UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CONTROLES ESTRATIGRÁFICOS E PREDIÇÃO DA PARAGÊNESE
DIAGENÉTICA DOS CARBONATOS LACUSTRES DA FORMAÇÃO
COQUEIROS NOS CAMPOS DE BADEJO, TRILHA, LINGUADO E PAMPO -
APTIANO DA BACIA DE CAMPOS (RJ)

Carolina Rodrigues de Araujo Corrêa

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo
2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Corrêa, Carolina Rodrigues de Araujo
Controles estratigráficos e predição da
paragênese diagenética dos carbonatos lacustres da
Formação Coqueiros nos campos de Badejo, Trilha,
Linguado e Pampo - Aptiano da Bacia de Campos (RJ)
/ Carolina Rodrigues de Araujo Corrêa. - São Paulo,
2016.

101 p., il.

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP
Orient.: Almeida, Renato Paes de

1. Coquinas 2. Controles da diagênese 3.
Predição diagenética 4. Rift Lagoa Feia 5. Bacia de
Campos I. Título

Para Neusa e Pedro

Agradecimentos

À PETROBRAS pelo apoio à realização do trabalho, em especial ao gerente de geologia de reservatórios Carlos Henrique Lima Bruhn, pelo auxílio no processo de liberação dos dados e informações, apoio e incentivo.

Aos colegas geólogos Ana Carla Bizzoto, Eduardo Roemers, João Paulo Olivito e Thiago Mizuno pelos momentos, por vezes penosos, de descrição de um quilômetro de testemunhos em Macaé, sempre recompensados com uma cerveja e um fim de tarde na praia de Cavaleiros. A eles também agradeço pela análise estratigráfica da seção estudada e pela elaboração do modelo conceitual deposicional do reservatório.

Ao Prof. Dr. Renato Paes de Almeida pelas críticas técnicas, sempre muito perspicazes.

Aos colegas geólogos Ednilson Bento Freire, Gerson Terra e Olinto Souza Junior pelas valiosas contribuições.

Ao geofísico Álvaro Castro, pelo apoio, disposição e paciência de ouvir minhas ideias e conclusões (muitas vezes repetitivamente).

E principalmente ao colega geólogo Ricardo Lykawka, que, além de participar das descrições dos testemunhos em Macaé, da elaboração do modelo conceitual de deposição e da análise estratigráfica, efetuou as correlações sedimentares, foi o idealizador do tema do mestrado, esteve sempre presente e disposto a contribuir tecnicamente com discussões, críticas e motivações, além de ajudar na escolha dos rumos que deviam ser seguidos e os que deviam ser abandonados do começo ao final deste trabalho.

Resumo

As coquinas de bivalves do Grupo Lagoa Feia (Eoaptiano) ocorrem na área sudoeste da Bacia de Campos e constituem reservatórios de hidrocarbonetos. Foram descritos 1030 metros de testemunhos e 368 lâminas delgadas para definir os controles estratigráficos dos eventos e produtos diagenéticos observados e propor um método de predição da paragênese diagenética. Inicialmente foram definidas 34 fácies sedimentares posteriormente agrupadas em 7 associações de fácies nas quais foram reconhecidos os conjuntos de processos geneticamente relacionados, que levaram à interpretação do paleossistema deposicional. Sete produtos eodiagenéticos foram observados na seção informalmente denominada Coquina Inferior e desses, quatro alteram bastante as características permoporosas primárias das rochas, sendo eles: cimentação por calcita blocosa em mosaico, cimentação por sílica microcristalina (quartzo), cimentação por calcedônia e dissolução. Interpreta-se um forte controle do(s) tipo(s) de produto(s) diagenético(s) com a variação do nível base do lago, conforme as seguintes premissas: o cimento de sílica microcristalina ocorre preferencialmente quando o nível base está alto e as rochas sob condições lacustre freáticas, pois, devido ao grande escoamento superficial, o lago neste momento encontra-se enriquecido em Si (proveniente do intemperismo e lixiviação das seções de rochas anteriores), porém ainda diluído (com um volume de água muito amplo), favorecendo a precipitação do quartzo e não da calcedônia. A partir do momento em que o nível do lago cai relativamente, a concentração de Si aumenta e a calcedônia passa a ser o cimento principal. Neste momento, as rochas estão sob condições de ambiente de zona de mistura, pois o nível do lago estaria mais baixo, porém ainda não totalmente em condições de domínio meteórico. A seguir, com nível do lago mais baixo ainda, as rochas passam para o ambiente meteórico e ocorre a precipitação de calcita blocosa (provavelmente necessitando de um tempo de residência baixo, pois o mineral ocorre em todo o intervalo da Coquina Inferior) no meteórico freático, e dissolução no meteórico vadoso. Quando o nível do lago volta a subir, as condições favorecem novamente a precipitação de calcedônia, e, em um nível posterior, mais alto ainda, de sílica microcristalina, iniciando assim um novo ciclo de alterações diagenéticas. A correlação entre a paleobatimetria deposicional da associação de fácies sedimentar e o nível base requerido para determinado(s) tipo(s) de produto(s) diagenético(s) encontrado(s) levou à criação de uma curva de “velocidade relativa de variação do nível base”, que pôde também ser construída sinteticamente a partir das fácies sedimentares e dos perfis de raios gama e sônico. Tendo em mãos essa curva sintética, foi possível fazer o “caminho inverso” e criar um modelo preditivo (ou seja, sem descrição da diagênese em lâminas delgadas) da paragênese diagenética a partir da associação de fácies sedimentar e da “velocidade relativa de variação do nível base” em escala de poço (1D) e também em um grid geocelular (3D). A seção Coquina Inferior dos reservatórios da Bacia de Campos apresenta elevado grau de heterogeneidade vertical, gerada pela ciclicidade estratigráfica e pela intensa modificação eodiagenética. O entendimento dos fatores controladores da diagênese levou à criação de um método preditivo da paragênese diagenética em escala de poço (1D) e também em um grid geocelular (3D) que poderá ser usado para a caracterização e gerenciamento de outros campos petrolíferos em carbonatos.

Palavras-chave: Coquinas. Rift. Lagoa Feia. Controles da diagênese. Predição diagenética. Bacia de Campos.

Abstract

The bivalve coquina from Lagoa Feia Group (Eoaptian), occurs in southwestern part of Campos Basin and consists petroleum reservoirs. 1030 meters of core and 368 thin sections were described to define the stratigraphic controls of the diagenetic events and then create a diagenetic paragenesis predictive method. Firstly, 34 sedimentary facies were defined and then grouped in seven facies associations. These associations have the same genetically depositional process relationship and they were used to define the depositional paleosystem. Seven eodiagenetic products were observed in the informally called Lower Coquina section and four from these products cause an important primary rock permeability and porosity alteration: block calcite cementation, microcrystalline silica (quartz) cementation, chalcedony cementation and dissolution. There is a strong control of the diagenetic(s) product(s) type(s) and the base level variation. Microcrystalline silica occurs when the base level is high and the conditions are under lacustrine phreatic environment. Under these conditions, the lake has a Si enrichment due to run off great rates but still diluted, because the huge volume of water. This situation favors the precipitation of quartz instead of chalcedony. When the lake level falls, Si concentration rises, and chalcedony becomes the main cement phase. At this time, the conditions are mostly under mixing zone. When the lake falls again, meteoric environment becomes predominant. At the meteoric phreatic environment blocky calcite occurs as cement and at the meteoric vadose zone environment dissolution is the main process. When the lake level raises again, the conditions favor the precipitation of chalcedony and, in the next level, (higher base level than previous) the conditions are good to microcrystalline silica precipitation. At this moment, a new diagenetic cycle is started. The correlation between depositional paleobathymetry of sedimentary facies association and the lake level required for different types of diagenetic paragenesis led to the creation of a curve called "relative velocity of base level variation". This curve may also be calculated synthetically from sedimentary facies, gamma ray and velocity logs. With this synthetic curve it was possible to do a "reverse path" procedure and generated a diagenetic paragenesis predictive method. The coquina reservoir has a high level of heterogeneity due to stratigraphic cyclicity and due to eodiagenetic transformations. The understanding of diagenetic controls led to a diagenetic predictive method creation on 1D (well) and 3D (geocell grid). This knowledge can be used for the characterization and management of others carbonates associated oil fields.

Keywords:: Coquinas. Rift. Lagoa Feia. Diagenesis Controls. Diagenetic prediction. Campos Basin.

Lista de Figuras

Figura 1.1. Bacia de Campos com campos petrolíferos e principais reservatórios (modificado de Bruhn <i>et al.</i> , 2003). Destaque em envoltória quadrada para os campos estudados;	2
Figura 2 1.Coluna cronoestratigráfica da Bacia de Campos destacando a Formação Coqueiros do Grupo Lagoa Feia (modificado de Winter <i>et al.</i> , 2007). Seção de detalhe: dip na área de estudo, mostrando os intervalos “Coquina Superior” e “Coquina Inferior” correlacionados em poços dos campos de Badejo, Linguado e Pampo.A figura também mostra a posição dos intervalos testemunhados na seção das coquinas em vermelhoGR = perfil de raios gama e ILD = perfil de resistividade (Bizotto, 2014). Localização dos poços na figura 2.2.	5
Figura 2 2. Mapa com os poços utilizados no estudo. O retângulo representa os limites do dado sísmico utilizado.....	6
Figura 2 3.(A) Classificação para rochas siliciclásticas baseada em Picard (1971). Tamanho das partículas: escala granulométrica de Wentworth (1922). (B) Classificação utilizada para as rochas carbonáticas baseada em Dunham (1962) e Embry e Klován (1971). Modificado de Terra <i>et al.</i> (2010).	9
Figura 2 4.Classificação de Choquette e Pray (1970) para os tipos básicos de porosidade encontrados em rochas carbonáticas; poros representados em azul (modificado de Scholle e Ulmer Scholle, 2003).....	10
Figura 2 5. Classificação de tipos de cimento utilizada - modificada de Flügel 2004.....	11
Figura 2 6.Exemplo de cabeçalho para descrição dos produtos diagenéticos feita no Excel®	12
Figura 2 7.Carregamento da planilha como curva de poço (dados pontuais associados a uma determinada profundidade). Exemplo de método de análise da diagênese utilizada – poços RJS-168. Trilhas (da esquerda para direita) 1 – profundidade. 2 – raios <i>gama</i> , 3 – associação de fácies, 4 – dissolução (grau de 1 a 3), 5 – calcedônia (%), 6 – cimentação <i>bladed</i> (%), 7 – sílica microcristalina (%), 8 – cimentação calcítica blocosa (%) e 9 – perfis NPHI, RHOB, análise petrofísica básica (preto) e porcentagem de poros estimada na descrição (vermelho).	12
Figura 2 8. Possíveis transformações de conchas aragoníticas de bivalves. Diferentes composições e microestruturas geradas pela diagênese (modificado de Tucker, 1992). Em vermelho, as texturas encontradas na seção estudada.	14
Figura 2 9. Ambientes diagenéticos para sistema lacustre da fase rift da Bacia de Campos. Modificada de Bertani e Carozzi, (1985). Lacustre freático 1 = zona ativa e 2 – zona estagnada.	16
Figura 2 10. Características dos ambientes diagenéticos e tempo necessário (em anos) para cada processo associado. Figura adaptada de Flügel, (2004).	17
Figura 2 11. Tipos de cimento carbonáticos e tramas encontradas comumente em cada ambiente diagenético. Figura adaptada de Flügel, (2004).	18
Figura 3.1. Mapa das províncias estruturais relacionadas à fase <i>rift</i> das Bacias de Campos e Santos. BH=Alto de Badejo - retângulo preto=localização da área estudada; TA=Arco de Torres; AP = Platô de Abrolhos.	21
Figura 3.2. Arcabouço estrutural da seção <i>rift</i> da Bacia de Campos, com destaque para os altos estruturais e baixos deposicionais (Rangel e Martin, 1998, <i>apud</i> Bizzotto, 2014).	22
Figura 3.3. Seção geológica <i>dip</i> esquemática da Bacia de Campos mostrando o arcabouço estrutural e estratigráfico (Rangel e Martins, 1998, <i>apud</i> Bizzotto, 2014).	22
Figura 3. 4. Perfis tipo do Grupo Lagoa Feia mostrando as quatro sequências deposicionais: Clástica-Basal, Talco-Estevensita, Coquinas e Clástica-Evaporítica. As sequências são limitadas por marcadores estratigráficos ou discordâncias. O topo da sequência das coquinas é marcado pela discordância regional Pré-neo-Alagoas (Marco LF-80). Legenda: RG = perfil de raios gama e ILD = perfil de resistividade. Datum: Marco LF-85 (base da seção evaporítica). Figura construída com base em Baumgarten, 1985 e Dias <i>et al.</i> , 1988 e retirada de Bizotto, 2014.	28
Figura 3.5. Quadro biocronoestratigráfico do Grupo Lagoa Feia com base em ostracodes. A figura mostra as cronozonas, biozonas e as sequencias deposicionais do Grupo Lagoa Feia (figura adaptada de Calazans, 2010).	29
Figura 3.6. Modelo deposicional a sequência lacustre do Grupo Lagoa Feia -Bacia de Campos,de Guardado et	

al., (1989). Os bancos de coquinas concentram-se sobre os altos sindeposicionais do embasamento. ... 31

Figura 4.1. Fluxograma de classificação dos rudstones bioclásticos a bivalves (coquinas).....	33
Figura 4.2. Fácies siliciclásticas.	34
Figura 4.3. Fácies siliciclásticas.	35
Figura 4.4. Fácies híbridas.....	36
Figura 4.5. Fácies carbonáticas finas a médias.....	37
Figura 4.6. Fácies carbonáticas finas a médias.....	38
Figura 4. 7. Fácies de <i>rudstones</i> bioclásticos a bivalves (coquinas).....	39
Figura 4.8. Fácies de <i>rudstones</i> bioclásticos a bivalves (coquinas).....	40
Figura 4. 9. Fácies de <i>rudstones</i> bioclásticos a bivalves (coquinas).....	41
Figura 4.10. Trato de fácies de banco/praias de conchas bem desenvolvido. AF1 – associação de fácies de área protegida rica em ostracodes. AF2 – associação de fácies de berma/barras bioclásticas a bivalves. AF3 – associação de fácies de praia/barras bioclásticas. AF4 – associação de fácies bioclásticas profundas. AF5 – associação de fácies siliciclásticas depositadas sob ação de tempestades.....	44
Figura 5 1. Cimentação calcítica blocosa em mosaico eodiagenética. Poço PM-3A -2940.45 m (MD).....	46
Figura 5 2. Cimentação calcítica blocosa em mosaico mesodiagenética. Poço BD-04 2728.9 m (MD).....	46
Figura 5 3. Cimentação calcítica <i>bladed</i> . Poço RJS-168 2820.8m (MD).....	47
Figura 5 4. Cimentação de sílica microcristalina. A - nicóis paralelos, B - nicóis cruzados. Poço BD-04 2703.8m (MD).	48
Figura 5 5. Cimentação de calcedônia - nicóis paralelos, poço PM-3A 2914.25m (MD).	48
Figura 5 6. Substituição das conchas por sílica microcristalina. Poço PM-3A – 2967.89m (MD).....	49
Figura 5 7. Substituição das conchas por calcedônia. Poço PM-5 – 2973.45m (MD). Notar também cimentação calcítica mesodiagenética no poro pós substituição de calcedônia, que, devido à compactação mecânica, encontra-se fraturada.....	49
Figura 5 8. Envelope micrítico; Poço BD-04 2728.9 m (MD).	50
Figura 5 9. Calcita neomórfica. Concha com linhas de crescimento preservadas. Poço PM-5 2991.75 m (MD).	51
Figura 5 10. Feições de dissolução poço PM-5 A – 2987.35 m (MD). B – 2987.95 m (MD).	51
Figura 5 11. A-Contato de grão suturado poço PM-4 2923.95 m (MD) e B – estilólitos poço BD-04 2708.4m (MD).	52
Figura 5 12. Tipos de cimento carbonáticos e tramas encontradas comumente em cada ambiente diagenético. Figura adaptada de Flügel, (2004).....	52
Figura 5 13. Tipos de cimento carbonáticos e tramas observados nas lâminas descritas e ambientes diagenéticos comumente associados. Figura adaptada de Flügel, (2004).....	53
Figura 5 14. Perfis com resultados das análises semiquantitativas executadas nas lâminas delgadas – cada ponto preto representa uma lâmina descrita. Trilhas (da esquerda para direita) 1 – profundidade. 2 – raios <i>gamma</i> , 3 – associação de fácies, 4 – dissolução, 5 – calcedônia, 6 – cimentação <i>bladed</i> , 7 – sílica microcristalina, 8 – cimentação calcítica blocosa e 9 – perfis NPHI, RHOB, análise petrofísica básica (preto) e porcentagem de poros estimada na descrição (vermelho).	54
Figura 5 15. Ciclos sedimentares interpretados a partir da associação de fácies (2ª trilha da esquerda para a direita) e sucessão ideal dos produtos diagenéticos interpretada (indicada pela seta).....	55
Figura 5 16. Interpretação dos ambientes diagenéticos – ciclos e sucessões da figura 5.18.	56
Figura 5 17. Poços com as sequências dos produtos diagenéticos interpretada como “ideal”. Última trilha com os ambientes diagenéticos interpretados (legenda das cores – mesma da figura 5.18).....	57
Figura 5 18. Demonstração de como o rebaixamento do nível base causa a sucessão dos produtos diagenéticos observada na posição do poço apresentado na figura 5.18.	58
Figura 5 19. Sucessão ideal dos produtos diagenéticos interpretada e curva de variação do nível base respectiva. A curva de variação do nível base com escoamento superficial e razão de evaporação/precipitação foi adaptada de Andrews, 2015.....	60
Figura 5 20. Produtos mesodiagenéticos representados em uma curva de subsidência ao longo do tempo.....	60

