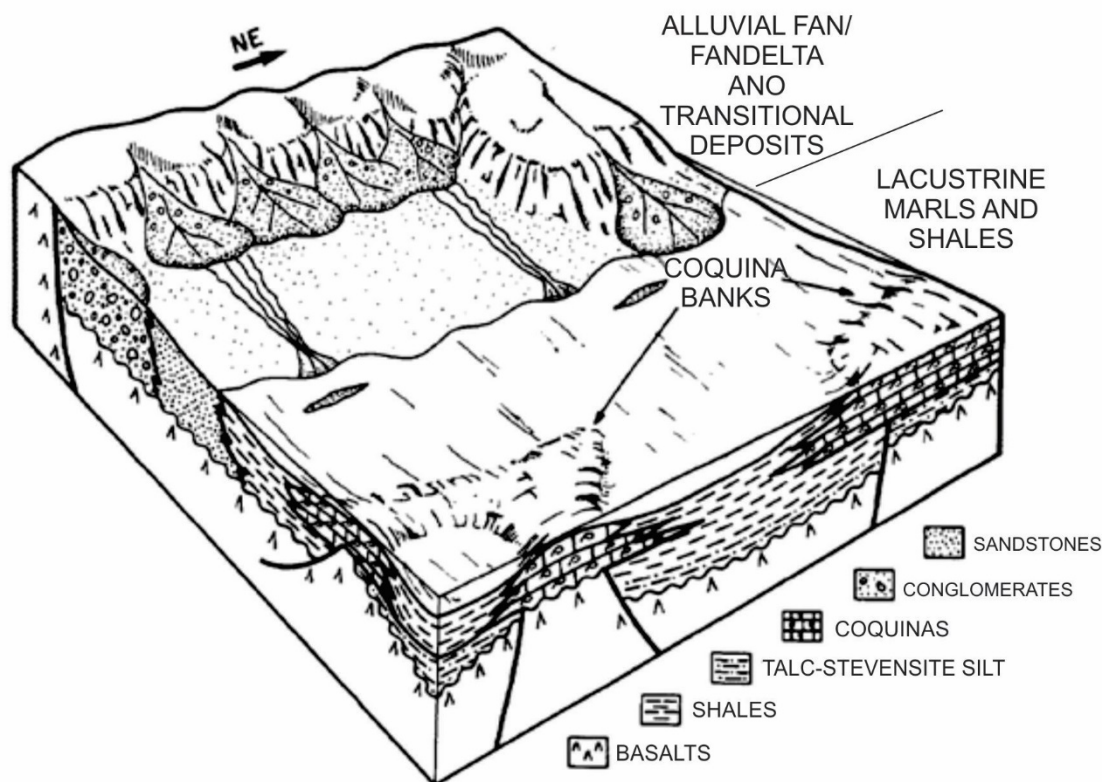


Figura 5- Modelo paleogeográfico da sequência, ressaltando a presença das coquinas em altos do embasamento. Extraído de Guardado *et al.* (1989).

Com base em uma análise detalhada de associações de fácies observadas em testemunhos do Grupo Lagoa Feia, Carvalho *et al.* (2000) propuseram paleoambientes deposicionais para a sequência das coquinas: leques aluviais, planícies aluviais arenosas, planícies aluviais lamosas, praias arenosas bioclásticas, praias de calcarenitos bioclásticos, depósitos lacustres marginais, barras bioclásticas, lençóis de conchas/franjas de barras, bancos de bioacumulados e depósitos lacustres profundos. Dentre esses depósitos, os espessos pacotes de coquinas de *bivalves* que compõem as barras bioclásticas constituem os principais reservatórios, depositados ao longo de altos sindeposicionais. Os sedimentos lacustres depositados nas margens dos lagos frequentemente exibem estruturas associadas à exposição subaérea e pedogênese, que indicam mudanças do nível do lago e da linha de costa (Praça, 1996; Carvalho *et al.*, 2000).

Em relação à interpretação do modelo deposicional (Fig. 6) verifica-se que não sofreu grandes modificações, pois foi interpretado por Muniz (2013) como “depósitos lacustres rasos afastados de suprimentos siliciclásticos, formados em plataformas tipo rampas de alta energia nas bordas do lago e altos estruturais internos”. Os depósitos de

praias, barras, bancos bioclásticos e rudstones se empilham formando pacotes carbonáticos de dezenas a centenas de metros de espessura que gradam lateralmente para camadas centimétricas de packtones, mudstones e/ou siltitos e lamitos comumente ricos em ostracodes.

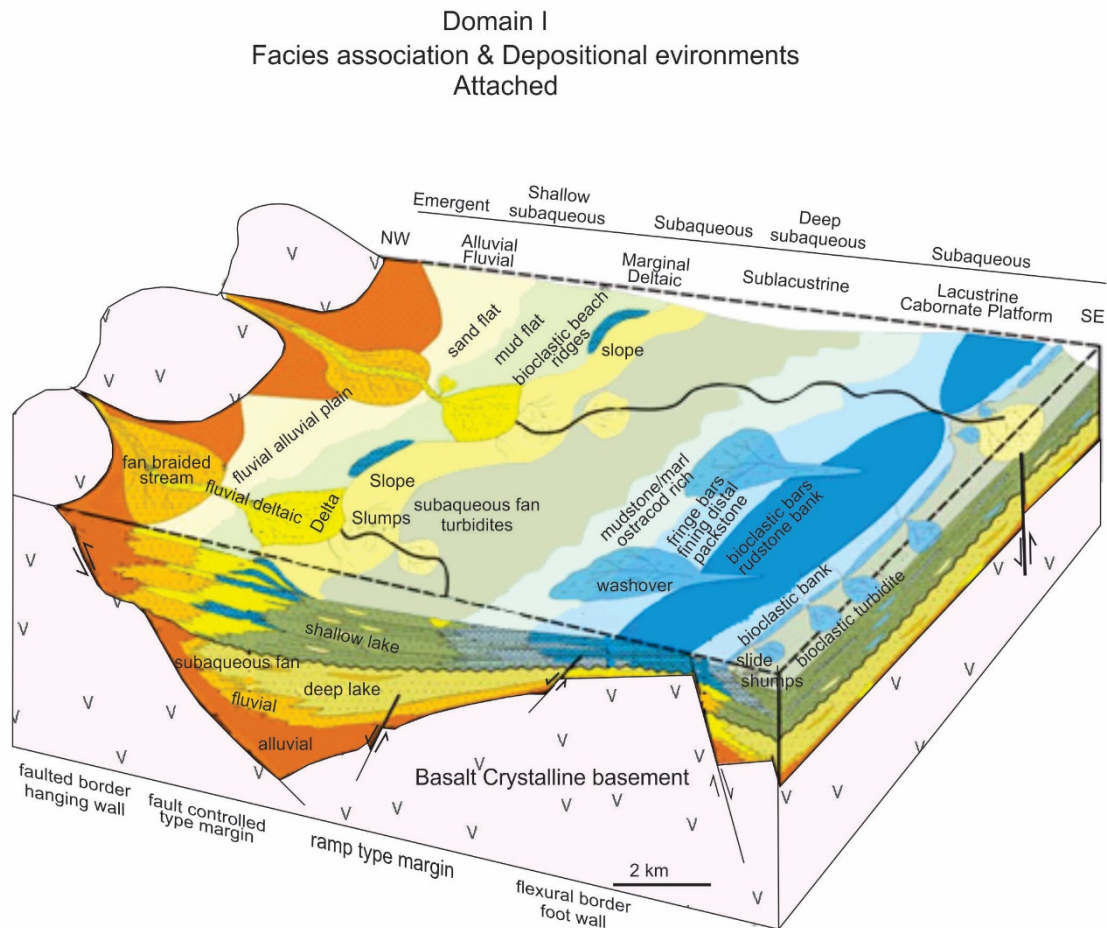


Figura 6 - Bloco diagrama mostrando o contexto estrutural, associações de fácies e ambientes deposicionais para sedimentos siliciclásticos e carbonáticos. Extraído de Muniz (2013)

3. Métodos de estudo

Para o desenvolvimento deste estudo foram realizadas diferentes etapas: pesquisa bibliográfica, reconhecimento das fácies obtida a partir da descrição de testemunhos de poços da região e análise da perfilagem dos poços.

A pesquisa bibliográfica foi realizada durante todo o período de análises e confecção da dissertação. Foram coletados mapas, artigos técnicos e relatórios referentes a informações gerais sobre a bacia de Campos para o estudo do contexto regional. Foi feito um levantamento dos trabalhos realizados na mesma Formação Coqueiros a fim de estabelecer um entendimento da evolução do conhecimento sobre o modelo deposicional da área e foi feita uma seleção e análise de trabalhos relacionados a classificações de carbonatos, tafonomia e estratigrafia de sequências para elaborar a metodologia de análise faciológica dos testemunhos e estabelecimentos de sequências e correlação entre os poços.

Foram levantados os dados disponíveis destes campos de petróleo e a partir deste levantamento foram selecionados os 33 poços para este estudo. Os poços selecionados possuíam um total de 1.217 m de testemunhos de sondagens que haviam sido obtidos desde a descoberta dos campos na década de 70. Estes testemunhos tinham descrições feitas por diferentes técnicos ao longo do tempo e ao analisá-las constatou-se que para o objetivo esperado deste trabalho seria necessário descrever novamente os testemunhos, sistematizando as características descritas e adicionando informações como a tafonomia dos bivalves. Contou-se então com o auxílio de uma equipe de geólogos da Petrobrás que estabeleceram a nova sistemática de descrição, detalhada a seguir, e descreveram novamente os testemunhos de maneira a obter um conjunto de dados que fosse comparável entre os campos e estivesse atualizado em relação ao conhecimento técnico atual.

A descrição de fácies sedimentares foi realizada através da análise macroscópica e descrição petrográfica de lâminas delgadas de testemunhos no laboratório de Sedimentologia da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.) na cidade de Macaé (RJ), os testemunhos foram descritos na escala de 1:10. Como o intervalo possui um conjunto de rochas siliciclásticas e carbonáticas foi necessária a seleção e o uso de diferentes classificações de rochas. As rochas siliciclásticas foram descritas utilizando a escala granulométrica de Wentworth (1922) e o diagrama de Picard (1977). Os aspectos texturais e as estruturas das fácies seguiram a interpretação dos processos deposicionais

e paleoambientes de Walker & Noel (1992). Destaca-se que o termo “arenito híbrido” foi utilizado quando a porcentagem de grãos siliciclásticos ultrapassou 33% do total de grãos da rocha conforme Zuffa (1980).

Para as rochas carbonáticas avaliou-se que seria adequado utilizar a classificação usual para carbonatos, Dunham (1962) e Embry & Klovan (1971), (Fig. 7). No entanto, esta classificação unicamente não seria totalmente adequada aos objetivos de interpretar os processos envolvidos na formação das fácies que permitissem a identificação de padrões de empilhamento. A maior parte do intervalo seria descrito como uma única fácies, os rudstones bioclásticos. Foi então adaptada uma metodologia que além da classificação de Dunham (1962) e de Embry & Klovan (1971) associa parâmetros tafonômicos de Kidwell (1991) e Muniz (2013) para gerar uma quantidade maior de classes de fácies com parâmetros que tivessem significado relevante do ponto de vista de processos. Os critérios descritos relacionados à classificação tafonômica foram as características de orientação, seleção, abrasão, fragmentação e presença de conchas articuladas. Estas características foram divididas em três classes de intensidade conforme a figura 8.

Foram definidas nove (9) fácies carbonáticas, que serão detalhadas no capítulo de resultados. A metodologia de trabalho é descrita na figura 9 consiste em quatro etapas:

- 1) Definição dos principais constituintes em ordem de ocorrência e classificação segundo Embry & Klovan (1971);
- 2) Descrição da orientação das conchas e estruturas sedimentares;
- 3) Descrição tafonômica dos bioclastos. As características como seleção, arredondamento, fragmentação e articulação das conchas foram divididas em três classes de intensidade definidas descritas na figura 8;
- 4) Definição da fácies baseada na classificação proposta.