Figura 6.1. Duas parageneses de produtos diagenéticos distintas, porém com a mesma interpretação de maior tempo de residência na zona meteórica vadosa.....	62
Figura 6.2. Interpretação da velocidade relativa de variação do nível base a partir da associação de fácies deposicionais e paragenese diagenética. Lógica estabelecida para a AF2 (no retângulo).	63
Figura 6. 3. Interpretação da velocidade relativa de variação do nível base a partir da associação de fácies deposicionais (no exemplo associações de fácies carbonáticas mais rasa x mais profunda), e das sequências de superposição dos produtos diagenéticos (trilhas: AF- associação de fácies, vermelha – dissolução, laranja -calcedônia, roxa – cimentação <i>bladed</i> , azul- cimentação de sílica microcristalina. .	64
Figura 6.4. Perfis com resultados das análises semiquantitativas executadas nas lâminas delgadas – cada ponto preto representa uma lâmina descrita. Trilhas (da esquerda para direita) 1 – profundidade. 2 – raios <i>gama</i> , 3 – associação de fácies, 4 – dissolução, 5 – calcedônia, 6 – cimentação <i>bladed</i> , 7 – sílica microcristalina, 8 – velocidade relativa de variação do nível base (ver legenda de cores na figura 5.24) e 9 – perfis sísmico em preto e total de cimento em % volumétrica em vermelho (estimada na descrição das lâminas delgadas).	65
Figura 6.5. Velocidades relativas do nível base discretizadas na correlação sísmico (DT) e raios <i>gama</i> (GR) e explicação pelas mudanças de porosidade relacionadas a dissolução e cimentação. Raso estável em azul, subida gradual verde claro e subida rápida em verde escuro.	66
Figura 6.6. Discretização utilizada para cálculo das velocidades relativas de variação do nível base e geração de uma curva sintética a partir das diferentes associações de fácies (“AFs”) e dos valores de <i>gama</i> (eixo y) e sísmico (eixo x).	67
Figura 6. 7.Comparação das curvas de variação do nível base interpretadas (4ª trilha da esquerda para direita-legenda de cores da fig. 6.3.) com as calculadas utilizando os valores de sísmico e raios <i>gama</i> para as diferentes associações de fácies. A 5ª trilha da esquerda para direita mostra a diagênese - em vermelho dissolução, laranja calcedônia e azul sílica microcristalina.....	68
Figura 6.8. Exemplos de “eletrofácies” de velocidade relativa de variação do nível base calculadas para poços sem descrição de lâminas delgadas.	68
Figura 6.9. Método de predição 1D da paragenese diagenética a partir da curva de velocidade relativa de variação do nível base e das AFs elaborado para poços sem descrição de lâminas delgadas.	69
Figura 6.10. Comparação entre as análises semiquantitativas das parageneses diagenéticas principais e as curvas sintéticas (curvas pretas contínuas) geradas a partir da associação de fácies e o nível base interpretado.	70
Figura 6.11.Exemplo dos produtos diagenéticos previstos para os poços LI-07 e LI-03. Esses poços foram utilizados para comparação do resultado da paragenese diagenética calculado com a descrição de lâminas– “teste cego”.	70
Figura 6.12. Resultado do teste cego 1. Comparação dos dados de lâminas (6ª, 8ª e 10ª trilha da esquerda para a direita) - cada ponto representa a amostra descrita - com os dados calculados (5ª, 7ª e 9ª trilhas da esquerda para a direita) para as três parageneses diagenéticas principais - poço LI-07.	71
Figura 6.13.Resultado do teste cego 2. Comparação dos dados de lâminas (6ª, 8ª e 10ª trilha da esquerda para a direita) - cada ponto representa a amostra descrita - com os dados calculados (5ª, 7ª e 9ª trilhas da esquerda para a direita) para as três parageneses diagenéticas principais - poço LI-03.	72
Figura 6.14. Fluxograma do método efetuado para a análise dos produtos diagenéticos, definição dos seus controles e predição da paragenese para poços sem amostras e/ou descrição de lâminas.	72
Figura 7 1. Definição do ciclo estratigráfico e correlação com poço adjacente.	74
Figura 7 2.Ciclos estratigráficos de média frequência para o intervalo da Coquina Inferior.	75
Figura 7 3. Intervalo modelado no 3D – “Ciclo 4” escolhido por conter o maior numero de testemunhos (3ª trilha da esquerda para a direita) associados a um mesmo ciclo.	76
Figura 7 4. Manipulação dos dados de velocidade relativa de variação do nível base.	78
Figura 7 5. Coerência entre as SRMs e SMCs e a curva de quebras de tendências (curva vermelha) obtidas pela manipulação da curva de velocidade relativa de variação do nível base. A figura também mostra os produtos diagenéticos calculados no 1D e destaca o ciclo estratigráfico 4, utilizado no modelo 3D.	79
Figura 7 6. Insumos sísmicos usados na modelagem 3D.	81
Figura 7 7.Correlações entre as associações de fácies e os mapas sísmicos.	81
Figura 7 8. Exemplo de <i>layer</i> do resultado da simulação de fácies 3D.	83

Figura 7 9. Coerência entre o resultado da simulação e o modelo conceitual de distribuição lateral de fácies – ver figura 4.10.....	83
Figura 7 10. Correlações entre as proporções das “fácies” de velocidade relativa de variação do nível base e os insumos sísmicos para o hemicíclo de raseamento.	84
Figura 7 11. Correlações entre as proporções das “fácies” de velocidade relativa de variação do nível base e os insumos sísmicos para o hemicíclo de afogamento.....	85
Figura 7 12. Diferenças entre as distâncias percorridas para se atingir uma mesma variação do nível do lago conforme a declividade. Em A para o hemicíclo de raseamento e em B para o hemicíclo de afogamento.	86
Figura 7 13. Exemplo de <i>layer</i> do resultado da simulação das “fácies” 3D de velocidade relativa de variação do nível base para afogamento e raseamento.	87
Figura 7 14. Método de predição 3D da paragênese diagenética a partir da curva de velocidade relativa de variação do nível base e das AFs calculadas para poços sem descrição de lâminas delgadas.	87
Figura 7 15. Mapa médio obtido para a cimentação de sílica microcristalina.	88
Figura 7 16. Mapa médio obtido para a cimentação de calcedônia	89
Figura 7 17. Mapa médio obtido para a dissolução.	90
Figura 7 18. Regiões de predomínio de cada um dos produtos diagenéticos (dissolução em vermelho, calcedônia em laranja e sílica microcristalina em azul).....	91
Figura 7 19. Correlações entre os graus ocorrência de sílica total e dissolução estimadas pelo método de predição 3D e a produção acumulada dos poços de Badejo, Linguado e Trilha. Dos 24 poços apresentados nos gráficos, apenas 5 entraram como dado <i>hard</i> no modelo 3D.....	92
Figura 7 20. Mapa das regiões com a presença de AF2 e AF3 e sílica menor que grau 1. O mapa apresenta a produção final dos poços (bolhas em preto) e o contorno das zonas com dissolução (linha de contorno preta). Notar que muitos dos poços (sem a identificação) não entraram como dado de entrada na geração dos modelos preditivos 3D.	93

Tabela 2.1. Dados quantitativos dos materiais utilizados no estudo.....	07
---	----

Tabela 4.1 Associações de fácies interpretadas, fácies contidas em cada uma com proporção e espessura média.....	37
--	----

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos e Justificativas.....	3
2	Materiais e métodos	4
2.1	Testemunhos, lâminas delgadas, perfis petrofísicos, dados de petrofísica básica, e dados sísmicos utilizados.	4
2.2	Análise de fácies sedimentares, suas associações e sucessões	8
2.2.1	Classificação de fácies sedimentares	8
2.3	Análise dos produtos diagenéticos em lâminas delgadas	10
2.3.1	Classificação dos tipos de porosidade, produtos diagenéticos (cimentação e dissolução)	10
2.3.2	Controles da diagênese.....	13
2.3.3	Processos diagenéticos em rochas carbonáticas	13
2.3.4	Ambientes diagenéticos	16
2.4	Correlações estratigráficas e diagenéticas dos poços	19
2.5	Correlações entre dados de poços e insumos sísmicos.....	19
2.6	Construção do modelo 3D de fácies e produtos diagenéticos	19
3	Geologia regional e local	20
3.1	A Bacia de Campos	20
3.1.1	Evolução geotectônica e arcabouço estrutural.....	20
3.1.2	Evolução estratigráfica	24
3.2	Estratigrafia do Grupo Lagoa Feia	27
3.2.1	Bioestratigrafia.....	29
3.2.2	Ambiente Depositional.....	30
3.2.3	Diagênese nas coquinas da Bacia de Campos.....	32
4	Análise de fácies sedimentares, suas associações, sucessões e modelo conceitual de distribuição lateral de fácies	33
4.1	Associações de fácies e seus controles deposicionais.....	42
5	Análise dos produtos diagenéticos, suas associações e sucessões.....	45
5.1	Produtos observados e ambientes diagenéticos da seção Coquina Inferior da Formação Coqueiros.....	45
5.1.1	Cimentação carbonática.....	45
5.1.2	Silicificação.....	47
5.1.3	Micritização microbial	50
5.1.4	Neomorfismo	50
5.1.5	Dissolução	51
5.1.6	Compactação	52

5.2. Sucessões dos produtos diagenéticos.....	52
5.2.1. Interpretações dos ambientes diagenéticos e estabelecimento das sucessões dos eventos diagenéticos	53
6 Controles estratigráficos dos eventos diagenéticos: interpretação das velocidades relativas de variação do nível base pelas correlações entre as associações de fácies sedimentar e produtos diagenéticos e predição 1D da paragênese diagenética.....	61
6.1. Interpretação da velocidade relativa de variação do nível base	61
6.2. Cálculo da curva de velocidade relativa de variação do nível base.....	66
6.3. Método de predição 1D da paragênese diagenética	69
7 Correlações sedimentares, dos produtos diagenéticos e distribuição das fácies sedimentares e dos produtos diagenéticos em um <i>grid</i> 3D.....	73
7.1. Correlações sedimentares	73
7.2. Correlações dos produtos diagenéticos.....	77
7.3. Distribuição das associações de fácies sedimentares e dos produtos diagenéticos em um <i>grid</i> 3D.....	80
7.3.1. Distribuição das associações de fácies sedimentares	81
7.3.2. Distribuição das velocidades relativas de variação do nível base.....	84
7.3.3. Distribuição da paragênese diagenética em um modelo 3D	87
8 Conclusões.....	94
9 Referências Bibliográficas	97

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

As bacias da fase *rift* da margem continental brasileira apresentam extensos depósitos carbonáticos lacustres aptianos conhecidos mundialmente como depósitos da “seção Pré-Sal”. Portadores de volumes gigantes de hidrocarbonetos, principalmente nas Bacias de Campos e Santos, esses reservatórios são representados por uma seção inferior de coquinas associada à Formação Coqueiros na Bacia de Campos e à Formação Itapema na Bacia de Santos. Em posições propícias, longe da influência de siliciclásticos, ao pacote inferior de coquinas sobrepõem-se os carbonatos microbianos da Formação Macabu (Campos) e Barra Velha (Santos).

Após a descoberta dos reservatórios associados às coquinas da Bacia de Campos em 1975 (Campo de Badejo – alvo deste estudo), consolidou-se uma nova fronteira exploratória para toda a seção do Cretáceo Inferior desta bacia. Trabalhos exploratórios consequentes resultaram em novas descobertas até a década de 80 do século pregresso, incluindo os campos de Linguado, Trilha e Pampo (também estudados aqui). Após essa década houve uma diminuição de descobertas na seção aptiana, fato que, juntamente com a queda da produção de hidrocarbonetos dessas coquinas nos últimos 15 anos, levaram a uma redução da produção geocientífica brasileira sobre o tema a partir do início deste século. Entretanto, com as recentes descobertas dos campos gigantes nas coquinas da seção Pré-Sal da Bacia de Santos, os estudos sobre a evolução estratigráfica e diagenética destas rochas são retomados, o que torna os reservatórios da Bacia de Campos, detentores de uma alta densidade de poços e um grande volume de informações, uma importante área para o aperfeiçoamento do conhecimento geológico moderno detalhado dessas acumulações, e aplicação desse conhecimento de maneira análoga aos campos gigantes do Pré-Sal de Santos.

É consenso que as diferenças de permoporosidade encontradas em reservatórios carbonáticos são definidas pelas variações laterais e verticais de fácies e pela sua história diagenética. A compreensão das variações laterais e verticais de fácies em escala de reservatório, baseada na estratigrafia de alta resolução, leva à construção de modelos de paleoambientes deposicionais e de evolução estratigráfica de detalhe. Porém, a caracterização e compreensão da evolução do sistema paleohidrológico responsável pelas

alterações diagenéticas é extremamente complexa, principalmente pela sobreposição dos eventos diagenéticos, o que dificulta as correlações espaciais desses eventos, fundamentais para o mapeamento da distribuição das heterogeneidades geradas por eles ao longo do reservatório.

Esse estudo visa caracterizar texturalmente a diagênese e quantificá-la, definir a sequência dos eventos diagenéticos e elucidar os controles estratigráficos desses eventos nas coquinas dos campos de Badejo, Trilha, Linguado e Pampo localizados no sudoeste da Bacia de Campos (figura 1.1.). O produto final é estabelecer um método de predição das paragêneses diagenéticas em poços e em modelos tridimensionais.

Figura 1.1. Bacia de Campos com campos petrolíferos e principais reservatórios (modificado de Bruhn *et al.*, 2003). Destaque em envoltória quadrada para os campos estudados; GP - Garoupa, PG - Pargo, GPN - Garoupinha, BG - Bagre, NA - Namorado, BD - Badejo, CH - Cherne, EN - Enchova, BI - Bicudo, PM - Pampo, BO - Bonito, LI - Linguado, CO - Corvina, VL - Viola, PA - Parati, CG - Congro, PU - Piraúna, ENO - Enchova Oeste, ANQ - Anequim, CRP - Carapeba, TR - Trilha, VM - Vermelho, MO - Moréia, MA - Marimbá, AB - Albacora, MRL - Marlim, MLH - Malhado, ABL - Albacora Leste, FR - Frade, MLL - Marlim Leste, VD - Voador, NEN - Nordeste de Namorado, MLS - Marlim Sul, ESP - Espadarte, BR - Barracuda, BIJ - Bijupirá, AS - Salema, CRT - Caratinga, RO - Roncador, JUB - Jubarte and CHT - Cachalote;

1.2. Objetivos e Justificativas

O objetivo principal é caracterizar a diagênese e os controles estratigráficos dos eventos diagenéticos encontrados nas coquinas dos campos de Badejo, Trilha, Linguado e Pampo. Esse conhecimento será utilizado para o estabelecimento de um método predição 1D e 3D da paragenese diagenética e, conseqüentemente prever as regiões prováveis para diferentes tipos de alterações permoporosas secundárias geradas no reservatório. Para alcançar este objetivo principal é necessário atingir diversos objetivos secundários, listados a seguir em duas abordagens conceituais:

- (I) Depositional: definição de fácies e associações de fácies deposicionais das coquinas da Bacia de Campos; definição da distribuição lateral de fácies “ideal”; definição dos ciclos estratigráficos de média frequência em escala de testemunho e sua correlação entre poços para interpretação dos sistemas deposicionais e reconstituição paleogeográfica conceitual; distribuição das associações de fácies e em um modelo geocelular;
- (II) Diagenética: definição, descrição e quantificação dos diferentes produtos diagenéticos e respectiva associação aos processos diagenéticos interpretados como seus causadores; definição dos fatores controladores do tipo de produto diagenético; correlação entre poços dos eventos diagenéticos; distribuição dos produtos diagenéticos em um modelo geocelular;

A escolha desses campos para o estudo justifica-se pela grande quantidade de poços perfurados (87), com perfis geofísicos e testemunhos (no trabalho foram descritos 1030 metros de testemunho provenientes de 35 poços) além de aquisição sísmica de boa qualidade. Os resultados encontrados serão utilizados de maneira análoga às recentes descobertas de campos gigantes do Pré-Sal da Bacia de Santos.

2 Materiais e métodos

A seção das coquinas da Formação Coqueiros nos campos estudados é dividida informalmente em dois intervalos, “Coquina Inferior” e “Coquina Superior” (Schaller, 1981), separados por um pacote com predomínio de siliciclásticos (figura 2.1).

O estudo abordou o intervalo “Coquina Inferior” e foi embasado em: (i) descrição de 1030 metros de testemunhos para a análise de fácies sedimentar e de 398 lâminas delgadas para análise da diagênese; (ii) definição dos fatores controladores dos produtos diagenéticos; (iii) correlações entre poços utilizando os produtos da descrição de rocha e perfis elétricos; (iv) criação de método de predição 1D e 3D da diagênese; (v) correlações entre os dados adquiridos e mapas gerados a partir do dado sísmico da área. A caracterização e quantificação do material e descrição dos métodos utilizados encontram-se descritos a seguir:

2.1. Testemunhos, lâminas delgadas, perfis petrofísicos, dados de petrofísica básica, e dados sísmicos utilizados.

A figura 2.2 mostra a localização dos poços utilizados no estudo, com a identificação dos poços com descrição de testemunho (em preto) e dos com descrição de testemunhos e lâminas delgadas (em vermelho). Também mostra o limite do dado sísmico utilizado (retângulo - 3D Pambalim), adquirido em 2010.

A tabela 2.1 mostra a espessura total de testemunhos descritos, quantidade de lâminas delgadas descritas, e de dados de petrofísica básica existentes para os poços em questão.

Os perfis elétricos utilizados foram os de raios gama (GR), resistividade (ILD), sônico (DT), densidade (RHOB) e neutrão (NPHI).

Figura 2 1.Coluna cronoestratigráfica da Bacia de Campos destacando a Formação Coqueiros do Grupo Lagoa Feia (modificado de Winter *et al.*, 2007). Seção de detalhe: dip na área de estudo, mostrando os intervalos “Coquina Superior” e “Coquina Inferior” correlacionados em poços dos campos de Badejo, Linguado e Pampo. A figura também mostra a posição dos intervalos testemunhados na seção das coquinas em vermelho GR = perfil de raios gama e ILD = perfil de resistividade (Bizotto, 2014). Localização dos poços na figura 2.2.

Figura 2 2. Mapa com os poços utilizados no estudo. O retângulo representa os limites do dado sísmico utilizado.

Poço	Campo	Testemunhos metros descritos	Laminas descritas	Amostras petrofísica básica
RJS-23	Badejo	19	-	-
BD-08	Badejo	64	90	192
BD-13	Badejo	16	-	18
BD-14	Badejo	22	-	52
BD-04	Badejo	68	90	152
BD-1A	Badejo	20	-	92
BD-03	Badejo	18	-	2
BD-11A	Badejo	65	90	110
BD-15	Badejo	18	-	27
RJS-258	Trilha	17	-	-
RJS-285	Trilha	20	-	-
RJS-248	Trilha	30	-	-
RJS-279	Trilha	53	90	-
RJS-65	Trilha	18	-	5
RJS-168	Linguado	74	54	163
LI-02	Linguado	13	-	19
LI-04	Linguado	11	-	0
LI-07	Linguado	63	90	74
LI-01	Linguado	9	-	-
RJS-74	Linguado	14	-	-
RJS-156	Linguado	4	-	12
LI-03	Linguado	53	-	-
RJS-139	Linguado	15	-	-
LI-05	Linguado	14	-	10
RJS-73B	Linguado	10	-	-
RJS-114	Linguado	25	-	-
RJS-62A	Pampo	5	-	-
PM-12	Pampo	18	-	26
PM-05	Pampo	60	53	68
PM-03A	Pampo	97	97	142
RJS-181B	Pampo	19	-	12
RJS-159	Pampo	11	-	-
PM-04	Pampo	46	29	-
RJS-93	Pampo	5	-	-
RJS-493	Pampo	16	-	25
TOTAL		1030	683	1201

Tabela 2.1. Dados quantitativos dos materiais utilizados no estudo.

2.2. Análise de fácies sedimentares, suas associações e sucessões

O principal método utilizado para a interpretação dos sistemas deposicionais e para a reconstituição paleogeográfica foi a análise de fácies e suas associações. Esse procedimento, descrito e fundamentado por diversos autores (e.g. Reading 1986, Reading 1996, Walker 1992, Miall 2000) baseia-se no reconhecimento e caracterização de corpos de rochas sedimentares com atributos específicos como composição, granulação e seleção granulométrica, estruturas sedimentares, geometria das camadas, conteúdo fossilífero etc (os componentes diagenéticos foram analisados de maneira separada). Cada fácies é considerada como produto de um ou mais processos deposicionais, interpretados com base em modelos sedimentológicos atualistas propostos na bibliografia.

As 34 fácies descritas nos testemunhos (total de 1030 metros) foram codificadas e agrupadas em associações de fácies recorrentes, que permitem o reconhecimento de conjuntos de processos geneticamente relacionados, levando à interpretação do paleossistema deposicional por comparação com modelos descritos na literatura especializada. As fácies e associações de fácies foram representadas por um perfil discreto no software Petrel ® (ver figura 2.7).

2.2.1. Classificação de fácies sedimentares

A padronização da descrição das rochas seguiu as seguintes classificações de rochas sedimentares (figura 2.3):

- (I) Siliciclásticas - classificação de Picard (1971). A partir do diagrama da figura 2.3 (A) estima-se visualmente o percentual dos constituintes das rochas obtendo-se o nome do litotipo. Para a granulometria foi utilizada a escala granulométrica de Wentworth (1922).
- (II) Carbonatos: classificados de acordo com Dunham (1962) para as rochas com menos de 10% dos grãos maiores de 2 mm e Embry e Klovan (1971) quando o litotipo com pelo menos 10% de seus componentes maiores que 2 mm – figura 2.3 (B).

Figura 2 3.(A) Classificação para rochas siliciclásticas baseada em Picard (1971). Tamanho das partículas: escala granulométrica de Wentworth (1922). (B) Classificação utilizada para as rochas carbonáticas baseada em Dunham (1962) e Embry e Klován (1971). Modificado de Terra *et al.* (2010).

Rocha carbonáticas psamíticas com mais de 33% de grãos siliciclásticos foram nomeadas de acordo com a classificação de Zuffa (1980), que utiliza o termo arenito híbrido.

Rochas carbonáticas finas e impuras, com teores de silte e/ou argila entre 35 e 60% foram denominadas margas.

2.3. Análise dos produtos diagenéticos em lâminas delgadas

Foram considerados aspectos texturais dos cimentos calcícticos e silicosos, os tipos texturais de dissolução e os tipos de poros encontrados. Essas texturas são diretamente vinculadas à química do fluido do poro, grau e saturação do poro com água, taxa de precipitação e dissolução. Os aspectos texturais, aliados ao entendimento da sua distribuição e da evolução estratigráfica, são usados para a identificação do ambiente diagenético, como meteórico freático, meteórico vadoso etc. A bibliografia para descrição dos ambientes diagenéticos é muito focada em ambientes marinhos, assim, neste trabalho considera-se que algumas texturas encontradas em ambiente com influência marinha seriam correspondentes às encontradas em ambientes lacustres.

2.3.1. Classificação dos tipos de porosidade, produtos diagenéticos (cimentação e dissolução)

Para a caracterização do tipo de porosidade foi utilizada a classificação de Choquette e Pray, 1970 conforme a figura 2.4.:

Figura 2 4.Classificação de Choquette e Pray (1970) para os tipos básicos de porosidade encontrados em rochas carbonáticas; poros representados em azul (modificado de Scholle e Ulmer Scholle, 2003).

A classificação do tipo de cimento seguiu a classificação descrita em Flügel 2004. Ressalta-se que as classificações ‘botroidal’ e “granular” também foram adotadas para cimentos silicosos. A figura 2.5 lista tipos de cimento encontrados nas coquinas descritas.

Figura 2 5. Classificação de tipos de cimento utilizada - modificada de Flügel 2004.

A descrição dos produtos diagenéticos foi realizada em uma planilha Excel®. Primeiramente foram definidos os tipos de produtos diagenéticos e então foram estimadas as porcentagens volumétricas de cada tipo por estimativa visual. Devido à dificuldade de estimar porcentagem volumétrica para a dissolução, foram estimados graus de 1 a 3 para este produto: 1 para <5% dos grãos dissolvidos, 2 entre 5 e 10% dos grão dissolvidos e 3 para dissoluções maiores que 10% de grãos dissolvidos. Foi também classificada em três tipos (segundo o tipo de porosidade): móldica, alargamento de poros e *vug* (segundo parcialmente a classificação de Choquette e Pray, 1970). Essa planilha foi carregada no Petrel® como curvas de poços, dados pontuais associados a uma determinada profundidade, conforme figuras 2.6 e 2.7.

Prof.	Calcita Bladed (%vol)	Calcita Blocosa (%vol)	Poros %	Cimento sílica microcristalina (%)	Cimento calcedônia (%)	Substituição sílica microcristalina (%)	Substituição calcedônia (%)	sequência dos tipos diagenéticos (relações texturais)	Dissolução grau de 0 a 3
-------	-----------------------	------------------------	---------	------------------------------------	------------------------	---	-----------------------------	---	--------------------------

Figura 2 6.Exemplo de cabeçalho para descrição dos produtos diagenéticos feita no Excel®

Figura 2 7.Carregamento da planilha como curva de poço (dados pontuais associados a uma determinada profundidade). Exemplo de método de análise da diagênese utilizada – poços RJS-168. Trilhas (da esquerda para direita) 1 – profundidade, 2 – raios *gama*, 3 – associação de fácies, 4 – dissolução (grau de 1 a 3), 5 – calcedônia (%), 6 – cimentação *bladed* (%), 7 – sílica microcristalina (%), 8 – cimentação calcítica blocosa (%) e 9 – perfis NPHI, RHOB, análise petrofísica básica (preto) e porcentagem de poros estimada na descrição (vermelho).

2.3.2. Controles da diagênese

A diagênese consiste no conjunto de alterações dos sedimentos que ocorrem durante sua litificação e que precedem o metamorfismo. Essas alterações são causadas por processos físicos, químicos e biológicos, que atuam de maneira isolada ou conjunta. A compreensão desses processos e seus produtos em rochas carbonáticas possui alta relevância econômica, pois as alterações petrofísicas provocadas por eles (aumento ou diminuição da permoporosidade) definem o valor dessas rochas como reservatório de hidrocarbonetos e seu uso na indústria mineral (Flügel, 2004).

A diagênese é controlada principalmente por: (i) composição e mineralogia do sedimento, (ii) razão de fluxo de água pelos poros (energia do ambiente) (iii) química do(s) fluido(s) presente(s) nos poros do sedimento (iii) permoporosidade primária (iv) história geológica do sedimento (soterramento, exposição, variações do nível base etc) e (v) clima predominante na região.

A caracterização da diagênese em rochas carbonáticas é complexa, pois os principais minerais formadores dessas rochas - como aragonita e calcita de baixo teor de magnésio - são bastante suscetíveis à dissolução, cimentação, recristalização e substituição, facilitando, assim, a superimposição e/ou preservação das diversas alterações ao longo do tempo.

2.3.3. Processos diagenéticos em rochas carbonáticas

Seis maiores processos podem ser incluídos na diagênese (Tucker & Wrigth, 2009): cimentação (carbonática e por sílica), micritização microbiana, neomorfismo, dissolução, compactação (incluindo dissolução por pressão) e dolomitização; Ressalta-se que nas coquinas estudadas, o processo de dolomitização é bastante raro.

2.3.3.1. Cimentação carbonática

É o processo diagenético mais comum em rochas carbonáticas. Ocorre quando os fluidos presentes nos poros encontram-se supersaturados em relação à fase cimento, e também quando não existem fatores que inibam sua precipitação (p.ex. alta concentração de matéria orgânica). A cimentação carbonática requer um grande aporte de CaCO_3 , cujas fontes podem ser o corpo d'água em si em ambientes subaquasos, ou a própria dissolução do sedimento em ambientes meteóricos ou de subsuperfície (Tucker & Wrigth, 2009).

As conchas de bivalve da seção estudada eram originalmente aragoníticas. O comportamento desse tipo de bioclasto, logo após a deposição, segue três linhas (Turcker, 1981): (i) preservação da concha (só ocorre em depósitos atuais); (ii) lixiviação interna formando uma cavidade preservada por uma borda micrítica, onde posteriormente, ocorre a primeira cimentação da história diagenética, com a formação de calcita drusiforme e blocosa em mosaico (figura 2.8.); (iii) geração de calcita neomórfica com relíctos da estrutura interna.

Figura 2 8. Possíveis transformações de conchas aragoníticas de bivalves. Diferentes composições e microestruturas geradas pela diagênese (modificado de Tucker, 1992). Em vermelho, as texturas encontradas na seção estudada.

Os produtos de alteração coloridos em vermelho da figura 2.8. ocorrem nas coquinas estudadas, e, nas análises semiquantitativas, as cimentações calcíticas drusiforme e blocosa internas à concha não foram contabilizadas, mas sim a cimentação interpartícula.

2.3.3.2. Silicificação

A presença de sílica é muito comum em lagos continentais com associação vulcânica. O intemperismo das rochas vulcânicas, a sílica liberada pelas transformações de argilominerais (Mahran, 1999) e a dissolução de sedimentos siliciclásticos (Peterson & Von der Borch, 1965) são as principais fontes de Si. Fontes geotermiais de Si são também muito comuns em bacias de *rift* continental (Bustillo, 2010); A alta concentração de sílica na seção estudada (refletida na grande quantidade de silicificação e de ooides de argila magnesianas) pode ser explicada pela presença de basaltos toleíticos da Formação Cabiúnas na bacia de drenagem do sistema lacustre da fase *rift* da Bacia de Campos e também pela sequencia talco-estivenstica, anterior a deposição das coquinas.

2.3.3.3. Micritização microbial

Processo pelo qual os bioclastos são alterados rapidamente no assoalho do ambiente deposicional por algas, fungos ou bactérias. Os grãos são perfurados em suas bordas posteriormente preenchidas por um envelope micrítico. Esse processo, quando muito intenso, pode levar à completa micritização do clasto.

2.3.3.4. Neomorfismo

Termo utilizado por Folk (1965) para descrever tanto a recristalização como a inversão mineral. A recristalização é o processo que envolve a mudança na forma, tamanho e orientação do cristal, porém sem alterar a sua composição mineralógica. Inversão mineral é a mudança de uma fase mineral metaestável (p.ex. aragonita) para uma fase estável (p.ex. calcita). É o caso demonstrado na figura 2.8. de transformação da concha aragonítica para concha neomórfica calcítica com relictos da estrutura interna.

2.3.3.5. Dissolução

Sedimentos e cimentos carbonáticos podem ser dissolvidos quando o fluido presente no poro é subsaturado em relação ao carbonato em questão. Este processo é particularmente importante em ambientes meteóricos próximos à superfície.