CALCÁRIOS ALOCTONES						
Componentes originais não ligados organicamente durante a deposição <10% grão >2 mm				Textura deposicional não reconhecível	Componentes originais não ligados organicamente durante a deposição	
Contém matriz (Partículas tamanho argila/silte)			Sem matriz grão suportado		>10% grãos >2 mm	
Suportado por matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz			Suportado pela matriz	Suportado por componentes maiores que 2 mm
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos					
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Crystalline</i>	<i>Floatstone</i>	<i>Rudstone</i>
Dunham, 1962				Embry e Klován 1971		

Figura 7 - Classificação para rochas carbonáticas (modificado de Dunham, 1962 e Embry & Klován, 1971)

Energia ↑	Classe Matriz	Classe Arcabouço	% Fragment.	Seleção	Arredond.	% Articulação
	A	I	>70%	Boa	Bom	<1%
	B	II	35-70%	Moderada	Moderado	1-20%
	C	III	<35%	Mal	Ruim	>20%

Figura 8 - Classes sugeridas para a quantificação dos parâmetros tafonômicos (proposição do autor).



Figura 9 - Metodologia aplicada para a descrição e identificação das fácies (proposição do autor).

Para correlação e posicionamento estratigráfico dos testemunhos os dados das descrições foram carregados em um software de modelagem geológica (PETREL- software para modelagem geológica de reservatórios - Schlumberger, versão 2015) juntamente com os perfis de poços (raios gama, densidade e neutrônico) e um levantamento sísmico tridimensional. Com o auxílio desses dados foram identificadas as superfícies regionais: discordância pré-neo Alagoas (Winter *et al.*, 2007) e o marco LF-35 de Baumgarten (1985), ambas as superfícies dos limites da sequência estudada. Estes mesmos dados foram utilizados na interpretação estratigráfica e identificação de ciclos internos.

4. Resultados obtidos

Os resultados deste trabalho encontram-se no manuscrito em anexo. Neste artigo foi proposto um conjunto de fácies organizadas segundo processos relacionados a ondas, com suas características diagnósticas. Isso permitiu a definição de associações de fácies conforme o zoneamento hidrodinâmico do ambiente deposicional (Reading & Collinson, 1996) descrito segundo os processos dominantes para cada zona. Através deste entendimento das fácies foi possível estabelecer as mudanças de padrão de empilhamento utilizando Ciclos T-R (Embry & Johannessen, 1993) nos poços descritos e analisá-los em um mesmo intervalo estratigráfico.

A estratigrafia foi proposta segundo duas hierarquias de sequências classificadas de forma relativa: uma de alta frequência e de ordem menor correspondendo às *small-scale sequence* de Strasser (1999) e a outra de média frequência e ordem maior, que foi correlacionada em poços de uma seção com boa cobertura estratigráfica.

5. Conclusões

O estudo propôs uma metodologia que organizou as fácies e permitiu a interpretação da estratigrafia em uma escala de uma ordem superior a que tinha sido analisada até então, possibilitando estabelecer considerações sobre a relação entre paleotopografia e a ocorrência das fácies, e tecendo considerações sobre sua distribuição espacial na escala de dezenas de metros. A metodologia desenvolvida pode ser aplicável a ambientes análogos com similaridades quanto à composição das rochas e os processos envolvidos em sua deposição, como a Formação Itapema (Cretáceo) considerada análoga na Bacia de Santos (Moreira, 2007).

6. Referências bibliográficas

- ABRAHÃO, D.; WARME, J.E. 1990. Lacustrine and associated deposits in a rifted continental margin-lower Cretaceous, Lagoa Feia Formation, Campos Basin, Offshore Brazil. In: Katz, B. J. (ed) Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs: AAPG Memoir 50, pp 287-305.
- ANP, 2017. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis S.A.
- ASMUS, H. E. 1975. Controle estrutural da deposição mesozoica nas bacias da margem continental Brasileira. Revista Brasileira de Geociências, vol.5, pp. 160-175.
- BARROS, M. C. 1980. Geologia e recursos petrolíferos da Bacia de Campos. XXXI Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, Anais.....vol. 1, pp. 254-265.
- BAUMGARTEN, C. S. 1985. Evolução estrutural de Pampo, Badejo, e Linguado durante a deposição da Formação Lagoa Feia. Boletim Técnico da Petrobrás, 28(2): 91-101.
- BERTANI, R. T. ; CAROZZI, A. V. 1985. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, offshore Brazil: rift-valley stage lacustrine carbonate reservoir. Journal of Petroleum Geology, v.8, pp.37-58; 199-220.
- BRUHN, C.H.L.; GOMES, J.A.T.; LUCCHESI, C.D. & JOHANN, P.R.S. 2003. Campos Basin: Reservoir Characterization and Management – Historical Overview and Future Challenges. OTC 15220. Offshore Technology Conference, Houston, Texas,. 14p.
- CARVALHO, M.D.; PRAÇA, U.M.; DIAS, J.L.; SILVA-TELLES JR., A.C.; HORSCHUTZ, P.; HESSEL, M.H.; HANASHIRO, M.; SCUTA, M.S.; BARBOSA, A.S.C.; FREITAS, L.C.S. & SAYD, A.D. 1995. Coquinas da Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos: estudos sedimentológicos na caracterização da qualidade do reservatório. Petrobras /Cenpes/Depex, Relatório interno. 3 vol.
- CARVALHO, M.D.; PRAÇA, U.M.; SILVA-TELLES, A.C.; JAHNERT, R.J. & DIAS, J.L. 2000. Bioclastic carbonate lacustrine facies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil. In: Gierlowski-Kordesch, E.H. & Kelts, K.R. (eds), Lake basins through space and time. AAPG Studies in Geology, 46, pp. 245-256.
- CASTRO, J. C.; AZAMBUJA FILHO, N. C. 1981. Fácies, análise estratigráfica e reservatórios da Formação Lagoa Feia, Cretáceo Inferior da Bacia de Campos: Petrobras/Cenpes/Labor, Relatório interno, 110 p.
- CATUNEANU, O.; GALLOWAY, W. E.; KENDALL, C. G. S. C.; MIALI, A. D.; POSAMENTIER, H. W., STRASSER, A. ; TUCKER, M. E. 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. Newsletters on stratigraphy, v. 44, n. 3, pp. 173-245.
- CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER A. A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. Tectonophysics, v. 213, pp 97-138.

- DAVISON, I., 1999. Tectonics and hydrocarbon distribution along the Brazilian South Atlantic margin, In: Cameron, N. R., Bate, R. H. & Clure, V.S. (eds.), The oil and gas habitats of the South Atlantic: The Geological Society. Special publication, v. 153, pp. 133-151.
- DIAS, J. L.; OLIVEIRA, J. Q. E. ; VIEIRA, J. C. 1988. Sedimentological and stratigraphic analysis of the Lagoa Feia Formation, rift phase of Campos Basin, Offshore Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 18 (3): 252-260.
- DIAS, J.L.; SCARTON, J.C.; ESTEVES F.R.; CARMINATTI, M.; GUARDADO, L.R. 1990. Aspectos da evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. In: Raja Gabaglia, G.P & Milani, E.J. (eds.), Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, Petrobras, pp.333-360.
- DUNHAM, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (ed.), Classification of carbonate rocks. Tulsa, AAPG, Memoir 1. pp.108-122.
- EMBRY, A. F.; KLOVAN, J. E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Islands, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v.19, pp. 730-781.
- EMBRY, A. F.; JOHANNESSEN, E. P. 1993. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. *Arctic Geology and Petroleum Potential*, Norwegian Petroleum Society (NPF), Special Publication, v. 2, pp. 121-146.
- GUARDADO, I. R.; GAMBOA I. A. P.; LUCCHESI, c. F. 1989, Petroleum Geology of the Campos Basin, Brazil, A Model for a Producing Atlantic Type Basin. In: Edwards, J.C. & Santogrossi, P. A. (eds.) Divergent/Passive Margin Basin. Tulsa: AAPG. Memoir 48, p. 3-79,.
- HORSCHUTZ, P.M.C.; SCUTA, M. S. 1992. Fácies-perfis e mapeamento de qualidade do reservatório de coquinas da Formação Lagoa Feia do Campo de Pampo. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 6(1/2): 45 – 58.
- KIDWELL, S. 1991. The stratigraphy of shell concentrations. In: Allison, P. A. & Briggs, D. E. G. (eds.). Taphonomy: releasing data/locked in the fossil record: topics in geobiology. Plenum Press, v. 9, pp. 211-290.
- MIZUSAKI, A.M.P. 1986. Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos-caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos. UFRJ, dissertação de mestrado, 104 p.
- MOHRIAK, W.; NEMCOK M.; ENCISO G. 2008, South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil. Geological Society, London, Special Publications, vol. 294; pp. 365-398.
- MUNIZ, M. C., 2013. Tectono-Stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian continental rift carbonates in southern Campos Basin, Brazil. Royal Holloway University of London, UK (PhD Thesis). 324 p.
- PICARD, M.D. 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1): 179-195.
- PRAÇA, U. M. 1996, Calcários de águas rasas e calcários palustres da sequência das Coquinas, Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 112 p.

- RANGEL, H.D.; MARTINS, F.A.L.; ESTEVES, F.R.; FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia de Campos, Boletim de Geociências da Petrobras, v. 8, pp. 203-218.
- READING H. G.; COLLINSON J. D. 1996. Clastic coast. In: Reading H. G (*ed.*) Sedimentary environments, processes, facies and stratigraphy, Oxford, Blackwell Scientific Publications, p 154-228.
- REHIM, H. A.A.A.; PIMENTEL, A.M.; CARVALHO, M.D.; MONTEIRO, M. 1986. Talco e estevensita na Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos – possíveis implicações no ambiente deposicional. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXIV, Goiânia, 1986. Anais... SBG. v.1, pp.416-422.
- SCHALLER, H. 1973. Estratigrafia da Bacia de Campos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXVII, Aracaju, Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. Anais ..., v. 3, pp. 247-258.
- STRASSER, A. et al. 1999. Depositional sequences in shallow carbonate-dominated sedimentary systems: concepts for a high-resolution analysis. Sedimentary Geology, 128(3):201-221.
- WALKER, R. G.; JAMES, N. P. 1992. Facies models: response to sea level change. Geological Association of Canada, v. 1, pp. 1-14.
- WENTWORTH, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 30(5):377-392.
- WINTER, R.W.; JAHNERT, R.J.; FRANÇA, A.B. 2007. Bacia de Campos. In: Milani, E. J. (*ed*) Boletim de Geociências da Petrobrás, 15(2): 511-529.
- ZUFFA, G.G. 1980. Hybrid arenites: their composition and classification. Journal of Sedimentary Petrology, v.50, pp. 21-29.

7. Carta de submissão



Successfully received: submission Facies identification and paleoenvironmental characterization of the Coqueiros Formation (Lower Cretaceous, Campos Basin): a high frequency stratigraphic model to support pre-salt "amp;coquinas" reservoir development in the Brazilian continental margin for Journal of South American Earth Sciences
Journal of South American Earth Sciences

04/04/2018 18:57

Para:

thiagomizuno

Ocultar detalhes

De: "Journal of South American Earth Sciences" <Evisesupport@elsevier.com>

Para: thiagomizuno@petrobras.com.br

Responda a j.bakthavachalam.1@elsevier.com

This message was sent automatically. Please do not reply.

Ref: SAMES_2018_130

Title: Facies identification and paleoenvironmental characterization of the Coqueiros Formation (Lower Cretaceous, Campos Basin): a high frequency stratigraphic model to support pre-salt "coquinas" reservoir development in the Brazilian continental margin

Journal: Journal of South American Earth Sciences

Dear Mr. Alduini Mizuno,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Journal of South American Earth Sciences. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE® at:

http://www.evisesupport.com/evisesupport/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=SAMES and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Journal of South American Earth Sciences

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our [Customer Support](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

Copyright © 2018 Elsevier B.V. | [Privacy Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.

8. Artigo Submetido

Facies identification and paleoenvironmental characterization of the Coqueiros Formation (Lower Cretaceous, Campos Basin): a high frequency stratigraphic model to support pre-salt “coquinas” reservoir development in the Brazilian continental margin

Mizuno, T.,^{a,b}*; Mizusaki, A.M.P.^a; Lykawka, R^b

^a Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil – thiagomizuno@petrobras.com.br; ana.mizusaki@ufrgs.br

^b Petrobras, Petróleo Brasileiro S.A., Av. Republica do Chile 330, CEP 20031-170, Rio de Janeiro, RJ, Brazil – rlykawka@petrobras.com.br

*corresponding author

ABSTRACT

Lacustrine carbonatic deposits are generally little studied, partly because of their lesser representativity in the global geological record, as well as the smaller amount of oil reservoirs associated with these types of rock. On the eastern Brazilian coast, from the 1970s to the present day, important discoveries were made in Cretaceous (Aptian \ Barremian) lacustrine carbonates from Santos to Sergipe-Alagoas basins, and attributed to the rift and post-rift phases that preceded the opening of the Atlantic Ocean. This study aimed to expand the knowledge of these deposits by analysing the facies and associations, defining sequences according to the current understanding of the sequence stratigraphy concepts. Rock samples were described associated with core and seismic profile data from the Badejo, Linguado, Pampo and Trilha fields in the Campos Basin. As the main lithology sampled was bioclastic (bivalves) carbonates, facies were categorized according to sedimentological criteria associated to taphonomy concepts and also grouped in associations interpreted according to the hydrodynamic gradient of a wave-dominated shelf. This enabled the definition of high and medium frequency sequences, which aided the description of three internal sequences in the interval known as Lower Coquina. This methodology can be used to interpret facies spatial distribution and serve as an analogue for cycles definition in similar depositional systems.