2.3.3.6. Compactação

Quando os sedimentos carbonáticos são soterrados progressivamente e não estão previamente cimentados, ocorre o fraturamento dos grãos e a porosidade diminui devido ao maior empacotamento. Essa é a compactação do tipo mecânica (Tucker & Wrigth, 2009). Os grãos podem ser também dissolvidos nos pontos de contato e produzir contatos suturados e concavos-convexos. Esse outro tipo de compactação é denominado compactação química. Se a compactação química ocorrer em uma rocha previamente litificada pode gerar estilólitos e filmes de dissolução

2.3.4. Ambientes diagenéticos

A diagênese em carbonatos ocorre em três ambientes principais: “sub-corpo aquoso” (lago ou mar), meteórico e subsuperficial. Esses ambientes subdividem-se em zonas com base na taxa de movimentação de fluidos, tipo de fluidos presentes nos poros e saturação da água em relação ao carbonato de cálcio (Longman, 1980). Os processos diagenéticos associados ocorrem em profundidades relativamente rasas, exceto o ambiente subsuperficial, que apresenta uma diagênese associada ao progressivo aumento da profundidade de soterramento e consequentemente, das condições de pressão e temperatura. Longman (1980) classifica os ambientes onde se desenvolvem os processos diagenéticos em (i) meteórico vadoso, (ii) meteórico freático (água doce), (iii) marinho freático e (iv) zona de mistura. Essa classificação será utilizada neste estudo com a adaptação de marinho freático para lacustre freático, como também utilizada por Bertani e Carozzi, (1985), que subdividiram os ambientes diagenéticos associados ao sistema lacustre da fase *rift* da Bacia de Campos conforme a figura 2.9.

Figura 2 9. Ambientes diagenéticos para sistema lacustre da fase rift da Bacia de Campos. Modificada de Bertani e Carozzi, (1985). Lacustre freático 1 = zona ativa e 2 – zona estagnada.

A figura 2.10., (adaptada de Flugel, 2004), mostra resumidamente os diferentes processos, tempo necessário para a efetivação de cada processo, e tipo de preenchimento do poro para cada ambiente da figura 2.9. A figura refere-se ao ambiente marinho. Assume-se neste trabalho que, em ambiente lacustre a distribuição dos ambientes e os tipos de processos associados possam ser correlacionáveis.

Ambiente Diagenético	Localização	Preenchimento do Poro	Processos	Tempo necessário
Meteórico Vadoso	Acima lençol freático: entre a superfície e o limite superior da zona meteórica freática	Água doce meteórica e/ou ar	Zona de dissolução: extensa dissolução, remoção de aragonita, formação de vugs Zona de precipitação (próxima à superfície): cimentação menos expressiva	10^3 a 10^5
Meteórico Freático	Abaixo do limite superior do lençol freático	Água doce meteórica	Zona de dissolução: dissolução, formação de moldes e vugs, neomorfismo. Zona ativa: dissolução de aragonita e Mg-calcita, rápida e diversificada cimentação, precipitação de calcita, criação de moldes e vugs. Zona estagnada: pouca cimentação, estabilização da aragonita e Mg-calcita	10^3 a 10^5 até 10^6 a 10^7
Zona de Mistura	Entre os ambientes meteórico freático e marinho	Água salobra	Dolomitização, dissolução, cimentação calcítica e silicosa.	?
Marinho Freático	Abaixo assoalho do mar	Água salina	Água supersaturada em CaCO_3 : rápida cimentação por calcita e Mg-calcita, diversos tipos de cimento.	10^1 a 10^4
Subsuperficial (raso - dezenas de metros e profundo - centenas a milhares de metros)	Abaixo da faixa em que ocorrem os processos de superfície até o início do metamorfismo de baixo grau	Água salina	Compactação física, compactação química (dissolução por pressão), cimentação e redução de porosidade.	10^6 a 10^8

Figura 2 10. Características dos ambientes diagenéticos e tempo necessário (em anos) para cada processo associado. Figura adaptada de Flügel, (2004).

(i) Diagênese em ambiente meteórico vadoso: a zona meteórica vadosa corresponde à zona localizada entre a superfície de exposição e a zona do freático de água doce. Essa zona pode ser dividida em 3 (do topo para base): (i) zona de formação de solos - região onde se concentram os processos pedogenéticos com geral redução da permoporosidade; (ii) zona de dissolução - nessa zona ocorre a infiltração de água insaturada, acidificada pelo CO_2 atmosférico e do solo; (iii) zona de precipitação - a água que inicialmente encontrava-se insaturada em relação a CaCO_3 e causava a dissolução de grãos carbonáticos na zona de dissolução vai incorporando CaCO_3 e se tornando saturada. Essa água precipita cimento calcítico através da evaporação do CO_2 .

(ii) Diagênese em ambiente meteórico freático: situa-se imediatamente abaixo da zona meteórica vadosa. Os poros encontram-se preenchidos por água doce. Segundo Longman (1980) o ambiente freático de água doce é subdividido em três zonas: zona de dissolução, onde os principais processos são dissolução e neomorfismo, sem ocorrência de cimentação; zona de circulação ativa de água, caracterizada pela passagem de grandes volumes de água saturada pelos poros, gerando uma cimentação rápida (formação de cimentos dos tipos franja prismática e mosaico granular de calcita); e zona estagnada com pequena movimentação de água e pouca cimentação.

(iii) Diagênese na zona de mistura: corresponde à zona de mistura de água meteórica com água do mar ou lacustre, onde os poros estão saturados de água salobra. Em condições favoráveis, pode ocorrer dolomitização, além de outros processos

diagenéticos como cimentação, dissolução de aragonita e neomorfismo.

Para seção das coquinas estudada Bertani e Carozzi, (1985) definem essa zona como uma zona de precipitação de “sílica em franja” e associa essa silicificação à mistura de duas soluções com forças iônicas diferentes com solução resultante insaturada com relação à calcita e possui pH menor que alcalino. Segundo os autores, o fluido rico em sílica do ambiente lacustre freático levaria à lixiviação da calcita e precipitação da sílica.

(iv) Diagênese em ambiente marinho (ou lacustre) freático: ambiente definido pelo intervalo entre o assoalho marinho (ou lacustre) e o topo do ambiente subsuperficial. A zona de mistura é o seu limite lateral. Nesse ambiente os poros estão preenchidos por água do mar. Pode ser subdividido em uma zona ativa (1 na adaptação figura 5.13), onde ocorre circulação de água do mar através dos sedimentos por efeito da ação das ondas e zona estagnada (2 na adaptação da figura 5.13), onde ocorre pequena circulação de água e baixa cimentação.

(v) Diagênese em subsuperfície: neste ambiente, além da compactação física e química – que são os processos mais atuantes – os processos de cimentação e dissolução por pressão também podem ocorrer.

Segundo Flügel (2004), há uma associação entre a ocorrência mais frequente dos diferentes tipos de cimentação e os ambientes diagenéticos. A figura 2.11. mostra as texturas diagenéticas frequentemente encontradas nos diferentes ambientes diagenéticos.

Tipos de cimento carbonáticos	Ambientes Diagenéticos			
	Meteorico vadoso	Meteorico freático	Marinho freático	Subsuperfície
Dripstone				
Menisco				
Microcristalino				
Bladed				
Drusiforme				
Dente de cão				
Blocoso				
Peloidal				
Botroidal				
Poiquilotópico				
Trama	Gravitacional	Circungranular	Circungranular	Drusiforme
	Menisco	Isópaco	Isópaco	Mosaico granular
	Drusiforme	Gravitacional	Crosta	Sobrecrecimento sintaxial
	Mosaico granular	Mosaico blocoso e granular	Splays	
	Sobrecrecimento sintaxial	Sobrecrecimento sintaxial	Botroidal	

Figura 2 11. Tipos de cimento carbonáticos e tramas encontradas comumente em cada ambiente diagenético. Figura adaptada de Flügel, (2004).

2.4. Correlações estratigráficas e diagenéticas dos poços

As correlações estratigráficas e diagenéticas foram estabelecidas analisando os dados de descrição de testemunhos, lâminas e suas respostas obtidas nos perfis elétricos. Essas correlações são importantes para a definição da distribuição e continuidade lateral de fácies e da diagênese, bem como para a caracterização de ciclos estratigráficos. A confecção de seções estratigráficas e estruturais foi feita utilizando os softwares Petrel® e CorelDRAW® X5.

2.5. Correlações entre dados de poços e insumos sísmicos.

Para a modelagem das associações fácies sedimentares (AFs), inicialmente foram estabelecidas as correlações entre a proporção de determinada AF e os valores encontrados nos mapas de insumos sísmicos (isópaca sísmica da Coquina Inferior e respectiva declividade) no local do poço. Essa técnica visa achar a correlação com o melhor coeficiente de correlação e assim utiliza a equação da reta encontrada para regredir os mapas sísmicos e transformá-los em mapas de proporção fácies. Para a distribuição da paragenese diagenética foi utilizado o mesmo método.

O dado sísmico utilizado foi adquirido em 2010 pela WesternGeco e processado pela PGS com migração 3D pré-empilhamento PSDM VTI.

2.6. Construção do modelo 3D de fácies e produtos diagenéticos

O objetivo foi estabelecer um método de distribuição espacial das associações de fácies e dos produtos diagenéticos, e consequentemente, prever as regiões mais prováveis de alterações permoporosas secundárias geradas no reservatório (cimentação por sílica, por calcedônia e dissolução).

3 Geologia regional e local

3.1. A Bacia de Campos

A Bacia de Campos está localizada na margem continental brasileira, no litoral norte do estado do Rio de Janeiro e sul do estado do Espírito Santo, limitada a norte pelo Arco de Vitória e a sul pelo Alto de Cabo Frio. Possui uma área de 100.000 km², dos quais apenas 500 km² encontram-se em área emersa. Atualmente, a Bacia de Campos é responsável por 66% da produção de óleo e por cerca de 30% da produção de gás da PETROBRAS. Possui reservatórios de hidrocarbonetos em vários níveis estratigráficos, incluindo basaltos neocomianos fraturados da Formação Cabiúnas, coquinas eoaptianas da Formação Coqueiros, carbonatos microbianos neo-aptianos da Formação Macabú, carbonatos albianos da Formação Quissamã, turbiditos neocretácicos e cenozóicos das formações Namorado e Carapebus e carbonatos oligocênicos da Formação Emborê. As principais rochas geradoras da bacia são folhelhos lacustres da fase *rift* dos andares locais Buracica e Jiquiá / Barremiano-Aptiano, (Guardado *et al.*, 2000).

3.1.1. Evolução geotectônica e arcabouço estrutural

A formação da Bacia de Campos teve início com o afinamento crustal e formação do *rift* continental que levou à ruptura do supercontinente Gondwana, à separação da América do Sul e África e à formação do oceano Atlântico Sul a partir do Hauteriviano (Rangel, 1994). Barros, (1980) e Winter, (2007) reconhecem três fases tectônicas principais que caracterizam a evolução da Bacia de Campos: *rift* continental, pós-*rift* transicional e *drift* marinho. Meisling *et al.*, (2001) reconheceram através de anomalias gravimétricas Bouger, que os principais altos do embasamento próximo ao continente estão associados a uma Moho alta e que os altos externos (nas regiões distais da bacia) estariam relacionados a uma cadeia de espalhamento oceânico abortada (que seriam os altos do Pré-Sal). Além disso, os autores reconhecem zonas de transferência do *rift* de direção NW-SE (figura 3.1.)

Figura 3.1. Mapa das províncias estruturais relacionadas à fase *rift* das Bacias de Campos e Santos. BH=Alto de Badejo - retângulo preto=localização da área estudada; TA=Arco de Torres; AP = Platô de Abrolhos.

Segundo Winter (2007), a fase *rift* foi marcada por tectonismo extensional e subsidência mecânica intensos, que gerou uma série de *horsts* e meio-grábens, limitados por falhas normais sintéticas e antitéticas, com rejeitos expressivos de até 2500m (Dias *et al.*, 1990; Chang *et al.*, 1992). A orientação dessas falhas está associada a lineamentos estruturais prévios herdados do embasamento Pré-Cambriano, com *trend* N30°E ao sul e NNE nas porções mais ao norte da bacia.

As feições estruturais mais proeminentes da fase *rift* são o Alto Regional de Badejo, o Alto Externo e os baixos de Corvina-Parati e São João da Barra, preenchidos por espessos depósitos sedimentares lacustres e aluviais, além da falha de Campos, que define uma linha de charneira de direção NE (Figura 3.2) que marca o limite interno, oeste, de ocorrência das rochas cretácicas. Deste ponto em direção ao litoral, são encontrados sedimentos cenozóicos diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino pré-cambriano (Figura 3.3).

Figura 3.2. Arcabouço estrutural da seção *rift* da Bacia de Campos, com destaque para os altos estruturais e baixos deposicionais (Rangel e Martin, 1998, *apud* Bizzotto, 2014).

Figura 3.3. Seção geológica *dip* esquemática da Bacia de Campos mostrando o arcabouço estrutural e estratigráfico (Rangel e Martins, 1998, *apud* Bizzotto, 20014).

O início do *rift* foi marcado por vulcanismo intenso na parte sul da Bacia de Campos, (Formação Cabiúnas), datado de 130 a 136.4 Ma (Mizusaki, 1986). A sedimentação nesta fase foi tipicamente continental, com eventuais incursões marinhas efêmeras durante o final da fase *rift* (Silva-Telles *et al.*, 1994; Dias, 2005). A supersequência *rift*, basculada e falhada em blocos, encontra-se sotoposta à supersequência pós-*rift* cujo contato é definido por uma discordância regional aptiana (Chang *et al.*, 1992). Essa discordância, facilmente identificada na sísmica, representa um importante evento erosivo na bacia.

A Bacia de Campos então evolui para a fase pós *rift* caracterizada por quiescência tectônica e subsidência térmica e falhamentos localizados. Neste período, acumularam-se carbonatos de natureza microbiana (Pré-Sal s.s) sobrepostos por espessos depósitos de sal. Tais camadas salíferas foram acumuladas em um cenário de circulação marinha restrita, em clima quente e árido, sob a influência direta de águas vindas do norte, tendo o lineamento formado pela Dorsal de São Paulo e o Alto de Florianópolis, desempenhado um papel crucial como barreira ativa à influência de águas vindas do sul (Azevedo, 2004; Arai, 2009).

Ao final da deposição evaporítica iniciou-se a fase *drift*, na transição do Aptiano-Albiano, momento em que as águas tetianas fluíam para o sul em maior abundância e de forma perene, dando origem, nas bacias do sudeste, a depósitos carbonáticos cujas fácies pelágicas são ricas em plâncton do domínio tetiano (Dias-Brito 1987; 1995; 2000; Dias-Brito e Ferré, 2001). Esses carbonatos estão representados no Grupo Macaé, que foi sobreposto por depósitos oceânicos do Grupo Campos. A fase *drift* foi marcada por subsidência térmica associada a tectonismo consequente à halocinese, desencadeada pela sobrecarga sedimentar, deslizamento gravitacional e basculamento da bacia em direção a leste, que gerou imensos diápiros de sal nas porções mais distais da bacia em águas profundas (Figura 3.3). Associada à tectônica salífera desenvolveram-se falhas lítricas, que atuaram como condutos para a migração de petróleo, e estruturas dômicas do tipo *rollover*, que constituem importantes alvos exploratórios para hidrocarbonetos (Guardado *et al.*, 1989).

Segundo Winter *et al.* (2007), episódios magmáticos recorrentes ocorreram ao longo da fase *drift*, principalmente na porção sul da bacia (Santoniano-Campaniano: 81,5 a 83,2 Ma, método Ar/Ar; Cretáceo-Paleogeno: basaltos datados de 65,5 Ma e 62 Ma; Eoceno: Evento Magmático Abrolhos, de 53 Ma $\pm$ 2 Ma; Mesoeoceno 43 Ma).

3.1.2. Evolução estratigráfica

O registro sedimentar da Bacia de Campos atinge até 9000m e compreende sedimentos siliciclásticos, carbonáticos e evaporíticos acumulados entre o Barremiano e o Holoceno. A primeira carta estratigráfica da Bacia de Campos foi elaborada por Schaller (1973), que formalizou a nomenclatura estratigráfica e definiu as formações Lagoa Feia, Macaé, Campos e Emborê. Rangel *et al.* (1994) elevaram a Formação Campos à categoria de grupo, que passou a englobar a Formação Emborê. As formações Lagoa Feia e Macaé também foram elevadas à categoria de grupo por Winter *et al.* (2007), que apresentaram o registro sedimentar da Bacia de Campos correspondendo a três supersequências (ver figura 2.1.):

- 1) Supersequência continental (fase *rift*): Neobarremiano-Eoaptiano
- 2) Supersequência transicional (fase pós-*rift*): Neo-Aptiano
- 3) Supersequência marinha (fase *drift*): Albiano-Holoceno.