Key words: lacustrine carbonate; pre-salt; Sequence stratigraphy; Lower Cretaceous; Campos Basin

1.Introduction

Basins located in passive continental margins are very important for hydrocarbons exploration and exploitation. In Brazilian continental margin, the discovery of hydrocarbons in carbonate reservoirs from Lower Cretaceous in Campos

Basin (Aptian/Barremian) has occurred in 1975 (Badejo Field, followed by Linguado, Pampo and Trilha fields). These reservoirs are from Coqueiros Formation and consist mostly by bioclastic carbonates with subordinated siliciclastic sediments (Winter et al., 2007). The basins of the continental margin yield approximately 2,442 million barrels/day, corresponding to 96% of the Brazilian production (ANP, 2017). In the last 10 years, huge oil fields have also been discovered in the Lower Cretaceous carbonate interval known as pre-salt (Carminatti, 2008).

The main purposes of this work are the facies description, succession and stacking patterns in the Coqueiros Formation (Lower Cretaceous, Campos Basin). The concepts of high frequency sequence stratigraphy (Catuneanu *et al.*, 2011) are used to correlate the different areas through the definition of system tracts and key correlation surfaces, and to propose a model of stratigraphic evolution and facies distribution. Stratigraphic studies with this detail are fundamental to support the characterization of reservoir rocks and can also be used as an analogue for the pre-salt discoveries in the Santos Basin. The new south exploratory frontier of the Santos Basin (Fig. 1A) is in the Cretaceous reservoirs of the Itapema Formation (Moreira, 2007), whose geological context (age and depositional/tectonic environments) is correlated to the Coqueiros Formation from Campos Basin.

2. Study area and geologic context

The Campos Basin occupies an important part of the southeast portion of the Brazilian continental shelf, corresponding to 100,000 km². It is limited in North with Espírito Santos Basin by Vitória Arch and in South with Santos Basin by Cabo Frio Arch (Winter et al., 2007).

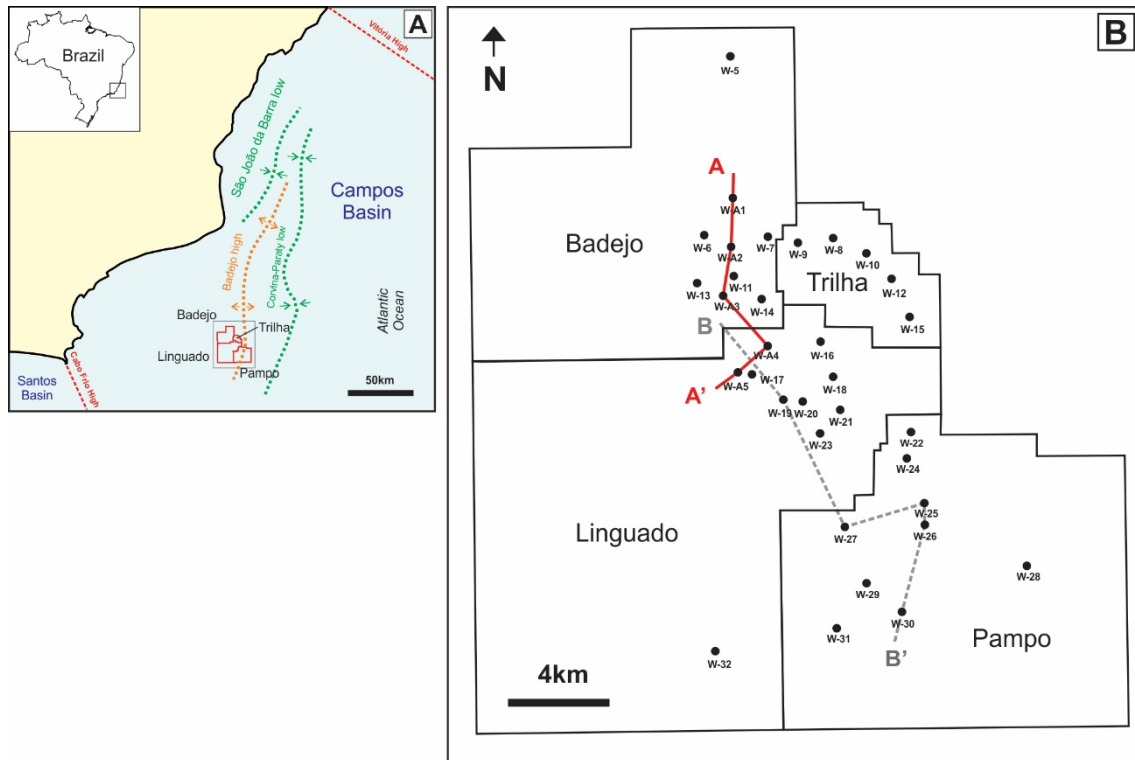


Fig. 1. (A) Location of Campos Basin in the Brazilian continental margin and oilfields here analyzed; (B) Location of the analyzed wells (●) A-A' indicates the described section in this study where medium frequency sections have been identified, B-B' indicates the seismic section of fig. 11.

The Campos Basin, as the remaining of the Brazilian continental margin, originated from the fragmentation of the Gondwana Supercontinent and consequent formation of the South Atlantic Ocean, in a process of passive margin development in the Lower Cretaceous. Concerning the tectonic evolution of this basin, Winter *et al.* (2007) identified three phases: (I) rift with volcanism in the initial phase associated to an extensional tectonic, predominance of mechanic subsidence which caused normal faults with N30°E orientation in the south, and NNE in the north part of the basin (Dias *et al.*, 1990; Chang *et al.*, 1992); (II) post-rift marked by an environment less active tectonically, with predominance of thermal subsidence and rare faults; (III) drift, free marine phase with thermal subsidence and adiastraphic tectonism, which strongly influenced the salt tectonics during the development of listric faults and dome structures as *rollers*.

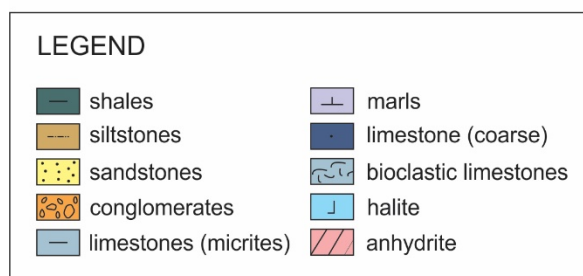
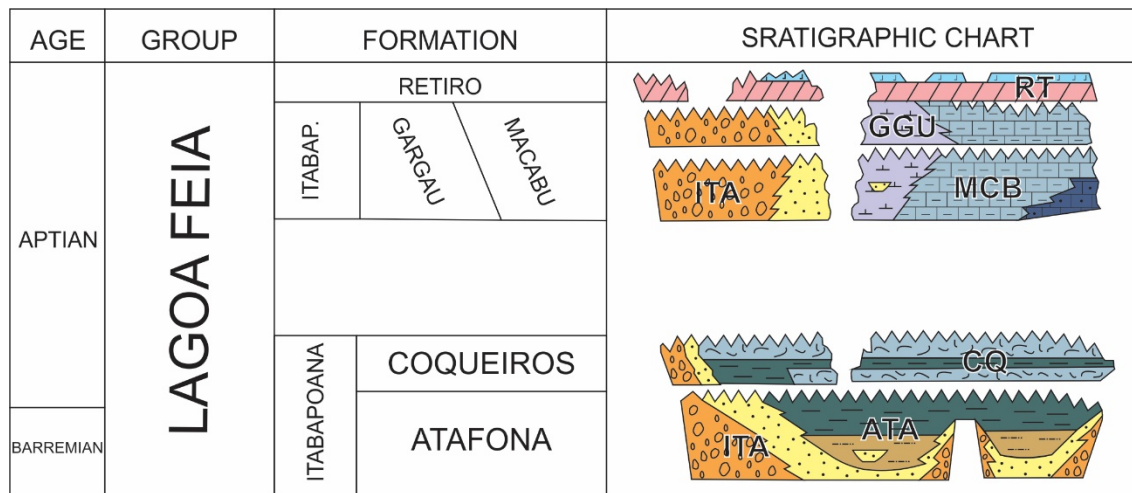


Fig. 2. Detail showing the stratigraphic chart portion where the Lagoa Feia Group is inserted (modified Winter *et al.*, 2007)

The Campos Basin sedimentation presents maximum thickness of about 9,000 m with siliciclastic, carbonatic and evaporitic deposits, and occurrence of igneous rocks, ranging from the Neocomian to the Recent. The basement is represented by the basaltic floods of the Cabiúnas Formation, with dating around 124 Ma (Mizusaki, 1986). Over the Cabiúnas Formation, lies the Atafona Formation (Fig. 2), composed by sandstones, siltstones and shales related to a lacustrine alkaline environment which allowed the formation of specific minerals such as talc and stevensite (Winter *et al.*, 2007).

The Coqueiros Formation (Fig. 2), which overlain the Atafona Formation, is the main object of this study and it is mostly composed of bioclastic carbonates and bivalves intercalated by shale layers (Rangel *et al.*, 1994). An alluvial-lacustrine environment is proposed (Schaller, 1973; Castro and Azambuja Filho, 1981; Bertani, 1984; Carvalho *et al.*, 1984) based on the facies association and fossil assemblages predominantly lacustrine with rare occurrence of foraminifers (Silva Telles, 1992). The

Itabapoana Formation represented mainly by conglomerates and sandstones is in lateral contact with those formations, associated with border faults of structural blocks (Fig. 2)(Winter *et al.*, 2007).

Baumgarten (1985) and Baumgarten *et al.* (1988) analyzed the Lagoa Feia Group proposing nine local stratigraphic marks identified through electrical logging. The stratigraphic marks are equivalent to the limits of the depositional cycles being represented by centimetric layers of fine and argillaceous sediments. Thus, the Coqueiros Formation is subdivided into two rudstone bioclastic packages named Upper Coquina and Lower Coquina (Baumgarten, 1985; Baumgarten *et al.*, 1988).

The study area is located 70 km from the coast of Rio de Janeiro city, at 85 to 120 m water depth, in the southwest portion of the Campos Basin. This is the location of Badejo, Linguado, Pampo and Trilha oilfields which occupy an area of 518 km², being the Coqueiros Formation one of the most important reservoirs at an average depth of 2,600 m (Baumgarten, 1985). The region is dominated by a structural high basement, subparallel to the coast known as Badejo High (Guardado *et al.*, 1989), as observed in the figure 1A (orange dashed line).

Carvalho *et al.* (2000) analyzes the facies associations of the Coqueiros Formation, recognizing ten paleoenvironments: alluvial fans, sandy fluvial plains, muddy fluvial plains, bioclastic sandy beaches, bioclastic calcarenite beaches, marginal lake, bioclastic bars, bioclastic sheets, bioaccumulated bank and deep lacustrine. The interval evolution is described according to five chronozones: C009.3, C1010, C1020, C1100 and C010 (Fig. 8), based on biostratigraphic works with ostracodes from Moura (1987) and Silva-Telles (1992). In the study the thick accumulations of bivalves are attributed to the result of the action of waves and currents generated during storms, reworking, transportation and redeposition.

Initially, for the analysis and facies proposition, 33 wells distributed in the study area were selected (Fig. 1B) where cores of Coqueiros Formation were available. For the detailed stratigraphy, a group of five wells in the Lower Coquina presenting the largest thickness cored interval (369 m) have been analysed. The sequences have been correlated following a section of 8.2 km, located in the north of the area, in the region of the Badejo and Linguado oil fields (Fig. 1B).

3. Methodology

The characterization of the facies and depositional sequences is based on the concepts of Walker and James (1992), Walker (2006) and James and Dalrymple (2010) and consisted in the analysis and description of 1,217 m of cores, electric logging and petrographic thin sections. Due to the variety of lithologies, a set of facies has been defined combining classifications for siliciclastic, hybrid and carbonatic rocks.

The granulometric scale of Wentworth (1922) and the diagram of Picard (1971) have been used for the siliciclastic rocks, and the textural aspects and facies structures follow the interpretation of depositional processes and paleoenvironments by Walker (1992).

The characterization of the carbonatic facies has been adapted from Dunham (1962), and Embry and Klovan (1971) associated to taphonomic parameters (Kidwell, 1991; Muniz, 2013). The criteria used in the taphonomic classification were: orientation, selection, abrasion, fragmentation and presence of articulated shells, which allowed the division into three classes of intensity according to the Table 1.


The depositional sequences followed the methodology of transgressive-regressive cycles (Cycles T-R) defined by Embry and Johannessen (1993).

The analysis of the stacking pattern of the facies associations combined with gamma ray (GR) logging interpretation was used to identify the sequences boundary,

defined in this work by the maximum regression surface (MRS). In relation to their hierarchy, the sequences can be analyzed according to different levels of observation. Criteria to classify the order of these sequences based on duration of cycles (Vail *et al.*, 1977; Mitchum and Van Wagoner, 1991; Vail *et al.*, 1991), or criteria based on the magnitude (Embry, 1995) have been proposed.

In this work two sequence hierarchy have been chosen, classified in a relative way: one of high frequency and higher order, and other of medium frequency and minor order (Catuneanu *et al.*, 2006). The high frequency has 0.5 to 5 meters and was observed through the analysis of transitions between the facies and corresponds to the small-scale sequence of Strasser *et al.* (1999). To that author it consist in the stacking of elementary sequences corresponding to smaller cycles of environmental change, in general, being represented by a layer. The medium frequency sequence, analyzed in part of the studied region (Fig. 1), would be that composed by several high frequency sequences where changes in the stacking pattern have been analyzed and correlated between the cores of the section A-A' (Fig. 1B).

Table 1 – Classes defined for the quantification of taphonomic parameters defined in this work, based on Kidwell (1991) and Muniz (2013).



Class	% fragmentation	sorting	abrasion	articulation
I	> 70%	well	high	<1%
II	35-70%	moderately	medium	1%-20%
III	<35%	poorly	low	>20%

Table 2 – Siliciclastic and hybrid facies, interpretations based on Walker (2006), Walker and James (1992), James and Dalrymple (2010), Dunham (1962) e Embry & Klován (1971).

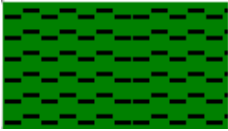
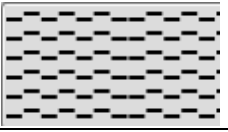

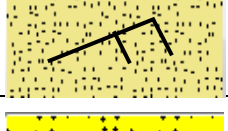



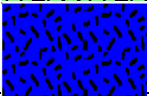
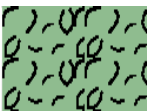
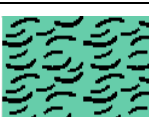
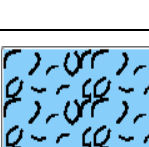


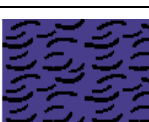

Symbol	Facies Code	Description	Interpretation
	Fsm	Massive to slightly laminated deposits of pelite and marls	Suspension
	MWm	Massive carbonate mudstone and wackestones with sparse shells	Suspension
	F	Fine laminated siltite, with levels of shells and erosive base	Suspension and episodic traction and erosion due distal tempestites (sensu Aigner, 1985 Walker and Plint 1992)
	Ar	Very fine sandstone with ripples	Deposited by lower flow regime
	Ab	Medium sand with low-angle cross-bedding	Deposited by upper flow regime
	Rh	Massive hibrid rudstone	Distal tempestites and gravity flows

Table 3 – Rudstone and grainstone facies with interpretations, based on Dunham (1962), Embry and Klovan (1971), Fursich and Oschman (1993), Kidwell (1991) and Muniz (2013).

Symbol	Facies Code	Description	Orientation	Sorting	Abrasion	Fragmentation	Articulation	Interpretation
	PGm	Massive to slightly laminated packstones and grainstones	non-oriented to slightly oriented	III	III	II / III	I/II	Suspension, reworking and winnowing in low energy environment
	G	Grainstone with planar or low-angle cross-bedding	oriented	I / II	I	I	I	Planar-bedded deposited by upper flow regime
	Rfma	Rudstones and floatstone with fine matrix, articulated shells, slightly fragmented	non-oriented to slightly oriented	III	III	III	II / III	Decanted fine matrix and shells in life position or slightly reworked near the original habitat (Parautochthonous)
	RFc	Rudstones and floatstone with cross-bedding, moderated fragmented alternated with fine matrix laminae	oriented	III	II / III	II / III	I	Alternation between suspension and traction processes due to the action of storm waves, below the fair weather wave base
	Rma	Massive rudstones, slightly reworked, with articulated shells	non-oriented to slightly oriented	II / III	III	III	II / III	Reworking and winnowing in low energy environment (Fursich and Oschmann, 1993).
	Rm	Massive Rudstones, bimodal with well preserved shells and a interstitial fraction moderated to very fragmented shells	non-oriented to slightly oriented	II / III	II / III	II / I	I	Hyperconcentrated storm flows proximal tempestites (Fursich and Oschmann, 1993)
	Rmf	Massive rudstones, highly fragmented	non-oriented to slightly oriented	I / II	I / II	I / II	I	Hyperconcentrated storm flows with very reworked shells (Fursich and Oschmann, 1993)
	Rc	Rudstone with low-angle cross-bedding, moderated fragmented	oriented	II / III	II / III	II / I	I	2D or 3D dune migration by longshore and gradient currents (Aigner, 1986; Clifton, 2006)
	Rcf	Rudstone with planar or low-angle cross-bedding, highly fragmented	oriented	I / II	I / II	I	I	Planar-bedded deposited by upper flow regime

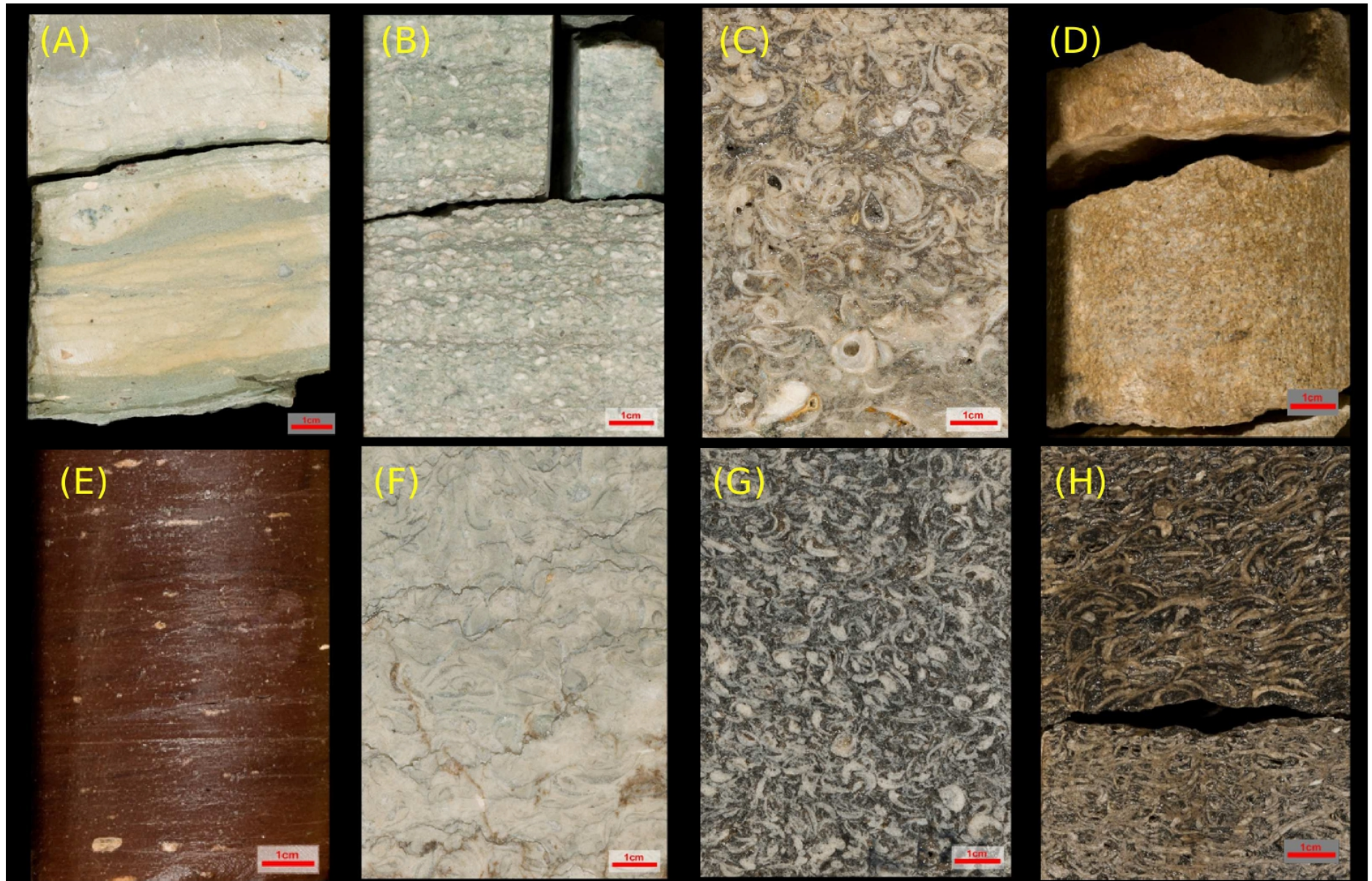


Fig. 3. Facies: (A) Mudstone – MWm (well-A1; 2665.3m); (B) Rudstone with fine stratified matrix– RFc (well-30; 2945.4 m); (C) Rudstone with articulated shells – Rma (well-30; 2921.0 m); (D) Grainstone - bivalve – G (well-11; 2708.9 m); (E) Siltite, laminated – F (well-A3; 2644.1 m); (F) Rudstone with articulated shells and matrix – Rfma (well-20; 2766.3 m); (G) Rudstone massive - Rm-bv (well-23; 2847.0 m); (H) Rudstone with stratification –Rc (well-A4; 2775.2 m), see table 2 and 3 and figure 1B.