3.1.2.1. A Supersequência Continental da Fase Rift

Os depósitos sedimentares da fase *rift* constituem as formações Itabapoana, Atafona e Coqueiros (neobarremianos a eoaptianos – datações palinológicas e de ostracodes) e foram depositados sobre os basaltos hauterivianos da Formação Cabiúnas, parte inferior do Grupo Lagoa Feia.

A Formação Itabapoana corresponde a depósitos proximais de conglomerados polimíticos, arenitos, siltitos e folhelhos avermelhados depositados em ambientes de leques aluviais junto às falhas de borda da bacia e aos altos estruturais do embasamento. A Formação Itabapoana ocorre apenas em subsuperfície ao longo da borda oeste da Bacia de Campos, em batimetrias de até 150m (Winter *et al.*, 2007) e a geometria dos estratos geralmente é cuneiforme. Para leste, a formação transiciona faciologicamente para os pelitos da Formação Atafona ou para as coquinas da Formação Coqueiros.

A Formação Atafona preenche os depocentros da bacia, pode ter até 2000m de espessura e ocorre predominantemente nas porções central e sul da bacia, (Winter *et al.*, 2007). É composta por siltitos, arenitos e folhelhos lacustres (como o Folhelho Buracica, potencial gerador de óleo da bacia) e intercalações delgadas de carbonatos. As rochas desta formação são ricas em minerais autigênicos talco-estevensíticos, tipicamente encontrados em lagos alcalinos associados à atividade hidrotermal (Bertani e Carozzi, 1984).

A Formação Coqueiros ocorre sobre a Formação Atafona e caracteriza-se por espessos pacotes de coquinas de bivalves intercalados com folhelhos ricos em matéria-orgânica, que constituem o alvo deste estudo (assim, será mais bem detalhada posteriormente). Esta unidade apresenta grande importância por englobar o Folhelho Jiquiá, principal gerador de petróleo da Bacia de Campos, e a sequência das coquinas, produtoras de óleo desde 1985.

3.1.2.2. A Supersequência Transicional da Fase Pós-Rift

A supersequência pós-rift compreende a parte superior do Grupo Lagoa Fei e é composta pelas formações Itabapoana, Gargaú, Macabu (Winter *et al.* 2007) e Retiro (Rangel *et al.* 1994), depositadas durante o Neo-Aptiano (dados de ostracodes e palinológicos). A Formação Itabapoana, já descrita na supersequência rift, apresenta uma espessura máxima total em torno de 5000m. Os dados palinológicos e de ostracodes indicam que as rochas Itabapoana pós-rift tem idade neo-aptiano e posicionam-se nas porções mais proximais ao longo da borda oeste da Bacia de Campos. A unidade transiciona faciologicamente para os sedimentos finos da Formação Gargaú, a leste, que gradam distalmente para os carbonatos da Formação Macabu.

Nas porções sul e centro da Bacia de Campos ocorre a Formação Gargaú que é composta por margas, calcilutitos e folhelhos com eventuais intercalações de arenitos e conglomerados depositados em ambiente costeiro raso (Winter *et al.* 2007).

A Formação Macabu é formada por calcários estromatolíticos e laminitos microbianos, localmente dolomitizados e/ou silicificados. Dias, (2005) originalmente interpreta tais depósitos como formados em mar raso epicontinental. O ambiente de deposição desses sedimentos é ainda matéria em discussão (lagos ou lagos sob influência marinha). Os sedimentos Macabu ocorrem preferencialmente nas porções mais distais das regiões sul e centro da Bacia de Campos e apresenta espessuras de até 500m (Winter *et al.* 2007).

A Formação Retiro é constituída por uma sequência evaporítica composta principalmente por anidrita, nas porções proximais da bacia, e halita, nas regiões distais. Possui espessuras de até 2000m e, devido à halocinese, pode ocorrer como imensas muralhas de sal. Esta unidade condiciona grande parte da deposição das areias do Cretáceo Superior em calhas associadas ao diapirismo salino e também pela formações de selos e trapas para a acumulação de petróleo.

3.1.2.3. A Supersequência Marinha da Fase *Drift*

O registro sedimentar da fase *drift* é composto pelos grupos Macaé e Campos depositados do Albiano ao Holoceno.

Sobreposto ao Grupo Lagoa Feia, o Grupo Macaé compreende as formações Goitacás, Quissamã, Outeiro, Namorado (Rangel *et al.* 1994), e Imbetiba (Winter *et al.* 2007). Os depósitos deste grupo são de origem marinha e atingem espessuras de até 1500m.

As Formações Goitacás (clástica proximal), Quissamã e Outeiro (carbonatos) e Imbetiba (margas) ocorrem interdigitadas. A Formação Goitacás (Albiano a Cenomaniano) é constituída por conglomerados polimíticos e arenitos mal selecionados depositados por leques aluviais e fan-deltas.

A Formação Quissamã (eo-albiana a mesoalbiana), é formada por *grainstones* e *packstones*, dominados por oncóides, oóides e pelóides, e *wackestones/mudstones* com escassos elementos bentônicos e planctônicos depositados em uma rampa carbonática rasa hipersalina (Dias-Brito 1982). Apresenta espessura máxima de 1050 m e ocorre nas porções central e sul da bacia, estando ausentes nas porções mais distais.

A Formação Outeiro (neo-albiana) compreende *mudstones*, margas e folhelhos ricos em microfósseis planctônicos, principalmente pitonélideos (calcisferulídeos), foraminíferos e radiolários. Corresponde à sequência carbonática nerítica profunda de Dias-Brito e Azevedo (1986), ao intervalo Macaé Superior de Spadini *et al.* (1988) e à sequência K70 de Winter *et al.* (2007). Há um considerável enriquecimento em folhelhos e margas, com aumento na quantidade de foraminíferos planctônicos, cocólitos e radiolários no topo da unidade e nas porções mais distais, em águas profundas, (Winter *et al.* 2007). Assim, interpreta-se uma progressiva subida relativa do nível do mar que, no Neo-Albiano, afogou a plataforma carbonática rasa (Spadini *et al.* 1988).

A Formação Imbetiba é constituída essencialmente por margas bioturbadas (Cenomaniano - nanofósseis calcários e dados palinológicos). Depositada em ambiente nerítico profundo a batial superior, correspondendo ao intervalo argiloso de Spadini (1981) ou à sequência hemipelágica com turbiditos de Dias-Brito e Azevedo (1986). Esses turbiditos da sequência hemipelágica ocorrem como lentes associadas às formações Outeiro e Imbetiba, sendo importantes reservatórios portadores de hidrocarbonetos (Formação Namorado de Winter *et al.*, 2007).

Sobreposto ao Grupo Macaé ocorre o Grupo Campos (Turoniano-Pleistoceno), formado pelas formações Emborê, Carapebus, Ubatuba e Barreiras (Schaller, 1973). Com sedimentação francamente oceânica e espessura máxima de 4050m apresenta, nas áreas

distais, depósitos siliciclásticos pelíticos (Formação Ubatuba) intercalados com lentes quartzo-arenosas de origem turbidítica (Formação Carapebus). A formação Carapebus possui os principais reservatórios produtores de petróleo do Pós-Sal (campos de Albacora, Albacora Leste, Marlim, Marlim Sul, Roncador e Barracuda-Caratinga). Entre os sedimentos acumulados em áreas proximais, destacam-se os arenitos grossos vermelhos da Formação Emborê (Membro Santa Fé). Essa formação engloba também os depósitos híbridos de plataforma mista do membro Grussaí e, quando mais pura, do membro Siri, (Winter 2007) ambos compostos por calcários bioclásticos ricos em algas vermelhas.

3.2. Estratigrafia do Grupo Lagoa Feia

O Grupo Lagoa Feia foi depositado durante o Neobarremiano e o Eoaptiano. Suas maiores espessuras são encontradas nos hemi-grábens gerados durante a fase *rift*, destacando-se, entre eles, os baixos de São João da Barra e Corvina-Parati, onde a seção sedimentar atinge 4000m (Rangel e Carminatti, 2000). Segundo Dias *et al* (1988), o grupo é composto por uma seção clástica basal sobreposta por um seção talco-estevensítica e uma seção de rudstones (sequência das coquinas - alvo deste estudo) seguida de uma seção clástica evaporítica no topo. Baumgartem, (1985) define os limites dessas sequências como discordâncias ou marcos estratigráficos (representados por camadas com fácies de baixa energia) cronocorrelatos. Esses marcos estratigráficos estão representados na figura 3.5., retirada de Bizotto, (2014), que integra as quatro sequências deposicionais: clástica-basal, talco-estevensita, coquinas e clástica de Dias *et al*, (1988) e os marcos estratigráficos de Baumgartem, 1985.

A figura 3.4 (Bizotto, 2014) mostra a *sequência clástica basal*, que repousa discordantemente sobre os basaltos da Formação Cabiúnas e é limitada pelo marco LF-20 no topo. É associada à Formação Atafona, que compõem os registros sedimentares mais antigos da bacia. A Formação Atafona também é composta pela *sequência talco-estevensita*, sobrejacente à *sequência clástica basal* e apresenta como limite superior o marco LF-35. Equivale aos sedimentos lacustres da Formação Atafona (lago bastante alcalino possibilitando a precipitação de talco-estevensita). Estratigraficamente acima, encontra-se a *sequência das coquinas*, alvo deste estudo, que corresponde à Formação Coqueiros e tem como limite inferior o marco LF-35 e superior o marco LF-80. Essa sequência é sobreposta pela *sequência clástica-evaporítica*, que está então sob os carbonatos Macaé (Baumgartem, 1985 e Dias *et al*, 1988).

Figura 3. 4. Perfis tipo do Grupo Lagoa Feia mostrando as quatro seqüências deposicionais: Clástica-Basal, Talco-Estevensita, Coquinas e Clástica-Evaporítica. As seqüências são limitadas por marcadores estratigráficos ou discordâncias. O topo da seqüência das coquinas é marcado pela discordância regional Pré-neo-Alagoas (Marco LF-80). Legenda: RG = perfil de raios gama e ILD = perfil de resistividade. Datum: Marco LF-85 (base da seção evaporítica). Figura construída com base em Baumgarten, 1985 e Dias *et al.*, 1988 e retirada de Bizotto, 2014.

A seqüência das coquinas contém a principal rocha geradora da bacia (Folhelho Jiquiá) e também rochas-reservatório portadoras de óleo (rustones, grainstones). Depositada no andar loca Jiquiá (neobarremiano-eoaptiano) cujas datações e relações bioestratigráficas são baseadas em ostracodes e palinomorfos, pode alcançar 2400m nos depocentros e menos de 200m altos do embasamento (Rangel e Carminatti, 2000 e Carvalho 1995). Conforme mostra a figura 3.4, a seqüência das coquinas possui duas unidades cabornáticas (Schaller, 1981), denominadas informalmente de coquina inferior,

limitada pelos marcos LF-40 e LF-60 (alvo deste estudo) e superior, limitada no topo pelo marco LF-80. Essas duas unidades são separadas por sedimentos siliciclásticos (com pouco carbonato intercalado). Carvalho *et al* (1984) definem que as coquinas são compostas por vários ciclos deposicionais de raseamento para o topo (*shallowing-upward*) representados por calcilutitos (*mudstones*) e calcarenitos (*graisntones*) na base e calcirruditos (*rudstones*) no topo.

3.2.1. Bioestratigrafia

Moura & Praça (1985) e Moura (1987) definiram 11 unidades bioestratigráficas baseadas nas mudanças da fauna de ostracodes não marinhos associadas a mudanças abruptas das condições paleoambientais. Esse estudo (feito de acordo com o Artigo 50 da *North American Commission on Stratigraphic Nomenclature*) foi revisado por Silva-Telles (1992) e Carvalho *et al* (2000) que então combinaram as correlações bioestratigráficas com os perfis elétricos dos poços e as sequências de Dias *et al* (1988);. As coquinas estão posicionadas na parte superior do andar local Jiquiá (figura 3.5.), sendo que a coquina inferior corresponde à OS-1020 (C1020 na figura) e a superior à NRT-010 (C010 na figura), ambas relacionadas ao Eoaptiano (Carvalho *et al.*, 2000).

Figura 3.5. Quadro biocronoestratigráfico do Grupo Lagoa Feia com base em ostracodes. A figura mostra as cronozonas, biozonas e as sequencias deposicionais do Grupo Lagoa Feia (figura adaptada de Calazans, 2010).

3.2.2. Ambiente Depositional

A sequência das coquinas foi depositada em lagos separados por altos do embasamento como o Alto Regional de Badejo que, eventualmente, poderiam entrar em comunicação durante períodos mais úmidos (Abrahão e Warme, 1990). As águas desse ambiente foram caracterizadas como salinas, alcalinas e ricas em magnésio e permitiram a precipitação de argilominerais como talco, estevensita e sepiolita. A alta salinidade pode ser justificada pela ausência de fósseis de oogônios de carófito (alga típica de ambiente de água doce), a presença de minerais diagenéticos sindeposicionais como gipsita, anidrita e Mg-calcita, elevadas concentrações de estrôncio nos carbonatos e elevados teores de boro nas ilitas dos folhelhos, cuja presença é controlada pela salinidade do ambiente de deposição, valores isotópicos de O e C das rochas carbonáticas e conchas ($\delta^{13}\text{C} = 0.4$ a 3.7 ‰ e $\delta^{18}\text{O} = 3.3$ a 4.8 ‰) e presença de espessas conchas de ostracodes com morfologia ornamentada (Bertani e Carozzi, 1984, 1985; Rehim *et al.*, 1986; Abrahão e Warme, 1990; Carvalho *et al.*, 2000).

Guardado *et al.* (1989) interpreta que as coquinas foram depositadas na forma de bancos carbonáticos sobre altos estruturais do embasamento e ao longo dos flancos da estrutura. Nos depocentros foram depositados siltitos ricos em argilominerais como talco, produto da alteração diagenética da sílica gel magnesiana, e estevensita (figura 3.6.). Nas regiões mais profundas dos lagos prevaleciam condições anóxicas, que favoreceram a deposição de folhelhos negros ricos em matéria-orgânica, como os Folhelhos Buracica e Jiquiá, principais rochas geradoras de hidrocarbonetos da bacia. Nas porções mais proximais, um complexo de leques aluviais existia junto às escarpas de falhas de borda da bacia gradando para um sistema fluvial. Localmente, escarpamentos situados próximos à borda do sistema lacustre possibilitaram a instalação de fan-deltas, depositados em condições subaquosas.

A análise detalhada das associações de fácies observadas em testemunhos do Grupo Lagoa Feia por Carvalho *et al.* (2000) levou a interpretação dos seguintes 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. Sendo que os principais reservatórios contém uma maior proporção de barras bioclásticas. Os sedimentos lacustres depositados nas margens dos lagos frequentemente exibem estruturas associadas à exposição subaérea e pedogênese, que indicam mudanças do nível

do lago atribuídas a fatores climáticos principalmente, mas também tectônicos (Praça, 1996; Carvalho *et al.*, 2000).

Silva-Telles *et al.* (1994) e Silva-Telles (1996) constataram a presença de tecas quitinosas de foraminíferos trocoespiralados em pelitos subjacentes e sobrejacentes à coquina inferior (intervalo meso-neojiquiá; Barremiano terminal-Eoaptiano), apresentando fotomicrografias desses elementos. Tal como Castro e Azambuja (1981), os autores postularam uma influência marinha na Bacia de Campos neste período de tempo, o que também já havia sido feito por Takaki e Rodrigues (1984) em relação à coquina superior a partir de dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$. Adicionalmente, Mello e Hessel (1998) relataram a presença de bivalves marinhos – gêneros *Agelasina* e *Remontia* – no intervalo da coquina superior.

Figura 3.6. Modelo deposicional a sequência lacustre do Grupo Lagoa Feia -Bacia de Campos, de Guardado *et al.*, (1989). Os bancos de coquinas concentram-se sobre os altos sindeposicionais do embasamento.