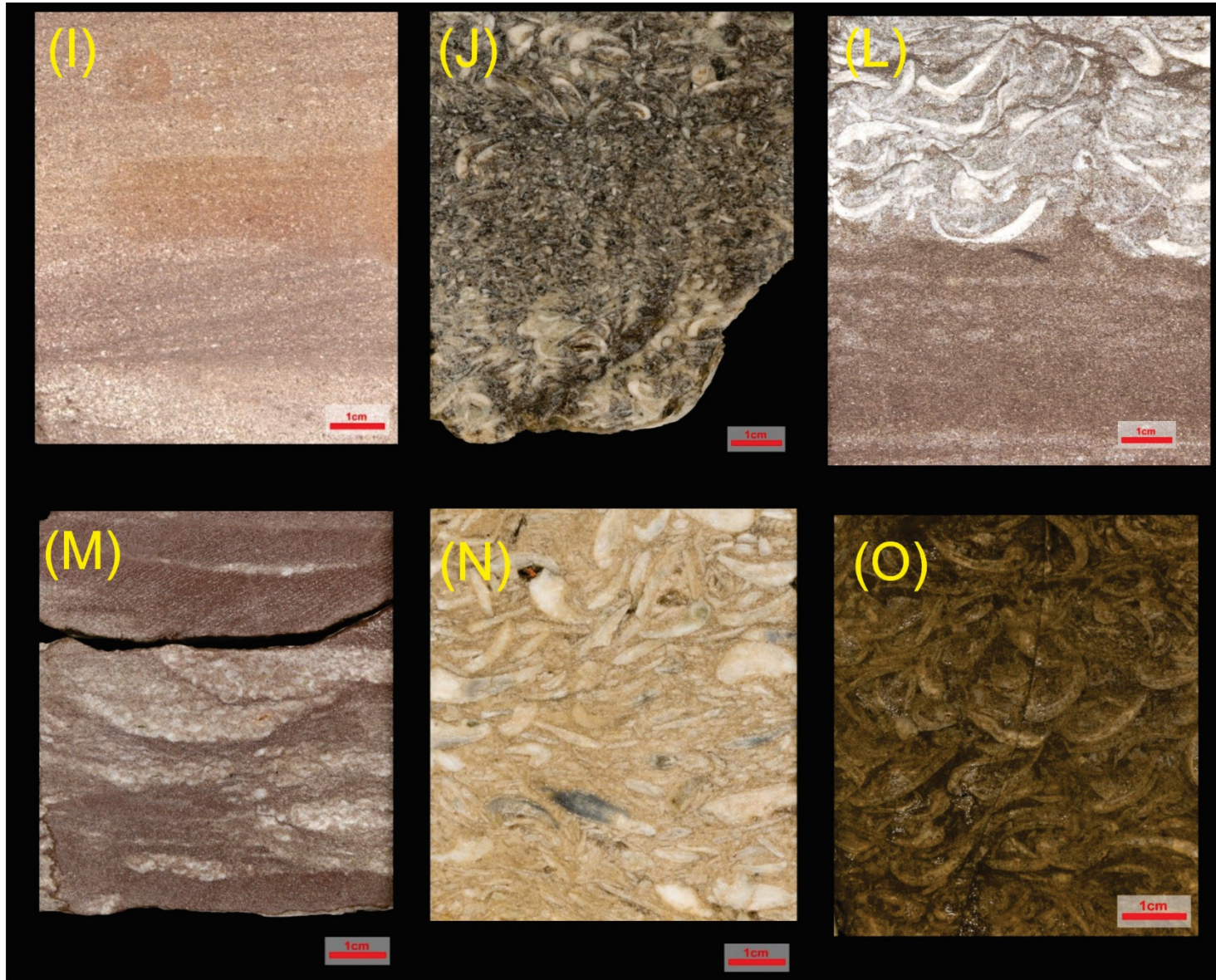


Fig. 4. Facies: (I) Sandstone, medium, with low angle cross stratification –Ab (well-A1; 2597.8 m); (J) Rudstone, massive with high rate of fragmentation – Rmf (well-26; 2940.3 m); (L) Rudstone, hybrid, massive – Rh in contact with siltite, laminated – F (well-A1; 2688.2 m); (M) Structures like gutter casts in mudstones (well-A1; 2714.8 m), (N) Rudstones with oriented shells with high fragmentation and roundness – Rcf (well-A3; 2646.6 m); (O) Rudstone, massive, shells with low fragmentation and roundness - Rm-bv (well-26; 2918.3 m), see tables 2 and 3 and figure 1B

4. Definition of sedimentary facies and their association

Fifteen facies have been defined (Tables 2 and 3), according to criteria which permitted the paleoenvironmental interpretation (Walker, 1992, 2006; Fursich and Oschman, 1988; James and Dalrymple, 2010). The facies have been grouped in four associations (Fig. 5, Table 4) which follow the hydrodynamic zoning of a storm wave-dominated shelf following onshore-offshore gradients (Reading and Collison, 1996). This grouping was based on the assessment of predominant processes and on the sedimentary and taphonomic characteristics of the facies in each of them.

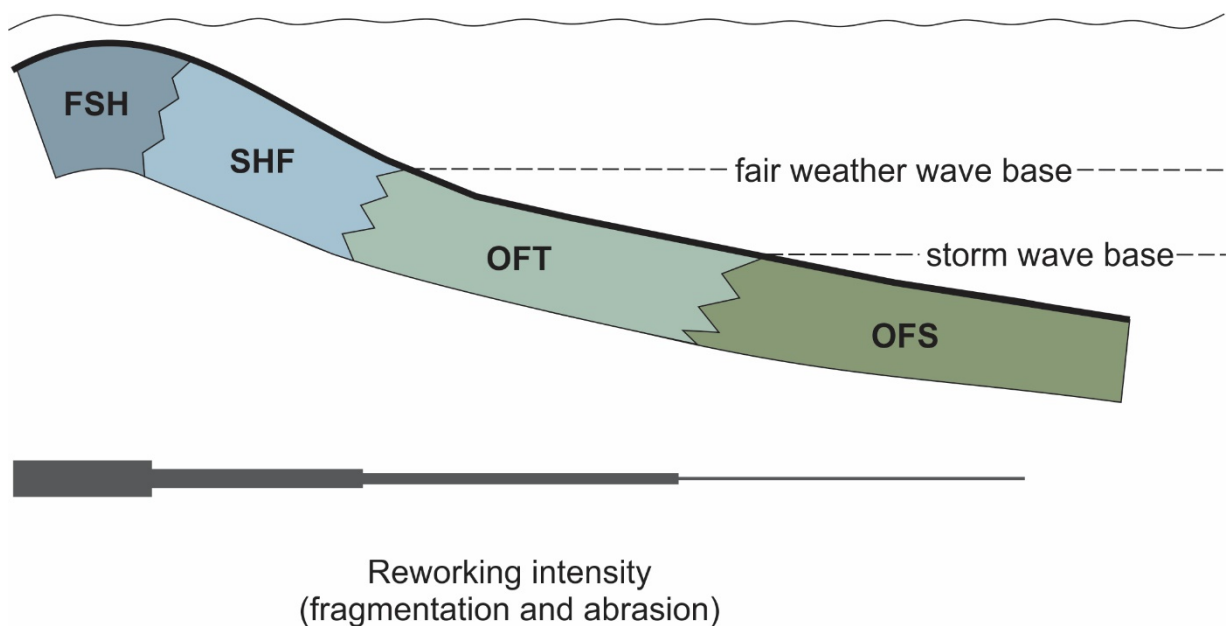


Fig. 5. Facies association according to hydrodynamic zoning of a storm-wave-dominated shelf with reworking intensity observed in the bioclastic fragments (modified from Reading and Collison, 1996) (see Table 4). No scale.

It was chosen a nomenclature of facies association of a depositional system adapted from the shallow marine wave-dominated system (modified from Reading and Collison, 1996), since they are the main agent of transport and deposition of the facies herein described.

The classifications of lacustrine environments widely adopted, such as Tucker and Wright (2009), have not revealed as suitable ones, since their environment diagnostic characteristics are mostly linked to the type of vegetation, which is not observable in the study area and, as indicated by those authors, are scarcely identified in old deposits.

Table 4– Summary of the facies associations description.

Association code	Facies association	Facies	Interpretation	Deposits
FSH	Foreshore	Rcf, G, Ab, Rmf	lowest water level, predominance of upper flow regime, high dissipated energy, intense fragmentation and abrasion of the shells	beach deposits
SHF	Shoreface	Rm, Rc, Rma	region above fair weather wave base, frequent wave action and presence of longshore and return currents	bars complex, proximal tempestites
OFT	Offshore transition	F, Ar, RFc, Rfma, PGm, Rh	region between storm wave base and fair weather wave base, process of decantation and episodic wave action caused by storms	pelagic deposits, autochthonous and parautochthonous shells deposits, distal tempestites and gravitational deposits
OFS	Offshore	Fsm, MWm	region below storm wave base, predominance of decantation process	pelagic deposits

Foreshore (FSH)

Description - Facies association with the predominance of rudstones (Rcf, Rmf) and grainstones (G) composed by bivalves (Fig. 3D), high fragmentation, abrasion varying between high and middle, and bioclasts moderately to well selected. The facies have low angle cross stratification resulting from the shell orientation (Fig. 4N), sometimes imbricated, and intercalations of layers with distinct reworking degrees. The siliciclastic facies corresponding to this association are quartz-feldspathic sandstones of medium granulometry (Ab) with low angle crossed stratification (Fig. 4I).

Interpretation - This association corresponds to the shallowest region, where predominate processes of upper flow regime, resulting in dissipation of the high energy, which results in intense fragmentation and abrasion of shells as well as the low angle cross stratification. This stratification associated to the high degree of fragmentation of shells and relative well selection indicates a deposition in a swash coastal zone (Walker, 1992). In the areas of higher siliciclastic contribution there is occurrence of medium sandstones (Ab, Table 2) such as north of the studied area. This sediment originates from continental sources from the west sector of the basin where alluvial deposits occur (Castro and Azambuja Filho, 1981).

Shoreface (SHF)

Description - It is composed by rudstones with bivalves (Rm, Fig. 3G, and Rc, Fig. 3H) with low to moderate fragmentation, medium to low abrasion and moderate to poorly sorted (Tables 1 and 3). The facies observed usually present massive aspect (Rm), secondarily with plane/low angle crossed stratification and oriented shells (Rc). The facies of this association, in general, present a bimodal pattern due to the presence of shells

with low fragmentation and larger size, mixed to shells with a higher degree of reworking and smaller size. Secondly, Rudstones of bivalves with articulated shells (Rma; Fig. 3C) having lower degree of fragmentation and abrasion are described.

Interpretation- Region above the level of the storm waves with combined action of waves and currents. The presence of longshore currents would be the reasons of the stratification and orientation of shells due to tractive transport processes observed in the Rudstone facies with crossed stratification (Rc, Table 3 and Fig. 3H). Proximal tempestites (Fürsich and Oschmann, 1993) formed by rip currents would mixture shells of different reworking levels and could be responsible by the massive structure of the Rudstone facies (Rm) (Table. 3, Fig. 3G). Rudstones with articulated shells could occur in regions near to the limit of fair weather wave action where the winnowing process would remove the fine matrix from the sediment, preserving the shells (Fürsich and Oschmann, 1993). The occurrence of articulated shells in reworked facies as massive Rudstone (Rma-bv) could also suggest that some species of bivalves would be able to live in high energy environments with coarse sediments.

Offshore transition (OFT)

Description -The offshore transition facies association is characterized by siltstones and sandstones with very fine granulometry (F, Fig. 3E)) intercalated with rudstone with fine matrix (RFma, Fig.3F, RFc, Fig.3B), packstone (PGm) and hybrid rudstone (Rh, Fig. 4L). Siltstones (F) have a massive to finely laminated structure, and very fine sandstones (Ar) develop wavy marks. Rudstones with fine matrix and articulated shells (RFma) show low fragmentation degree and low abrasion. Sometimes, rudstones with variable reworking degree (RFc) also occur, and millimetric intercalations of siltstone/claystone and bivalve shells. Packstones have incipient laminated structures and are composed mainly by ostracods and peloids in fine carbonate matrix. Hybrid facies exhibit varied fragmentation and abrasion features and poor sorting, also presenting mixtures in different proportions of sandstone, siltstones and mudstones among fragments of bivalves, ostracodes and peloids. There is also local occurrence of structures like gutter casts between centimetric layers of mudstones (Fig. 4M).

Interpretation- Region between the base level of storm wave action and fair weather wave action (Reading and Collison, 1996). Decantation and traction under lower flow regime are alternated with hyperconcentrated flows resulting from distal tempestites and gravitational flows. Rudstones with matrix and articulated shells (RFma) represent facies deposited near to the environment where the bivalves have lived.

Offshore (OFS)

Description - The offshore facies association is mainly composed by mudstone with marl (Fsm) and mudstone with wackestone (MWm, Fig. 3A, Table 2), both with massive structure and incipient plane-parallel massive lamination. The occurrence of ostracod carapaces is common, as well as the occasional occurrence of bivalve fragments.

Interpretation - Region above the low level storm wave action and dominated by decantation process with occasional input of distal flows, with ostracod carapaces and fragments of bivalves.

5. Sequences and depositional control

5.1 High frequency sequence

The high frequency sequences have been observed through the analysis of the transition of individual facies in the cores. Therefore, it was possible to observe that the facies of deeper associations transit more frequently to shallower associations, which reinforce the model based on the hydrodynamic zoning of a wave-dominated shelf. A model of the ideal full succession facies expressed in figure 6 was elaborated.

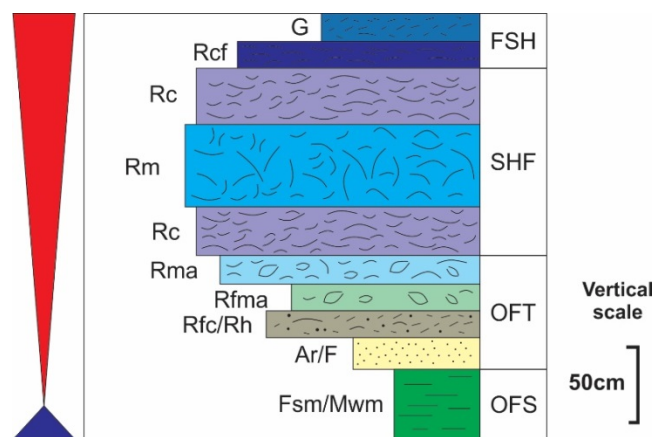


Fig.6. Ideal facies succession of a wave-dominated shelf, in the high frequency sequence. See tables 2, 3 and fig. 3, 4.