3.2.3. Diagênese nas coquinas da Bacia de Campos

Schaller *et al.* (1981) conclui que a diagênese não foi seletiva, foi local e sem ligação com as fácies deposicionais. Os autores também concluíram que a silicificação sempre prejudica a qualidade dos reservatórios, seja ela na forma de cimento ou substituindo os carbonatos. Acredita-se que grande parte desta sílica é por precipitação “singenética” a eodiagenética, tendo o seguinte modelo: corrosão das rochas vulcânicas e aumento do pH da água deixando sílica em solução, a qual durante enxurradas que baixassem o pH da água precipitaria.

Carvalho *et al* (1984) identificam 10 estágios diagenéticos, que, em ordem cronológica de ocorrência seriam separados em eventos pré-compactação: (i) micritização marginal (freático lacustre); (ii) cimentação calcífera fina (água doce freática); (iii) neomorfismo da rocha (água doce freática); (iv) dissolução (água doce vadosa); (v) cimentação calcífera grossa (água doce freática). E eventos pós-compactação: (vi) “coating” de clorita; (vii) dolomitização; (viii) silicificação; (ix) dissolução; (x) caulinitização;

Bertani e Carozzi, (1985) correlacionam os eventos diagenéticos aos ambientes diagenéticos da seguinte maneira: (i) lacustre freático: micritização; crescimento de gipsita e anidrita, dolomitização, silicificação, alteração de líticos, cimentação em franja de calcita;, cimentação de zeolita; (ii) meteórico vadoso: dissolução (evaporitos, bioclastos, micrita, líticos, feldspatos, franja de calcita), deposição de silte vadoso, formação de crostas duras, pisolitização; (iii) meteórico freático: calcita esparítica, calcitização (líticos e evaporitos), neomorfismo; (iv) zona de mistura salina-doce: cimentação por quartzo fibroso; (v) soterramento: compactação química.

Bizzotto, (2014), conclui que a evolução diagenética das coquinas incluiu os seguintes processos: (i) micritização na zona freática meteórica estagnada, (ii) precipitação de cimento calcífero do tipo franja em ambiente meteórico freático, obliterando a porosidade primária interpartícula; (iii) neomorfismo devido à ação de águas meteóricas em ambiente lacustre salobro rico em magnésio; (iv) dissolução na zona meteórica freática ou vadosa, gerando porosidade secundária móldica e vugular; (v) retomada da cimentação calcítica do tipo drusiforme, preenchendo as cavidades geradas pela dissolução de bioclastos, seguida de; (vi) cimentação do tipo mosaico grosso em ambiente freático; (vii) silicificação; (viii) compactação mecânica produzida pelo progressivo soterramento das coquinas e dissolução por pressão, responsável pela formação de estilólitos.

4 Análise de fácies sedimentares, suas associações, sucessões e modelo conceitual de distribuição lateral de fácies

A análise das fácies sedimentares, suas associações e sucessões foi feita a partir da descrição 1030 metros de testemunhos distribuídos em 35 poços conforme mostram a tabela 2.1 e a figura 2.2. Inicialmente foram definidas 34 fácies sedimentares que foram codificadas e posteriormente agrupadas em 7 associações de fácies. Essa análise permitiu o reconhecimento de conjuntos de processos geneticamente relacionados, levando à interpretação do paleossistema deposicional.

Para as rochas silicilásticas a classificação utilizada foi a de Picard (1971) - ver, figura 2.3A. Para os carbonatos foi utilizada as classificações de Dunham (1962) para as rochas com menos de 10% dos grãos maiores de 2 mm e Embry e Klovan (1971) para as rochas com 10% de seus componentes maiores que 2 mm (figura 2.3B). Rochas carbonáticas psamíticas com mais de 33% de grãos siliciclásticos foram nomeadas de acordo com a classificação de Zuffa (1980), que utiliza o termo arenito híbrido. A classificação dos rudstones bioclásticos a bivalves (as “coquinas”, foco principal do estudo) levou em conta o fluxograma da figura 4.1.

Figura 4.1. Fluxograma de classificação dos rudstones bioclásticos a bivalves (coquinas).

As figuras 4.2 a 4.9. listam as fácies descritas pertencentes às sequências siliciclásticas, carbonáticas em geral e das “coquinas” (nesta ordem) mostrando uma foto, um croqui esquemático com suas características principais além de uma interpretação sucinta sobre o controle deposicional respectivo.

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
1 Lamito argiloso	Lamito maciço cinza esverdeado a cinza escuro. Pode apresentar laminação incipiente definida por micas.			Decantação - porção distal do lago, abaixo da ação de ondas de tempestade
2a Siltito maciço	Siltito vermelho a verde maciço a levemente laminado.			Decantação - porção distal do lago, abaixo da ação de ondas de tempestade
2b Siltito vermelho bioturbado	A bioturbação ocorre na forma de "tubos" com geometria irregular pervasivos à trama da rocha.			Decantação - porção distal do lago, abaixo da ação de ondas de tempestade
2c Siltito bioclástico	Siltito cinza a verde, maciço a laminado no qual ocorrem conchas de bivalves articuladas muito próximas de sua posição de vida.			Decantação principalmente. Períodos de ação de ondas de tempestade trazendo os bioclastos de porções mais rasas.
2d Siltito vermelho laminado	Siltito vermelho com laminação plano-paralela, podendo eventualmente, apresentar conchas com pouco transporte. As conchas de bivalves não estão em posição de vida mas encontram-se muito pouco fragmentadas			Decantação principalmente. Períodos de ação de ondas de tempestade trazendo os bioclastos de porções mais rasas.

Figura 4.2. fácies siliciclásticas.

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
2e Siltito arenoso	Esta fácies se apresenta normalmente laminada, podendo estar eventualmente bioturbada e algumas vezes com fragmentos de conchas de bivalves retrabalhados (desarticulados e fragmentados).			Material siliciclástico transportado para regiões mais profundas do lago por fluxos hiperpicnais.
3a Arenito muito fino/finíssimo	Pode apresentar estratificação plano-paralela ondulada, raramente com ripples. Associados à essa fácies foram descritos pequenos intervalos (de 10 a 20cm) de tempestitos e gutters casts. Conchas de bivalves retrabalhadas ocorrem dispersas e pode ocorrer bioturbação.			Material siliciclástico presente em porções profundas do lago que sofrem efeitos da ação de tempestades gerando por exemplo, gutter casts
3b Arenito muito fino laminado	Arenito muito fino com estratificação plano-paralela que pode localmente apresentar ripples. Não foram observados fragmentos de conchas associadas a esta rocha, apenas clastos de argila.			Material siliciclástico transportado para regiões mais profundas do lago por fluxos hiperpicnais.
3c Arenito médio com estratificação plano-paralela à cruzada de baixo ângulo	Ocorrem fragmentos de rochas vulcânicas e de conchas de bivalves bem retrabalhadas dispersas.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente.
3d Arenito médio maciço com bioclastos	Pode apresentar fragmentos de conchas de bivalves concentrados em níveis, muito pouco fragmentados.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente.

Figura 4.3.Fácies siliciclásticas.

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
4a Marga	Marga maciça com raros fragmentos de conchas de bivalves dispersos.			Decantação - porção distal do lago, com aporte de siliciclásticos intermediário.
4b Arenito híbrido conglomerático	Arenito com conchas de bivalves preferencialmente concordantes com o acamamento da rocha. A presença de conchas concentra-se em níveis cíclicos centimétricos, nos quais a proporção de conchas diminui em direção ao topo (tempestitos?).			Retrabalhamento por tempestades em lago distal, abaixo da ação de ondas de tempo bom e/ou. Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente.

Figura 4.4. Fácies híbridas.

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
5 Mudstone	Mudstone maciço a fracamente laminado na qual podem ocorrer até 10% de bioclastos de bivalves dispersos.			Decantação - porção distal do lago, abaixo da ação de ondas e tempestade
6a Wackestone bioclástico	Se caracteriza por ser sustentada por matriz carbonática (micrita). Fragmentos de conchas de bivalves ocorrem dispersos ou concentrado em níveis (tempestitos?).			Interbarras. Barras mais profundas concentrariam a micrita.
6b Wackestone oncolítico	Esta fácies diferencia-se da fácies 6a por apresentar grãos de oncoides de granulação areia média a muito grossa dispersas em matriz carbonática que sustenta a rocha.			Interbarras. Barras mais profundas concentrariam a micrita. Ação de bacterias.
7a Graistone bioclástico a ostracode	Constituído por carapaças de ostracodes de granulação areia média. Comumente ocorre argila magnesiana (clastos ou filmes).			Deposição em corpos aquosos com alta quantidade de matéria orgânica propiciando uma alta concentração de ostracodes.
7b Grainstone de bivalve com argila	As carapaças de bivalves encontram-se retrabalhadas (desarticuladas e fragmentadas). Ocorrem níveis milimétricos de argila magnesiana.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente..

Figura 4.5. Fácies carbonáticas finas a médias.

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
7c Grainstone com argila magnesiana e esterulitos	Esta fácies se caracteriza como grainstone e pontualmente packstone (quando tem algum teor de micrita) com esterulitos tamanho areia grossa e alguns filmes de argila magnesiana.			Deposição em corpos aquosos bastante calmos com alta quantidade de matéria orgânica propiciando uma alta concentração de ostracodes ou a precipitação de esterulitos.
7d Grainstone oncolítico bioclástico	Ocorrência abundante de oncóides além de bioclastos de bivalves e ostracodes bastante fragmentados chegando a um tamanho areia fina a muito fina e presença localizada de clastos de argila magnesiana.			Ondas de tempestades- formam bermas quando o nível do lago é baixo, ou barras quando o nível do lago está alto. Barras mais profundas concentrariam a micrita. Ação de bacterias.
7e Grainstone peloidal	Composta predominantemente de pelóides tamanho areia fina, além disso, é frequente a presença de filmes de argila magnesiana e níveis com ostracodes.			Deposição em corpos aquosos bastante calmos com alta quantidade de matéria orgânica propiciando uma alta concentração de ostracodes ou a precipitação de esterulitos.
7f Grainstone oolítico	Tem como componente principal grãos de oóides tamanho areia grossa. Esta fácies tem ocorrência bastante restrita e normalmente está bastante silicificada, portanto a composição original dos córtices dos oóides não é reconhecível. É comum núcleos de bivalves.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando o nível do lago é alto relativamente..
8 Floatstone bioclástico com conchas articuladas (8a) ou desarticuladas (8b)	8a - Marcada pela ocorrência de conchas de bivalves articuladas em meio a matriz carbonática que sustenta a rocha. 8b - com carapaças de bivalves retrabalhados (desarticulados e fragmentados).			Decantação com ação de ondas de tempestade trazendo os bioclastos de porções mais rasas.

Figura 4.6. Fácies carbonáticas finas a médias.

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
9a Rudstone bioclástico com conchas articuladas	Esta fácies é definida por rudstone bioclástico a bivalves com carapaças articuladas. Entre as conchas podem ocorrer micrita e/ou filmes de argila magnesianos.			Depositada abaixo da ação de ondas de tempo bom pode ter conchas quase em posição de vida intercaladas com argila magnesiana ou imersas em matriz fina (micrita ou argilomineral). Esta condição é gerada, pois a maior parte do tempo este ambiente está sob baixa energia, que por vezes é interrompida por ação de ondas de tempestades.
9b Rudstone bioclástico com conchas desarticuladas	Rudstone bioclástico a bivalves com conchas desarticuladas e bem retrabalhadas (seleção ruim a moderada, alta fragmentação e bioclastos bem arredondados). Pode conter argila magnesiana e as conchas podem estar concordantes.			Ondas de tempestades- formam bermas quando o nível do lago é baixo, ou barras quando o nível do lago está alto. Barras mais profundas concentrariam a micrita. Ação de bacterias.
9c Rudstone bioclástico com fragmentos e/ou oóides de argila magnesiana	Contém oóides e/ou fragmentos de argila magnesiana. Orientação caótica.			Depositada abaixo da ação de ondas de tempo bom pode ter conchas quase em posição de vida intercaladas com argila magnesiana ou imersas em matriz fina (micrita ou argilomineral). Esta condição é gerada, pois a maior parte do tempo este ambiente está sob baixa energia, que por vezes é interrompida por ação de ondas de tempestades.
9d Rudstone bioclástico bimodal com pouco retrabalhamento	Rudstone bioclástico bimodal com pouco retrabalhamento (as conchas estão na sua maioria articuladas). A bimodalidade no tamanho das carapaças é dada pela ocorrência de dois gêneros distintos de bivalves.

Figura 4. 7. Fácies de rudstones bioclásticos a bivalves (coquinas).

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
9e Rudstone bioclástico bimodal retrabalhado	As populações de carapaças de bivalves encontram-se bem retrabalhadas (desarticuladas e fragmentadas). A população que apresenta o maior tamanho ocorre entre 30 e 80% e as conchas apresentam orientação predominantemente caótica.			Ondas de tempestades- formam bermas quando o nível do lago é baixo, ou barras quando o nível do lago está alto. Barras mais profundas concentrariam a micrita. Ação de bacterias.
9f Rudstone bioclástico bimodal retrabalhado com predomínio de conchas na fração menor	Semelhante à fácies 9e porém a população de conchas maiores não ultrapassa 30%. Conchas bem retrabalhadas e estão preferencialmente com posição caótica.			Ondas de tempestades- formam bermas quando o nível do lago é baixo, ou barras quando o nível do lago está alto. Barras mais profundas concentrariam a micrita. Ação de bacterias.
9g Rudstone bioclástico bimodal retrabalhado com conchas concordantes	Rocha com mais de uma moda de tamanho de conchas retrabalhadas e em orientação predominantemente concordantes ao acamamento da rocha. A intercalação entre os tamanhos distintos de carapaças confere à rocha estratificação plano-paralela.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente.
9h Rudstone bioclástico unimodal pouco retrabalhado	Esta fácies equivale a rudstone bioclástico unimodal pouco retrabalhado. As conchas apresentam orientação preferencial caótica ligeiramente fragmentadas e pouco arredondadas.			Depositada abaixo da ação de ondas de tempo bom pode ter conchas quase em posição de vida intercaladas com argila magnésiana ou imersas em matriz fina (micrita ou argilomineral). Esta condição é gerada, pois a maior parte do tempo este ambiente está sob baixa energia, que por vezes é interrompida por ação de ondas de tempestades.

Figura 4.8. Fácies de *rudstones* bioclásticos a bivalves (coquinas).

Fácies	Descrição	Foto	Croqui	Interpretação
9i Rudstone bioclástico bem selecionado e caótico	A fácies 9i corresponde a rudstone bioclástico a bivalves bem selecionadas (podendo ocorrer até 20% de conchas com tamanhos diferentes da moda). As carapaças apresentam orientação predominantemente caótica, bem fragmentadas e arredondadas.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente.
9j Rudstone bioclástico bem selecionado e re trabalhado e concordante	A fácies 9j diferencia-se da fácies 9i simplesmente pelo fato das carapaças de bivalves estarem preferencialmente concordantes. As demais características são semelhantes.			Ação constante de ondas e correntes de tempo bom - ambiente de praias quando o nível do lago é baixo e barras quando é mais alto relativamente.
9k Rudstone Intracástico	Esta fácies é marcada pela ocorrência de intraclastos (entre eles coquinas, vulcânicas, marga e mudstone) e fragmentos de conchas de bivalves bem re trabalhados e arredondados. Caótico.			Fluxos gravitacionais - podem chegar fragmentos de conchas e intraclastos
9l Rudstone oncolítico	Oncóides chegam a atingir tamanhos centimétricos e estão comumente silicificados.			Ondas de tempestades- formam bermas quando o nível do lago é baixo, ou barras quando o nível do lago está alto. Barras mais profundas concentrariam a micrita. Ação de bacterias.

Figura 4. 9. Fácies de *rudstones* bioclásticos a bivalves (coquinas).

4.1. Associações de fácies e seus controles deposicionais

As fácies sedimentares descritas nas figuras 4.2. a 4.9. foram agrupadas em sete associações de fácies interpretadas como sendo formadas por processos deposicionais semelhantes. As características dos bioclastos das coquinas, as feições texturais e estruturas sedimentares das rochas, e as respectivas associações quanto à energia deposicional foram os principais critérios usados na interpretação do ambiente deposicional para cada associação de fácies.