Well-A2

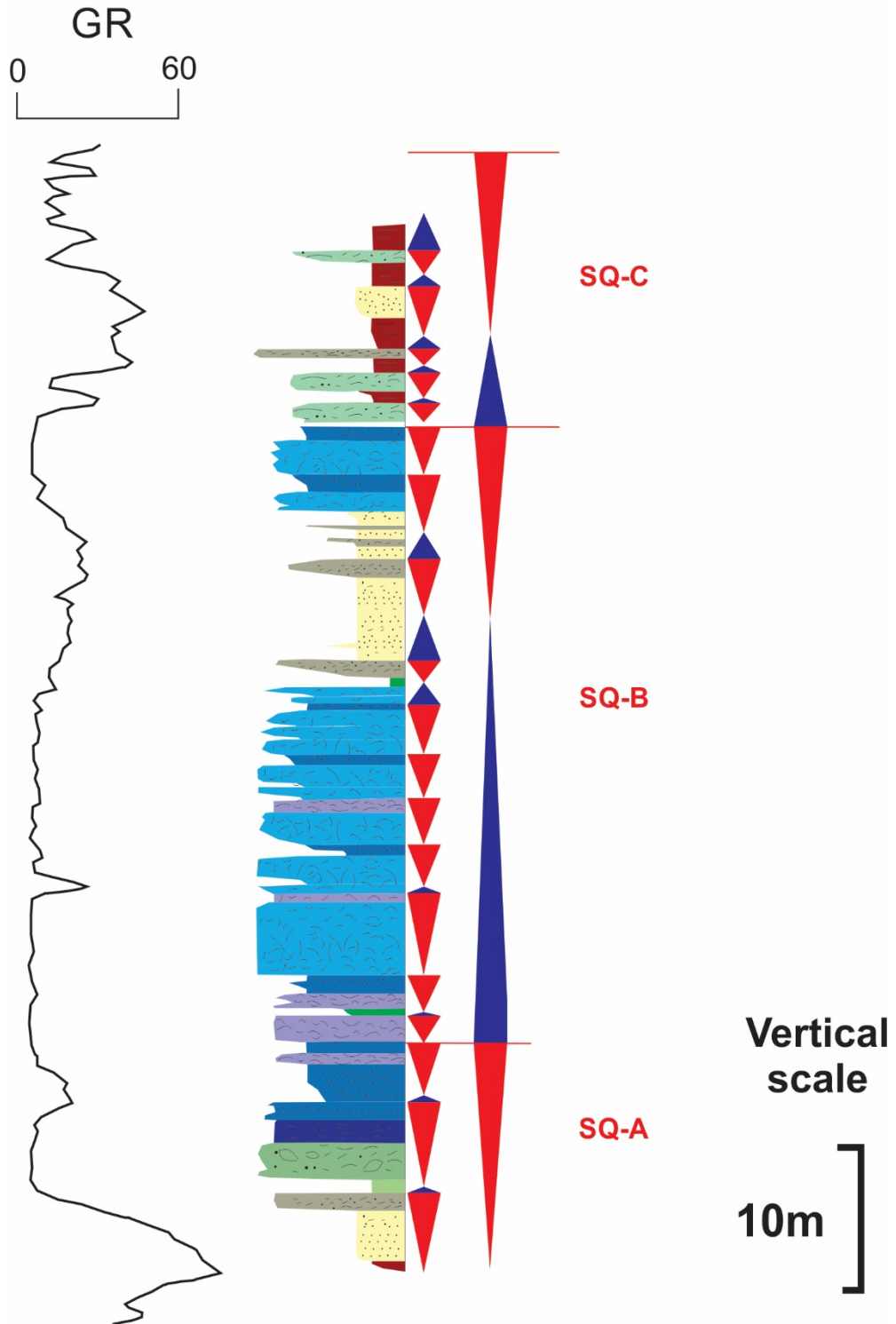


Fig. 7. Well A2 with gamma-ray logging (API units), facies and facies sequences interpreted following tables 2 and 3 and interpretation of high frequency sequences (left) and medium frequency (right). SQ = sequence, SQ-A (sequence A).

Regarding a high frequency T-R cycle, it is possible to observe that the passage of the facies associations OFS and OFT to those of shallower context SHF and FSH (Fig. 5, Table 4) is gradual, however, the transition of SHF and FHS associations to OFS and OFT are more abrupt. In facies succession siltstones (F), hybrid rudstone (Rh) and rudstone with fine matrix (Rfc) become gradually less frequent and are intercalated with rudstone (Rc, Rm) as the system becomes carbonate dominated. In contrast grainstone (G) and rudstone (Rcf) are quickly overlapped by pelites (Fsm) and siltstones (F). This transitions are an evidence of a gradual progradation of the shallower coastal system to a deeper one and the abrupt transition could indicate a fast increase of the base level in the high frequency due to the tectonic/climatic context or that the siliciclastic contribution, associated to a positive water balance and increase of runoff inhibited the carbonate production and the possibility of shell concentration. Thus, the cycles are dominantly asymmetrical, and can be characterized as shallowing-upward cycles, common in some carbonate deposits (James 1984; Pratt et al. 1992).

The facies occur as layers of centimetric thickness (elementary sequences, Strasser *et al.*, 1999) and compose groups that define small-scale sequences (Strasser *et al.*, 1999). Their limits represent changes in the stacking pattern in intervals of a few meters. Well A2 (Fig. 7) shows the high and medium frequencies sequences.

5.2. Medium frequency sequence

The medium frequency sequences have been observed through the analysis of changes in the stacking pattern in the section AA' (Figs. 1B and 8). The present work proposes a subdivision of the Lower Coquina interval, TR-1 sequence (Muniz, 2013), in three sequences of medium frequency (Figs. 6 and 7), described in detail below.

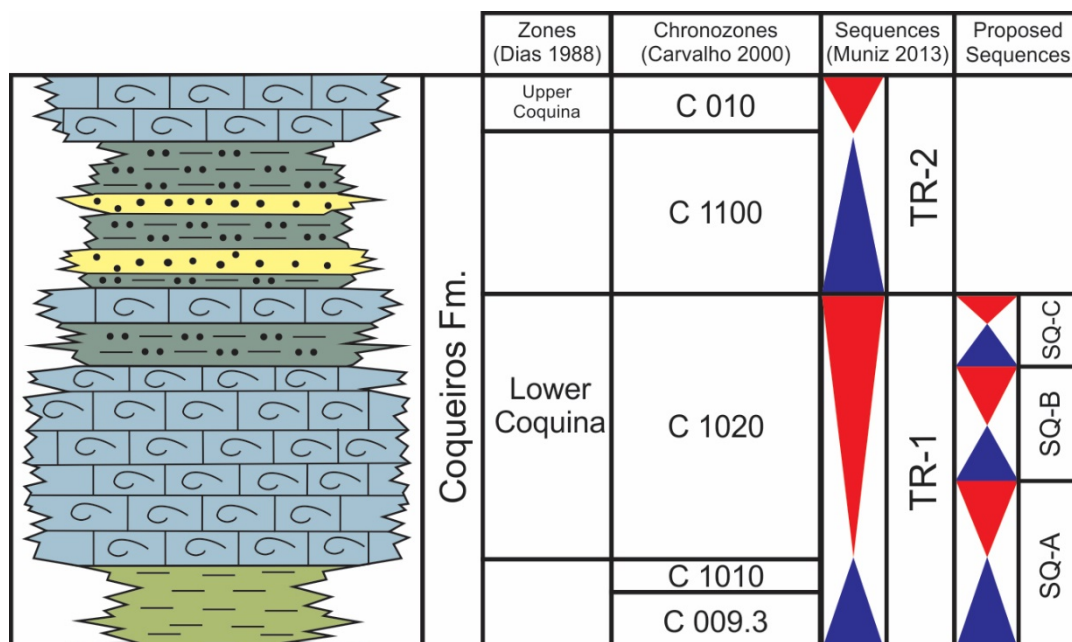


Fig. 8. Detailed stratigraphy of Coqueiros Formation with medium frequency sequences.

5.2.1 Sequence A

The sequence A (SQ-A, Fig. 9) has an average thickness of 60 m in the cores and electric logging of the five cores from the section A-A' (Fig. 1B). The basal limit coincides with the base of the sequence TR-1 of Muniz (2013). The facies that would correspond to the transgressive tract of this sequence have not been cored, but are described as fine sediments by Muniz (2013) in drill cutting samples. The gamma ray logging in this interval have high values (around 60 API), which confirm the high content of fine siliciclastic sediment. Moreover, it is possible to observe an increase in the gamma ray values from the base toward the top, where the upper limit of the transgressive tract was defined (Fig. 9). The regressive tract of the sequence is characterized by the high concentration of bivalves. In the section of the figure 9, at the base of the tract predominate offshore transition (OFT) facies associations, rich in siltstones and fine sandstones (facies F, Ar), that migrate toward the top to rudstones with fine matrix (RFc), hybrid rudstones (Rh) and rudstones with articulated shells (Rma). Toward the top of the tract occur the predominance of rudstones (Rc and Rm) of the upper shoreface facies association (SHF), and the shells fragmentation increase toward the upper limit of the sequence where occur rudstones with high fragmentation and low angle stratification (Rcf) of the foreshore (FSH).

5.2.2 Sequence B

The average thickness of the sequence B is 40 m in the five wells of the section A-A' (Fig. 1B). Its lower limit is defined by changing the stacking pattern from progradational to retrogradational. The transgressive tract presents deposits of rudstones (Rm and Rc) belonging to the facies association SHF, in the lower portion, composing thick amalgamated layers in the region of the cores A2, A3 and A4, which can reach 45 m thickness (Fig. 11). In the upper part of the transgressive tract, there is increase in the proportion of facies of deeper environments, hybrid rudstones (Rh), very fine sandstones (Ar) and siltstones (F), which intercalate with massive rudstones (Rm) with predominance of terrigenous toward the top. The regressive tract has its lower limit marked by another change in the stacking pattern. Where in the lower portion are intercalated siltstones (F), fine sandstones (Ar), packstones (PGm) and rudstones with fine matrix (RFc) and in the upper part an increase in the proportion of massive rudstones with low angle crossed stratification of the upper shoreface facies association.

5.2.3 Sequence C

This is the thinnest sequence, with an average thickness of 15 m in the wells of section A-A' (Fig. 1B). The base of the sequence presents abrupt change of facies, occasionally discordant. The transgressive tract is characterized mainly by siltstones (F) and rudstones of fine matrix (RFc), making up a well defined package that can be correlated among the wells. The regressive tract presents transition between the predominance of siltstones (F) and the more frequent presence of hybrid rudstones (Rh), fine matrix rudstones (RFc) and massive rudstones (Rm). There is an increase in the presence of terrigenous in this sequence compared to the previous ones.