Associação de fácies de área protegida (AF1): formada em depressões locais atrás das bermas ou internamente às barras, onde durante o nível baixo do lago ocorrem corpos aquosos bastante calmos com alta quantidade de matéria orgânica propiciando uma alta concentração de ostracodes (fácies 5, 6a e 7a) ou a precipitação de esferulitos (fácies 5 e 7c). Essa associação de fácies é rara no registro testemunhado. Eventualmente podem ocorrer nesta posição, leques de *washover* (fácies 9k) associados a eventos de tempestades.

Associação de fácies de berma/barra (AF2): ocorre em áreas altas formadas pela deposição de conchas dispostas de forma caótica e com diferentes níveis de retrabalhamento. Associação depositada pela ação de ondas de tempestades formando bermas, quando o nível do lago está baixo, ou barras, quando o nível do lago está alto. Estas bermas/barras podem ser compostas somente por bivalves (9e, 9f e 9i), por bivalves e argila magnesianas (lamelas, oóides e clastos - 9c), por bivalves e oncóides (9e, 9f, 9i e 9l), ou são barras bioclásticas mais profundas (5, 6a, 7d e 9e). Consiste na associação de ocorrência mais frequente nos testemunhos descritos. A grande preservação desta fácies na seção estratigráfica pode ser explicada pela cimentação precoce de calcita e também por uma alta taxa de subsidência.

Associação de fácies de praia/barra (AF3): ocorre em áreas inclinadas formadas pela deposição de conchas com alto grau de retrabalhamento (9i e 9j) e/ou conchas e areias siliciclásticas (3c, 3d, 4b e 9g) dispostas predominantemente paralelas a subparalelas ao substrato sob ação constante de ondas e correntes de tempo bom, formando praias quando o nível do lago está baixo, e barras quando o nível do lago está alto. Em altos estruturais, devido ao nível de energia maior pode ocorrer uma maior cominuição de conchas e formação de grainstones bioclásticos (7b).

Associação de fácies bioclásticas profundas (AF4): depositada abaixo da ação de ondas de tempo bom a AF4 se caracteriza por ter conchas intercaladas com argila magnesiana (fácies 9b) ou imersas em matriz fina (micrita ou argilomineral) quase em posição de vida (fácies 9a). Esta condição é gerada em ambiente de baixa energia, que por

vezes é interrompida por ação de ondas de tempestades que trazem material retrabalhado e remobilizam material local.

Associação de fácies siliciclásticas depositadas sob a ação de tempestades (AF5): material siliciclástico presente em porções profundas do lago que sofreram efeitos da ação de tempestades gerando *gutter casts* (*sensu* Whitaker, 1973 - fácies 3a) e plumas de bioclastos (fácies 2c, 2d e 2e) trazidos de porção mais rasas.

Associação de fácies calcárias profundas (AF6): em posições mais profundas do lago, quando por algum motivo (clima ou relevo) o aporte siliciclástico é mais baixo desenvolve-se a AF6 (4a e 5). Nesta posição, por efeito de tempestades ou mesmo por fluxos gravitacionais podem chegar fragmentos de conchas com um alto teor de intraclastos (9n).

Associação de fácies siliciclásticas depositadas abaixo da ação de ondas de tempestade (AF7): em posições de lago profundo abaixo da ação de ondas de tempestade e em ambiente de baixa energia registram-se os depósitos siliciclásticos da AF7, caracterizado por um domínio de processos decantativos (1, 3a e 2b).

A tabela 4.1. resume as proporções totais observadas para cada associação de fácies interpretada, as fácies contidas em cada uma com as proporções e espessuras médias de cada fácies por código.

Associação de fácies (% total no registro levantado)	Código das fácies	Proporção (%)	Espessura média da fácies (m)
AF1 (1%)	5	33	0.2
	6a	41	0.6
	7a	7.1	0.2
	7c	5.9	0.2
	9k	13	0.2
AF2 (33.5%)	5	0.2	0.1
	6a	0.9	0.3
	7d	2.5	0.1
	9e	47.5	0.7
	9f	37.3	0.5
	9i	3.4	0.3
	9c	4.4	0.5
AF3 (19.8%)	9l	3.8	0.2
	3c	12.4	0.3
	3d	10.6	0.2
	4b	11	0.5
	7b	12.1	0.7
	9g	25.2	1
	9i	13.5	0.6
AF4 (19.3%)	9j	15.2	0.6
	4b	55.1	1
	9b	32.3	0.4
AF5 (7.6%)	9a	12.6	0.8
	2c	24.5	0.2
	2d	7.4	0.58
	2e	6	0.33
AF6 (13.6%)	3a	62.1	1.5
	4a	50.1	0.6
	5	35	0.3
	9n	14.9	0.4
AF7 (5.2%)	1	47.6	0.95
	3a	10	0.7
	2b	42.4	0.5

Tabela 4.1. Associações de fácies interpretadas, fácies contidas em cada uma com proporção e espessura média.

A alta concentração de íons de Mg no lago permitiu a deposição de lamelas, oóides e clastos de talco-estevensita juntamente com os bivalves. Em períodos de cheia, é elevado o aporte de siliciclásticos (*sensu* Andrews, 2015) culminado na formação de praias/bancos mistos “coquinas” de bivalves e rochas siliciclásticas.

A distribuição lateral de fácies apresentada na figura 4.10. é interpretada com relação à lâmina de água e, conseqüentemente, aos níveis de ação de ondas de tempo bom e de tempestade. É considerado um período de pouco aporte de siliciclástico nesta distribuição ideal que se desenvolve em altos estruturais (hemi-grábens). As análises da distribuição dos produtos diagenéticos levou em consideração esse modelo conceitual de variação lateral de fácies.

Figura 4.10. Trato de fácies de bermas/praia de conchas bem desenvolvido. AF1 – associação de fácies de área protegida rica em ostracodes. AF2 – associação de fácies de berma/barra bioclástica a bivalves. AF3– associação de fácies de praia/barra bioclástica. AF4 – associação de fácies bioclásticas profundas. AF5 – associação de fácies siliciclásticas depositadas sob ação de tempestades.

5 Análise dos produtos diagenéticos, suas associações e sucessões

A análise dos produtos diagenéticos, suas associações e sucessões foi feita a partir da descrição de 368 lâminas delgadas provenientes de 320m de testemunhos distribuídos em 5 poços (BD-04, BD-11, RJS-168, PM5, PM4, PM3A) conforme mostra a tabela 2.1 e figura 2.2.

5.1. Produtos observados e ambientes diagenéticos da seção Coquina Inferior da Formação Coqueiros

Os produtos diagenéticos observados em lâminas delgadas são gerados pelos processos detalhados no item 3.3. “processos diagenéticos em rochas carbonáticas”, e encontram-se listados a seguir:

5.1.1. Cimentação carbonática

Os produtos observados associados aos processos de cimentação carbonática foram: cimentação calcítica blocosa em mosaico (interpartícula) e cimentação calcítica tipo *bladed*.

Cimentação calcítica blocosa em mosaico: consiste no tipo de cimentação mais comum descrito nos poços e ocorre praticamente em todo o intervalo da Coquina Inferior, sendo ausente somente quando as associações AF2 ou AF3 encontram-se extremamente dissolvidas. Pode ser eodiagenética, preenchendo a porosidade intergranular pré-compactação (figura 5.1), ou mesodiagenética, preenchendo então as porosidades preservadas pós-compactação (figura 5.2).

Figura 5 1. Cimentação calcítica blocosa em mosaico eodiagenética. Poço PM-3A -2940.45 m (MD).

Figura 5 2. Cimentação calcítica blocosa em mosaico mesodiagenética. Poço BD-04 2728.9 m (MD).

Cimentação calcítica tipo “bladed”: cristais prismáticos, pouco alongados, geralmente com maior razão Mg/Ca (Flügel, 2004), isópacos e cincungranulares. Ao longo do intervalo ocorre de maneira pontual, em intervalos de cerca de 10 metros. Pré-compactação, podem ocorrer bem formados ou parcialmente dissolvidos, principalmente nas AF3 e AF4, podendo ocorrer também na AF2:

Figura 5 3. Cimentação calcítica *bladed*. Poço RJS-168 2820.8m (MD).

5.1.2. Silicificação

Os produtos principais observados associados à silicificação foram: cimentação por sílica e substituição por sílica.

Cimentação por sílica: dois tipos de cimentação por sílica foram observados: (i) sílica microcristalina, intergranular, eodiagenética (pré-compactação). Consiste em cristais de quartzo microcristalino inequigranulares, que sustentam o arcabouço original da rocha (figura 5.4); (ii) calcedônia - também ocorre de maneira precoce e oblitera a porosidade

original. A grande diferença entre a calcedônia e a sílica microcristalina é que a calcedônia ocorre frequentemente associada a processos de dissolução e, na maioria das vezes, inicia-se como uma franja (figura 5.5). A cimentação por sílica (calcedônia e microcristalina) ocorre em todas as associações de fácies descritas.

Figura 5 4. Cimentação de sílica microcristalina. A - nicóis paralelos, B - nicóis cruzados. Poço BD-04 2703.8m (MD).

Figura 5 5. Cimentação de calcedônia - nicóis paralelos, poço PM-3A 2914.25m (MD).

Substituição por sílica: substituição da calcita por sílica microcristalina e também por calcedônia. Sua ocorrência comumente precede e/ou procede aos processos de cimentação por sílica. A substituição pode ser parcial ou total (figuras 5.6 e 5.7):

Figura 5 6. Substituição das conchas por sílica microcristalina. Poço PM-3A – 2967.89m (MD).

Figura 5 7. Substituição das conchas por calcedônia. Poço PM-5 – 2973.45m (MD). Notar também cimentação calcítica mesodiagenética no poro pós substituição de calcedônia, que, devido à compactação mecânica, encontra-se fraturada.

5.1.3. Micritização microbial

Esse processo, quando muito intenso, pode levar à completa micritização do clasto. No caso das coquinas estudadas, frequentemente esse processo não prossegue tanto e somente o envelope micrítico é observado.

Figura 5 8.Envelope micrítico; Poço BD-04 2728.9 m (MD).

5.1.4. Neomorfismo

Esse tipo de alteração ocorre nas coquinas estudadas conforme mostra a figura 5.9.

Figura 5 9. Calcita neomórfica. Concha com linhas de crescimento preservadas. Poço PM-5 2991.75 m (MD).

5.1.5. Dissolução

Nas coquinas estudadas, é de suma importância para a melhora das características permoporosas (figura 5.10.) do reservatório e frequentemente ocorre associada às AF2 e AF3.

Figura 5 10. Feições de dissolução poço PM-5 A – 2987.35 m (MD). B – 2987.95 m (MD).

5.1.6. Compactação

A figura 5.11 mostra dois exemplos de compactação química observada nas coquinas estudadas.

Figura 5 11. A-Contato de grão suturado poço PM-4 2923.95 m (MD) e B – estilólitos poço BD-04 2708.4m (MD).

5.2. Sucessões dos produtos diagenéticos

A associação de Flügel (2004) que mostra a ocorrência mais frequente dos diferentes tipos de cimentação e os ambientes diagenéticos apresentada na figura 2.11 é apresentada aqui novamente na figura 5.12 seguida da figura 5.13, onde são demonstradas as texturas e tramas da figura 5.12 observadas neste trabalho.

Tipos de cimento carbonáticos	Ambientes Diagenéticos			
	Meteórico vadoso	Meteórico freático	Marinho freático	Subsuperfície
Dripstone				
Menisco				
Microcristalino				
Bladed				
Drusiforme				
Dente de cão				
Blocoso				
Peloidal				
Botroidal				
Poiquilotópico				
Trama	Gravitacional Menisco Drusiforme Mosaico granular Sobrecrescimento sintaxial	Circungranular Isópaco Gravitacional Mosaico blocoso e granular Sobrecrescimento sintaxial	Circungranular Isópaco Crostras Splays Botroidal	Drusiforme Mosaico granular Sobrecrescimento sintaxial

Figura 5 12Tipos de cimento carbonáticos e tramas encontradas comumente em cada ambiente diagenético. Figura adaptada de Flügel, (2004).

Tipos de cimento carbonáticos	Ambientes Diagenéticos			
	Meteórico vadoso	Meteórico freático	Lacustre freático	Subsuperfície
Bladed
Blocoso
Poiquilotópico
Trama	Gravitacional Mosaico granular	Mosaico blocoso e granular	Isópaco Circungranular	Mosaico granular

Figura 5 13.Tipos de cimento carbonáticos e tramas observados nas lâminas descritas e ambientes diagenéticos comumente associados. Figura adaptada de Flügel, (2004).

5.2.1. Interpretações dos ambientes diagenéticos e estabelecimento das sucessões dos eventos diagenéticos

As análises semiquantitativas da diagênese foram convertidas em perfis de poços, conforme mostra a figura 5.14. Na figura também se destacam as curvas NPHI em azul e RHOB em vermelho, os dados de porosidade provenientes da petrofísica básica (pontos em preto) e estimados na descrição das lâminas (% vol de poro - pontos em vermelho). Ressalta-se que a calcita blocosa em mosaico (oitava trilha da esquerda para a direita da figura 5.17), por aparecer em quantidades constantes ao longo de toda a seção da Coquina Inferior, foi tratada como “background” e não foi um mineral diagnóstico para a interpretação do tipo de ambiente diagenético. Interpreta-se que esse produto possa se formar em curtos tempos de residência (flutuações de alta frequência) tanto no ambiente metórico vadoso quanto meteórico freático – principal (Flügel, 2004 - figura 5.12).

Figura 5 14.Perfis com resultados das análises semiquantitativas executadas nas lâminas delgadas – cada ponto preto representa uma lâmina descrita. Trilhas (da esquerda para direita) 1 – profundidade, 2 – raios gama, 3 – associação de fácies, 4 – dissolução, 5 – calcedônia, 6 – cimentação *bladed*, 7 – sílica microcristalina, 8 – cimentação calcítica blocosa e 9 – perfis NPHI, RHOB, análise petrofísica básica (preto) e porcentagem de poros estimada na descrição (vermelho).

Eodiagênese: a análise das diferentes ocorrências/concentrações dos produtos diagenéticos como curvas ao longo do poço facilitou o estabelecimento de associações com os ciclos de raseamento/afogamento deposicionais, uma vez que os principais eventos diagenéticos são interpretados como precoces. Observa-se, a partir da figura 5.13. e das descrições do item 2.3.4., que as possibilidades de correlação entre os produtos diagenéticos observados e seus ambientes são:

- 1) **Dissolução:** meteórico vadoso, meteórico freático e zona de mistura (Flügel 2004; Tucker & Wrigth, 2009)
- 2) **Calcedônia:** meteórico freático e zona de mistura (Bertani e Carozzi, 1985 e Heaney, 1993);
- 3) **Sílica microcristalina:** meteórico vadoso e freático, zona de mistura e lacustre freático (adaptado do marinho de Flügel 2004);
- 4) **Calcita tipo *bladed* com trama isópaca:** lacustre freático (adaptado do marinho de Flügel 2004);

Conforme mostra a figura 5.13. a calcita tipo *bladed* com trama isópaca circungranular é mais comum em ambiente lacustre freático (adaptação do marinho). Uma vez que essa calcita ocorre associada à sílica microcristalina (por vezes também pós-sílica microcristalina) e, levando em consideração os ciclos sedimentares, uma sucessão ideal dos produtos diagenéticos (do mais fundo - lacustre - para o mais raso - vadoso) plausível seria a sucessão de sílica microcristalina, concomitante ou seguida de calcita *bladed*, calcedônia e dissolução, conforme mostra a figura 5.15. - trecho do poço RJS-168. Ressalta-se que no ciclo sedimentar inferior da figura foram observadas argilas clásticas (<5%), enquanto que no superior não, o que poderia indicar um nível do lago mais alto no início desse ciclo (controle climático - maior aporte de siliciclásticos).

Figura 5 15. Ciclos sedimentares interpretados a partir da associação de fácies (2ª trilha da esquerda para a direita) e sucessão ideal dos produtos diagenéticos interpretada (indicada pela seta).