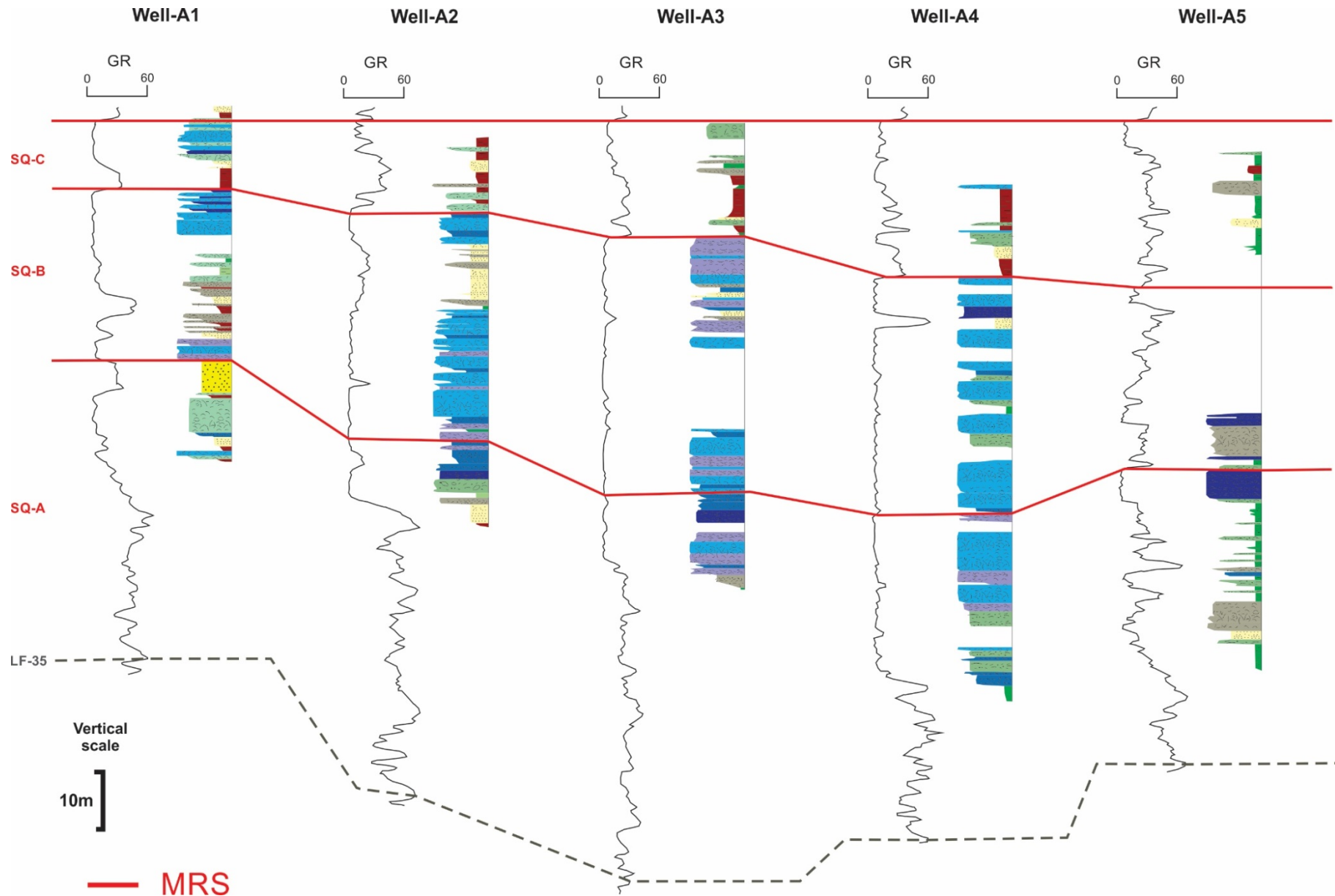


Fig. 9. Stratigraphic correlation section showing the five wells of section A-A', N-S (Fig. 1b), with gamma ray logging (scale of 0 to 60 API) and description of facies (patterns according tables 2, 3 and fig.6) in the right - MRS – maximum regressive surface, red lines indicates the sequence boundary and dashed grey lines, LF-35 mark (Baumgarten; 1985; Baumgarten *et al.*, 1988) indicate the base of the sequence C. The upper limit of the sequence A is the *datum* of the section.

6. Interpretations and discussions

The medium frequency sequences have been correlated in the section A-A' (8.2 km in the Fig. 1B and 9) demonstrating that it is possible to observe changes in the stacking pattern in the analysis scale (Figs. 1A, B and Fig. 11), which is particularly important to the predictability of reservoirs characteristics. Analyzing the upper boundary of the sequence TR-1 (Muniz, 2013) it can be observed that it would coincide with the boundary of the sequence C (SQ-C) defined in this work (Fig. 6). Notwithstanding, the analysis of the section A-A' (Fig. 9) reveals that the sequence C and B presents higher proportion of deeper facies associations. This suggests that the upper limit of the sequence TR-1 could be lower and coincident with the top of the sequence A, being the sequence C and B part of the low frequency transgressive tract of the sequence TR-2 (Muniz, 2013).

The analysis of variations in the section A-A' reveals a thickening trend toward the south (well A4) which accumulates the thickest bioclastic packages. This accumulation could result from the progradation of the system toward low areas of tectonic origin, hemigrabens and in grabens visible in seismic sections and inherited from the intense rift tectonic corresponding to the deposition of the Atafona Formation (Fig. 11). Another evidence for this progradation is the well A1, which has higher incidence of coarse terrigenous, possibly indicating proximity with the paleolake coast, would be to northwestern direction from the studied area, where Castro and Azambuja (1981) described alluvial sediments.

Recent studies by Thompson *et al.* (2015) compared the facies of the Coqueiros Formation (Campos Basin), Morro do Chaves Formation (Sergipe Alagoas Basin) and Toca Formation (Congo e Cabinda Basin, Africa) all from lacustrine environment, during the Gondwana breakup (Early Cretaceous). The authors indicates similarities in the depositional processes, but differences in the stacking pattern, diagenesis, climate and water chemistry. The West Africa deposits have shelf facies with abrupt and stepped edges, while in the Campos Basin the ramp deposits are of low angle.

In relation to the size of the lake during the Cretaceous, the probable environment of the Coqueiros Formation, according to Moulin (2010) would be around 2,000 km², approximately three times larger than the biggest lake in the present Africa Rift, the Tanganika lake, which has about 600 km². In the Tanganika lake, waves of 3.0 to 4.0 m have been recorded, generated by winds of 90 km/h during storms (Cohen, 1989). Strong currents induced by winds (0.30 m/s in large lakes) occur in shallow regions with directions parallel to the coast as described by Talbot and Allen (1996). Therefore, the sedimentary processes connected to currents and wave action are common in recent large lakes, and could be even more intense in the study area.

Goldberg *et al.* (2017) described the facies of the Coqueiros Formation with emphasis on the composition of three basic lithotypes (clastic, carbonates and stevensite), organizing the associations with emphasis in the re-sedimentation. They proposed a model based on the reworking of ancient sediment due to the faults movements along the edge of the lake. The model proposes gravity flows as the unique depositional process responsible for the observed lithology, which would not describe the depositional system with its complexity faciology as herein interpreted.

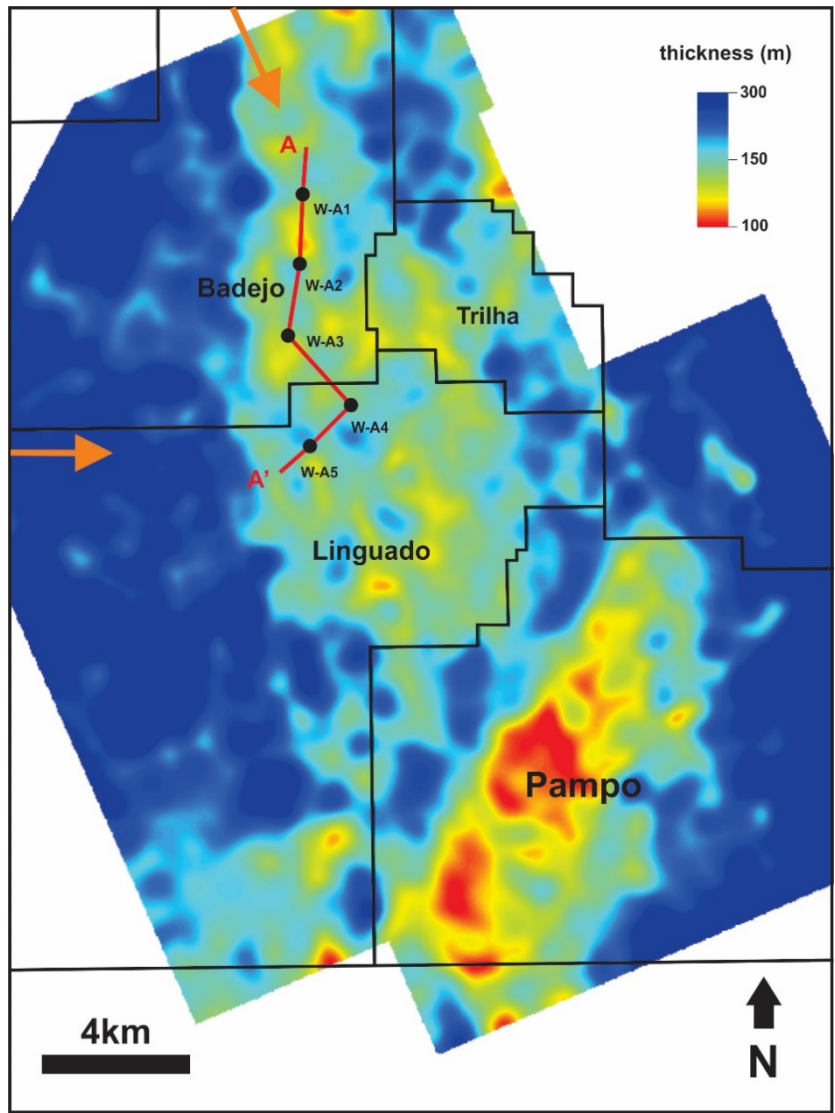


Fig.10. Isopach map of Coqueiros Formation, with section A-A' (red line). Orange arrows indicate siliciclastic contribution coming from the adjacent continent (see Fig. 1).

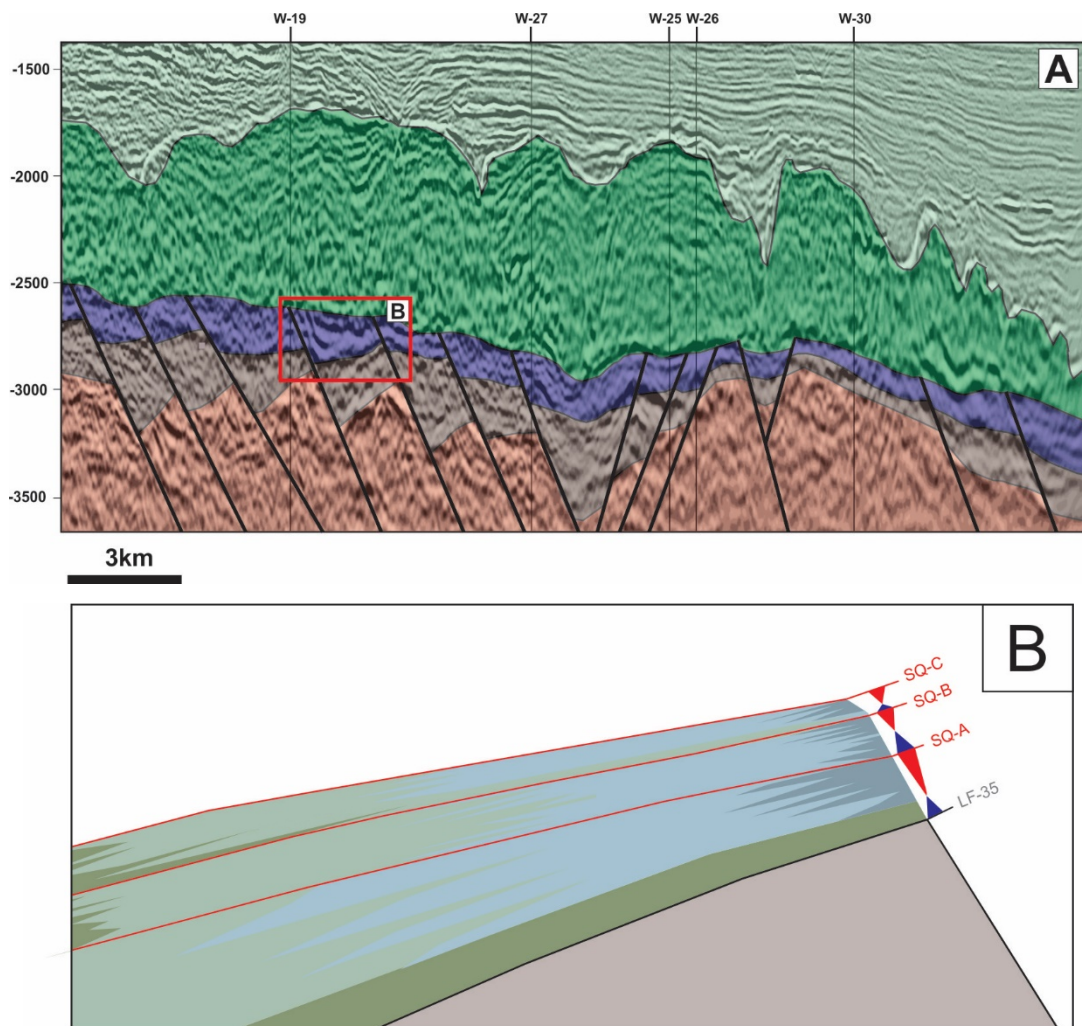


Fig. 11. (A) Seismic section interpreted with the Camboriú Formation/basement, basal in red, Atafona Formation above in grey and the Coqueiros Formation in blue; section B-B', N-S (Fig. 1B) (B) Illustration showing detail of the sector with facies association in color following the figure 5 and table 4 and medium frequency sequences.

The facies distribution of the studied range is a result of the complex relationship between platform architecture, tectonics and climate, as pointed out by several authors (Carvalho *et al.*, 2000; Muniz 2013; Thompson *et al.*, 2015). As can be observed in the isopach map of the Coqueiros Formation (Fig. 10), the low thicknesses (around 150 m) have a northwestern alignment in the Badejo, Linguado and Trilha fields. A large thickening towards the west is observed, where the formation presents more than 300 m. In the Pampe field, the low thicknesses have a north-east alignment with thickening to the east. The thickness variations are the result of an inherited paleotopography from the basement and the reactivation of faults during deposition. Figure 11 shows a seismic section where we can

observe the relationship between the thickness of the Coqueiros Formation (Blue) and the basement / volcanic from the Camboriú Formation (in red). An illustration (Fig. 11B) shows how the relationship of the shallower and deeper facies associations in a small portion of the formation and the medium frequency cycles defined in this work would be. The presence of correlated medium frequency cycles should be the result of climatic variations that affected the level of the lake and are responsible for the vertical variation observed. Correlational cyclical variations were already pointed out in studies such as Baumgarten (1985) and Baumgarten *et al.* (1988). Terrigenous sedimentation can also be considered as a relevant factor in the facies distribution, and the orientations of these contributions are indicated in figure 10. To the north of well A1 we observed the presence of medium sand, and the high thicknesses to the west of Badejo and Linguado fields could have been a depocenter that concentrated the terrigenous sediment. This west low trapping terrigenous sediment was the main responsible for shell concentration on the Badejo-Linguado high, which propitiate, in general, a better quality reservoir.

7. Conclusions

Since their discovery, the reservoirs of the Coqueiros Formation have been very important and now, the interest has been renewed due to the new explorations in the Santos Basin. The facies classification and the description of sedimentary and taphonomic characteristics allowed the definition of 16 facies grouped into four associations organized according to shallower to deeper environments, and hydrodynamic processes. This enabled the definition of both transgressive and regressive system tracts used to identify cycles into two scales. An ideal succession of facies that can be related to high frequency cycles and organized in medium frequency cycles has been proposed and correlated in five wells in a section with 8.2 km. This methodology permits the stratigraphic characterization in reservoir level which is essential for the development of future production fields. In relation to the use of the methodology for analogous environments, it can be concluded that the deposits that share

similarities in the rocks composition and depositional processes which generated the facies would present stratigraphic patterns similar to those observed in the Coqueiros Formation. So, the use of these facies associations and methodology for the stratigraphic characterization would also be applicable for the Itapema Formation, in the Santos Basin.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to express their gratitude to Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A) and to the Programa de Pós-Graduação em Geociências of Universidade Federal do Rio Grande do Sul, for the support during the development of this research. There is a special thanks to the colleagues who participated in the project, Ana Carla Bizotto, Carolina Correia, Eduardo Roemers Oliveira and João Paulo Olivito for the aid with the sample descriptions and discussions.

REFERENCES

- Aigner, T. 1985. An ancient storm depositional system: Dynamic stratigraphy of intracratonic carbonates, upper muschelkalk (middle triassic), south-german basin. In: Storm Depositional Systems: Dynamic Stratigraphy in Modern and Ancient Shallow-Marine Sequences. Lecture Notes in Earth Sciences, v. 3. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 51-158.
- ANP, 2017. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis S.A., março 2017 (<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>).
- Baumgarten, C. S. 1985. Evolução estrutural de Pampo, Badejo, e Linguado durante a deposição da Formação Lagoa Feia. In: Boletim Técnico da Petrobrás, v. 28, n. 2, pp. 91-101.
- Baumgarten, C. S.; Dutra, A. J.C.; Scuta, M. S.; Figueiredo, M. V. L.; Sequeira, M. F. P. B. 1988. Coquinas da Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos: Evolução da Geologia de Desenvolvimento. In: Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 2, n. 1, pp. 27- 36.
- Bertani, R. T.; Carozzi, A. V. 1984. Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, offshore Brazil: rift-valley stage lacustrine carbonate reservoir. Journal of Petroleum Geology, v. 8, pp.37-58;199-220.
- Chang, H. K.; Kowsmann, R. O.; Figueiredo, A. M. F.; Bender A. A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. Tectonophysics, v. 213, pp. 97-138.
- Carvalho, M. D.; Monteiro, M.; Pimentel, A. M.; Rehim, H. A. A. 1984. Microfácies, diagênese e petrofísica das coquinas da Formação Lagoa Feia em Badejo, Linguado e Pampo, Bacia de Campos. PETROBRÁS-CENPES-Diger, relatório interno, 130 p.
- Carvalho, M.D.; Praça, U.M.; Silva-Telles, A.C.; Jahnert, R.J.; Dias, J.L. 2000. Bioclastic carbonate lacustrine facies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil, in E.H. Gierlowski-Kordesch and K.R. Kelts, (eds.), Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology, 46, pp. 245-256.

- Carminatti M., Wolff B., Gamboa, L. 2008. New exploratory frontiers in Brazil. In: Council W.P., editor. 19th World Petroleum Congress. World Petroleum Council; Madrid: 2008. p. 11.
- Castro, J. C.; Azambuja Filho, N. C. 1981. Fácies, análise estratigráfica e reservatórios da Formação Lagoa Feia, Cretáceo Inferior da Bacia de Campos. PETROBRAS/CENPES/LABOR, Relatório interno, p. 110.
- Catuneanu, O.; Galloway, W. E.; Kendall, C. G. S. C.; Miall, A. D.; Posamentier, H. W., Strasser, A. ; Tucker, M. E. 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. Newsletters on stratigraphy, v. 44, n. 3, pp. 173-245.
- Catuneanu, O. 2006. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier, 375 p.
- Clifton, H. E. 2006. A reexamination of facies models for clastic shorelines. SPECIAL PUBLICATION-SEPM, v. 84, p. 293.
- Cohen, A. S. 1989. The taphonomy of gastropod shell accumulations in large lakes: an example from Lake Tanganyika, Africa. Paleobiology, v. 15, n. 1, pp. 26-45.
- Dias, J.L.; Scarton, J.C.; Esteves F.R.; Carminatti, M; Guardado, L.R. 1990. Aspectos da Evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. In: Raja Gabaglia, G.P and Milani, E.J. (*Coords.*). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRAS, pp.333-360.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (*Ed.*) Classification of carbonate rocks. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1962, Memoir 1. pp. 108-122.
- Embry, A. F.; Klovan, J. E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Islands, Northwest Territories. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 19, pp. 730-781.
- Embry, A. F.; Johannessen, E. P. 1993. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. Arctic Geology and Petroleum Potential, Norwegian Petroleum Society (NPF), Special Publication, v. 2, pp. 121-146.
- Embry, A. F. 1995. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals. Sequence stratigraphy on the Northwest European Margin, Special Publication, v. 5, pp. 1-11.
- Fürsich, F. T.; Oschmann, W. 1993. Shell beds as tool in basin analysis: The Jurassic of Kachchh, western India. Journal of the Geological Society, v. 150, pp. 169-185.
- Goldberg, K.; Kuchle, J.; Scherer, C.; Alvarenga, R.; Ene, P. L.; Armelent, G.; De Ros, L. F. 2017. Re-sedimented deposits in the rift section of the Campos Basin. Marine and Petroleum Geology, v. 80, pp. 412-431.
- Guardado, L. R.; Gamboa, L. A. P.; Lucchesi, C. F. 1989. A Model for a Producing Atlantic Type Basin. In: Edwards, J.C. & Santogrossi, P. A. (Eds.) Divergent/Passive Margin Basin. Petroleum Geology of the Campos Basin, Brazil, Tulsa: AAPG. Memoir 48, pp. 3-79.
- Horschutz, P.M.C; Scuta, M. S. 1992. Fácies-perfis e mapeamento de qualidade do reservatório de coquinas da Formação Lagoa Feia do Campo de Pampo. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 6, n. 1/2, pp. 45-58.
- James, N.P., 1984, Shallowing-upwards sequences in carbonates, in Walker, R.G., ed., Facies Models, Second Edition: St. Johns, Newfoundland, Geoscience Canada, Reprint Series 1, p. 213-228.
- James, N. P.; Dalrymple, R. W. 2010. Facies Models 4: St. John's, Nfld. Geological Association of Canada, 575 p.
- Kidwell, S. 1991. The stratigraphy of shell concentrations. In: Allison, P. A.; Briggs, D. E. G. (*Eds.*). Taphonomy: Releasing Data/Locked in the Fossil Record: topics in geobiology. Plenum Press, v. 9, pp. 211-290.
- Mitchum, R. M.; Van Wagoner, J. C. 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. Sedimentary Geology, v. 70, n.2-4, pp. 131-160.

- Mizusaki, A.M.P. 1986. Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos-caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos. UFRJ, Mater dissertation, p. 104.
- Moulin, M.; Aslanian, D.; Unternehr, P. 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, v. 98, n. 1-2, pp. 1-37.
- Moreira, J. L. P.; Madeira, C. V.; GIL, J. A.; Machado, M. P. 2007. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n. 2, pp. 531-549.
- Moura, J.A. 1987. Biocronoestratigrafia da seqüência não-marinha do Cretáceo Inferior da Bacia de Campos, Brasil: ostracodes. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 10. Rio de Janeiro, SBP, 1987. *Anals*, v. 2, pp. 717-731.
- Muniz, M. C., 2013. Tectono-stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian Continental Rift Carbonates, in Southern Campos Basin, Brazil. Royal Holloway University of London, PhD Tesis. P. 324.
- Pratt, B.R., James, N.P., and Cowan, C.A., 1992, Peritidal carbonates, in Walker, R.G., and James, N.P., eds., *Facies models: Response to Sea Level Changes*: St John's, Newfoundland, Geological Association of Canada, p. 303–322.
- Picard, M.D. 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, v. 41, n. 1, pp. 179-195.
- Rangel, H.D.; Martins, F.A.L.; Esteves, F.R.; Feijó, F.J. 1994. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 8, pp. 203-218.
- Reading, H.G.; Collinson, J.D. 1996. *Clastic Coasts*. In: Reading, H.G., Ed., *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*, 3rd Edition, Blackwell Science, London, p. 688.
- Rehim, H. A.A.A.; Pimentel, A.M.; Carvalho, M.D; Monteiro, M. 1986. Talco e estevensita na Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos – Possíveis implicações no ambiente deposicional. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia, 1986. *Anals*, Goiânia, SBG, v. 1, p. 416-422.
- Schaller, H. 1973. Estratigrafia da Bacia de Campos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju, Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. *Anals*, v. 3, pp. 247-258.
- Silva-Telles JR, A.C. 1992. Novo zoneamento da seqüência das coquinas da Formação Lagoa Feia (Neo-Jiquiá da Bacia de Campos) com base em ostracodes-aspectos evolutivos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXVII, 1992. *Anals*, São Paulo, SBG, v. 2, p. 489.
- Strasser, A.; Pittet, B.; Hillgärtner, H.; Pasquier, J. B. 1999. Depositional sequences in shallow carbonate-dominated sedimentary systems: concepts for a high-resolution analysis. *Sedimentary Geology*, v. 128, n. 3, pp. 201-221.
- Talbot, M.R.; Allen, P.A. 1996. *Lakes*. In: Reading, H.G.,(ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*, 3rd Edition, Blackwell Science, Oxford, pp. 83-124.
- Thompson, D. L.; Stilwell, J. D.; Hall, M. 2015. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-salt coquinas of Brazil and West Africa. *Gondwana Research*, v. 28, n. 1, pp. 26-51.
- Tucker, M. E.; Wright, V. P. 2009. *Carbonate sedimentology*. John Wiley & Sons, 482 p.
- Vail, P. R.; Mitchum JR, R. M. 1979. Global cycles of relative changes of sea level from seismic stratigraphy: resources, comparative structure, and eustatic changes in sea level. *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins*, AAPG Special Volumes . pp. 469-472.
- Vail, P.R., Audemard, F., Bowman, S.A., Eisner, P.N., Perez-Cruz, C., 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology e an overview. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer Verlag, Berlin, pp. 617-659.
- Walker, R. G.; James, N. P. 1992. *Facies models: response to sea level change*. Geological Association of Canada, v. 1, pp. 1-14.

- Walker, R.G. ; Plint, A.G. 1992. Wave- and Storm-Dominated Shallow Marine Systems. In: Walker, R.G.; James, N.P. (*Eds.*), *Facies Models: Response to Sea Level Change*, Geological Association of Canada, GeoText 1, Newfoundland, pp. 219-238.
- Walker, R. G. 2006. Facies models revisited: Introduction. *Special Publication-SEPM*, v. 84, pp. 1-17.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, Chicago, v. 30, n. 5, pp. 377-392.
- Winter, R.W.; Jahnert, R.J.; França, A.B. 2007. Bacia de Campos. In: Milani, E. J. (*Ed*), *Boletim de Geociências da Petrobrás* , v. 15, n. 2, pp. 511-529.