Bertani e Carozzi, (1985), observaram que a “sílica em franja” presente nessas coquinas (descrita aqui como calcedônia), seria precipitada na zona de mistura. Heaney, (1993) argumenta que a calcedônia precipitaria em fluidos de baixa temperatura (<100 °C), meteóricos a parcialmente meteóricos (mistura) e ligeiramente mais concentrados em polímeros de Si do que fluidos que precipitariam quartzo (sílica cristalina). Considerando (assim como Bertani e Carozzi, 1985) a calcedônia como precipitada na zona de mistura, a análise da figura 5.15. leva a uma interpretação de que a maior dissolução estaria acima dessa zona, provavelmente em ambiente meteórico vadoso e a sílica microrcristalina, juntamente com a calcita do tipo *bladed*, em ambiente lacustre freático, conforme também a indicação de Flugel 2004. Assim, pela lógica dessa sucessão vertical, uma possível interpretação para os ambientes diagenéticos e seus produtos seria (da base para o topo da sucessão): **lacustre freático**: predomínio de sílica microcristalina e calcita *bladed*; **zona de mistura**: precipitação de calcedônia (ressalta-se que essa zona de mistura seria uma mistura de um fluido com maior concentração em Si e Mg – lacustre – de um fluido com mais baixa concentração iônica – meteórico); **meteórico vadoso**: predomínio de dissolução. Essa interpretação de ambientes *versus* produtos diagenéticos associados é demonstrada na figura 5.16, trecho do poço RJS-168 (última trilha):

Figura 5 16. Interpretação dos ambientes diagenéticos – ciclos e sucessões da figura 5.18.

Essa sequência, que seria uma sequência “ideal”, repete-se em outros trechos de outros poços, como exemplificado nos poços PM-05 e BD-11, figura 5.17.

Figura 5.17. Poços com as sequências dos produtos diagenéticos interpretada como “ideal”. Última trilha com os ambientes diagenéticos interpretados (legenda das cores – mesma da figura 5.18)

Assim, conclui-se que as principais associações e sucessões dos produtos eodiagenéticos relacionadas aos ambientes diagenéticos e às variações do nível base de baixa frequência (menor que a dos ciclos sedimentares - figura 5.18) mais provável para a seção estudada seria:

- (i) **Metéorico vadoso (nível base raso):** dissolução;
- (ii) **Meteórico freático (nível base raso a intermediário):** blocosa mosaico (+/- dissolução);
- (iii) **Zona de mistura (nível base intermediário):** calcedônia (+/- dissolução);
- (iv) **Lacustre freático (nível base fundo):** sílica microcristalina e calcita *bladed*;

Essa conclusão está também de acordo com o descrito por Bertani e Carozzi, (1985). Ressalta-se que o ambiente meteórico freático seria representado pela precipitação de calcita blocosa. Como esse mineral é muito comum ao longo de todo intervalo da Coquina Inferior e pode ser associado também a processos subsuperficiais, não foi utilizado para interpretação de variação do nível base, assim como o ambiente meteórico freático.

A figura 5.21 explica como seria a sucessão dos produtos diagenéticos em uma variação do nível base de frequência mais baixa que a sedimentar para o mesmo trecho do poço RJS-168, analisado anteriormente. Na esquerda inferior está representada uma progradação de dois ciclos sedimentares de alta frequência e na direita a variação do nível base no tempo (frequência) de residência da diagênese. Assim, a base do ciclo estaria em

condições lacustre freáticas, representada pela precipitação de sílica microcristalina e calcita *bladed*. Na sequência, com a queda do nível do lago, o poço estaria na zona de mistura com a precipitação de calcedônia, e o último momento, que culmina como o topo do par de ciclos sedimentares, teria o predomínio da dissolução e o poço estaria na zona vadosa (ver sequencia do canto direito inferior da figura).

Figura 5 18. Demonstração de como o rebaixamento do nível base causa a sucessão dos produtos diagenéticos observada na posição do poço apresentado na figura 5.18.

A interpretação dessa sucessão de produtos diagenéticos em uma curva de variação do nível base pode ser feita a partir de uma adaptação da curva apresentada por Andrews, (2015) feita para o Lago Orcadie (Devoniano), Escócia. A curva (figura 5.19) representa uma flutuação cíclica do nível do lago relacionada ao clima, mostrando também a distribuição do escoamento superficial (barras verticais verdes - momentos de intensa precipitação) e uma curva com razão evaporação/precipitação. Sobre essa curva foi possível estabelecer as zonas de ocorrência de cada produto diagenético descrito seguindo a seguinte lógica:

- (i) O pico do escoamento superficial (maior barra vertical verde da figura) representaria o momento de máxima umidade (chuvas) e maior aporte de silício e magnésio (proveniente principalmente do intemperismo e lixiviação desses elementos a partir da talco-estivensita e/ou dos basaltos, muito comuns nas sucessões de rochas anteriores às coquinas). Como o nível do lago estaria com uma tendência de subida até atingir a máxima cheia, a precipitação de sílica microcristalina, que requer uma menor concentração de Si em relação à calcedônia (Heaney, 1993), seria predominante. A maior concentração de magnésio também justificaria a associação da sílica microcristalina com a calcita tipo *bladed* (magnesian). Esse seria o tempo de maior residência do ambiente lacustre freático.
- (ii) A partir do momento em que o nível do lago inicia seu rebaixamento e a razão entre evaporação e precipitação aumenta, há uma concentração relativa de silício e o mineral a ser precipitado passaria a ser a calcedônia. Esse seria o tempo de residência maior do ambiente zona de mistura.
- (iii) Quando a precipitação diminui, e o tempo é de estiagem, a razão evaporação/precipitação é maior e há a exposição vadosa. Neste momento o produto diagenético principal seria a dissolução vadosa. Esse seria o tempo de residência maior do ambiente meteórico vadoso.
- (iv) Na sequência, após o início do aumento do escoamento superficial, as condições do lago seriam similares às do item (ii) com concentração de sílica ideal para formar calcedônia em um momento em que ainda há uma evaporação importante, tornando a sucessão, uma sucessão “espelhada” (figura 5.22).

Nessa curva também foi representada a sucessão ideal de deposição das associações de fácies sedimentares (barra horizontal). A análise do momento de deposição *versus* tipo de produto diagenético de cada associação deve ser feita observando o atraso entre a deposição das associações de fácies e produto diagenético principal. Assim, o produto diagenético típico pós-deposição da AF3 seria a calcedônia e da AF2 a dissolução e assim por diante, conforme observado nas descrições de lâminas.

Figura 5 19. Sucessão ideal dos produtos diagenéticos interpretada e curva de variação do nível base respectiva. A curva de variação do nível base com escoamento superficial e razão de evaporação/precipitação foi adaptada de Andrews, 2015

Mesodiagênese: dois produtos comumente observados associados à diagênese de subsuperfície são calcita blocosa (rara poiquilótica) pós-compactação e dissolução por pressão associada aos estilólitos, (além de filmes de dissolução) conforme representado na figura 5.20. Ressalta-se que esses produtos não são tão frequentes quantos os produtos eodiagénéticos.

Figura 5 20. Produtos mesodiagênese representados em uma curva de subsidência ao longo do tempo.

6 Controles estratigráficos dos eventos diagenéticos: interpretação das velocidades relativas de variação do nível base pelas correlações entre as associações de fácies sedimentar e produtos diagenéticos e predição 1D da paragênese diagenética

6.1. Interpretação da velocidade relativa de variação do nível base

A interpretação dos ambientes diagenéticos como meteórico vadoso, meteórico freático, zona de mistura etc, a partir dos dados diagenéticos pode ser valiosa para o estabelecimento do tempo de residência relativo de cada ambiente ao longo da estratigrafia sedimentar e conseqüentemente, para o estabelecimento das variações gerais do nível base. Porém, a compreensão detalhada das variações do nível base deve levar em consideração a superimposição dos produtos da diagênese relacionados a uma determinada associação de fácies, que não fica clara com a interpretação direta do ambiente, como exemplifica a figura 6.1.

Na figura 6.1, os dois poços apresentam um predomínio de dissolução em intervalos associados à AF2. Assim, nos dois casos interpreta-se que o ambiente com maior tempo de residência nesse trecho foi o meteórico vadoso (MV - em vermelho) pela predominância de dissolução em relação aos outros produtos diagenéticos. Porém, observa-se que o poço BD-04 não apresenta nenhum tipo de cimentação associada à dissolução e o poço BD-11 apresenta cimentação de calcedônia e de calcita tipo *bladed* para o mesmo intervalo interpretado como meteórico vadoso. Portanto, fazendo a interpretação direta do ambiente diagenético como meteórico vadoso essas diferenças entre as paragêneses diagenéticas de cada poço não são claramente indicadas.

Figura 6.1. Duas paragêneses de produtos diagenéticos distintas, porém com a mesma interpretação de maior tempo de residência na zona meteórica vadosa.

Assim, uma forma alternativa de interpretação para a manutenção das informações das descrições de lâminas foi aqui desenvolvida. Essa alternativa baseia-se na interpretação da “velocidade relativa de variação do nível base” a partir da associação de fácies deposicionais e da sequência de superposição dos produtos diagenéticos conforme demonstra a figura 6.2. O estabelecimento dessas relações foi baseado na seguinte lógica: uma vez definidas as paragêneses associadas aos ambientes diagenéticos específicos e a “paleobatimetria” deposicional das associações de fácies, podem ser estabelecidas diferentes “velocidades relativas de variações do nível base”. Um exemplo simples é representado pela AF2 só com dissolução (letra A da figura 6.2) interpretada como associada a um nível “raso estável”, em que a berma estaria na maior parte do tempo posicionada na região vadosa. Já a AF2 com a paragênese dissolução e calcetônia corresponderia a um produto de uma “subida do nível gradual”, com a berma na posição vadosa e em seguida na zona de mistura, esta última correspondendo a maior parte do tempo de residência (B da figura 6.2.). Por fim, a AF2 sem dissolução, mas com sílica microcristalina e calcita *bladed* (C da figura 6.2.) seria produto de uma “subida do nível em uma velocidade mais rápida”, ou seja, a berma estaria em um tempo de residência maior no ambiente lacustre freático. A figura 6.2 exemplifica essas diferenças e a figura 6.3 mostra o dado de poço, com dois exemplos de AFs, uma rasa (AF2) e uma relativamente mais profunda (AF4), a paragênese diagenética descrita e a interpretação da velocidade relativa de variação do nível base.

Figura 6.2. Interpretação da velocidade relativa de variação do nível base a partir da associação de fácies deposicionais e paragenese diagenética. Lógica estabelecida para a AF2 (no retângulo).

Figura 6. 3. Interpretação da velocidade relativa de variação do nível base a partir da associação de fácies deposicionais (no exemplo associações de fácies carbonáticas mais rasa x mais profunda), e das sequências de superposição dos produtos diagenéticos (trilhas: AF- associação de fácies, vermelha – dissolução, laranja – calcedônia, roxa – cimentação *bladed*, azul- cimentação de sílica microcristalina).

Seguindo essa análise, foram criados perfis discretos de “velocidade relativa de variação do nível base” (quinta trilha da figura 6.3) associados à paragênese diagenética e AFs para todos os poços descritos, conforme figura 6.4. (oitava trilha da esquerda para a direita, legenda de cores da figura 6.3).

Figura 6.4. Perfis com resultados das análises semiquantitativas executadas nas lâminas delgadas – cada ponto preto representa uma lâmina descrita. Trilhas (da esquerda para direita) 1 – profundidade, 2 – raios *gama*, 3 – associação de fácies, 4 – dissolução, 5 – calcedônia, 6 – cimentação *bladed*, 7 – sílica microcristalina, 8 – velocidade relativa de variação do nível base (ver legenda de cores na figura 5.24) e 9 – perfis sônico em preto e total de cimento em % volumétrica em vermelho (estimada na descrição das lâminas delgadas).

6.2. Cálculo da curva de velocidade relativa de variação do nível base

Percebe-se, pela última trilha dos poços apresentados na figura 6.4, que a soma das porcentagens volumétricas dos cimentos descritos nas lâminas (linha vermelha) possui uma alta correspondência com o perfil sônico (linha preta). Dessa forma, levando em consideração a associação de fácies, o perfil de raios *gama* e o perfil sônico, foi possível criar uma curva de “eletrofácies” (sintética) para a velocidade relativa de variação do nível base, a partir do conceito que para uma mesma associação de fácies, variações dos valores do sônico e do *gama* refletem diretamente o tipo de produto diagenético, como explicado na figura 6.5. (dados do poço RJS-168). A figura mostra que para a AF2, o dado de sônico controla a diferenciação entre as subidas e o raso estável (porosidade maior nas rochas do raso estável). Existe uma tendência de rochas relacionadas a uma subida rápida conterem valores de raios *gama* maiores.

Figura 6.5. Velocidades relativas do nível base discretizadas na correlação sônico (DT) e raios *gama* (GR) e explicação pelas mudanças de porosidade relacionadas a dissolução e cimentação. Raso estável em azul, subida gradual verde claro e subida rápida em verde escuro.

Essa análise foi feita para todas as associações de fácies e para todos os poços descritos. (figura 6.6). O poço PM-03A não foi utilizado, por ser anômalo nos valores raios *gama* – ver figura 6.4:

Figura 6.6. Discretização utilizada para cálculo das velocidades relativas de variação do nível base e geração de uma curva sintética a partir das diferentes associações de fácies (“AFs”) e dos valores de *gama* (eixo y) e sônico (eixo x).

A figura 6.7. mostra o resultado obtido pelo cálculo dessa curva sintética (3ª trilha da esquerda para direita), que ficou bastante satisfatório quando comparado com o interpretado a partir do produto da diagênese (4ª trilha da esquerda para direita):

Figura 6.7. Comparação das curvas de variação do nível base interpretadas (4ª trilha da esquerda para direita - legenda de cores da fig. 6.3.) com as calculadas utilizando os valores de sônico e raios *gamma* para as diferentes associações de fácies. A 5ª trilha da esquerda para direita mostra a diagênese - em vermelho dissolução, laranja calcedônia e azul sílica microcristalina.

A partir desse método foi possível extrapolar essas “eletrofácies” para poços sem descrição de lâminas, porém com descrição de testemunhos, como apresentado na figura 6.8.

Figura 6.8. Exemplos de “eletrofácies” de velocidade relativa de variação do nível base calculadas para poços sem descrição de lâminas delgadas.

6.3. Método de predição 1D da paragênese diagenética

Procedendo de maneira inversa, ou seja, estimando a paragênese diagenética a partir da correlação entre a curva sintética de velocidade relativa de variação do nível base e as fácies sedimentares, (caminho contrário da figura 6.3), foi possível criar uma curva sintética de “produtos diagenéticos esperados”, ou seja, uma curva de predição da paragênese diagenética. Para tanto, foi dado um “grau” de ocorrência do produto diagenético de 0 a 3, levando então em consideração a associação de fácies (dado do testemunho) e a velocidade relativa de variação do nível base (dado sintético). Por exemplo, à AF2 associada a um nível base estável raso atribuiu-se um grau 3 para dissolução (probabilidade de ocorrência mais alta); à AF2 associada a uma subida gradual atribui-se um grau 3 para calcedônia; à AF2 com subida rápida atribui-se um grau 3 para sílica microcristalina (figura 6.9). O procedimento foi feito para as outras AFs seguindo a mesma lógica. A calcita tipo *bladed* não foi calculada, pois ocorre de maneira muito pontual e com baixa porcentagem, não alterando significativamente a permoporosidade primária.

Figura 6.9. Método de predição 1D da paragênese diagenética a partir da curva de velocidade relativa de variação do nível base e das AFs elaborado para poços sem descrição de lâminas delgadas.

Os resultados são apresentados como curvas sintéticas, mas nelas não se encontram as porcentagens volumétricas dos produtos diagenéticos e sim os graus descritos anteriormente, que seriam respectivos a maior probabilidade (3) ou menor (1) de sua ocorrência (graus preditivos). A figura 6.10. mostra exemplos das curvas calculadas (curvas pretas contínuas) para os 3 tipos de produtos diagenéticos principais (dissolução, calcedônia e sílica microcristalina) e a comparação com os dados semiquantitativos adquiridos na descrição das lâminas previamente descritas (curva preenchida).

Figura 6.10. Comparação entre as análises semiquantitativas das paragêneses diagenéticas principais e as curvas sintéticas (curvas pretas contínuas) geradas a partir da associação de fácies e o nível base interpretado.

A aplicação desse método para os poços sem lâminas descritas, mas com as curvas de variação do nível base geradas sinteticamente e os dados de testemunhos (figura 6.11) permitiu a predição da paragênese diagenética principal (sintética) para poços sem lâminas, conforme exemplificado em dois poços na figura 6.11. Essa predição foi avaliada com a descrição de 30 lâminas dos dois poços apresentados como exemplo – “teste cego” – detalhado a seguir.

Figura 6.11.Exemplo dos produtos diagenéticos previstos para os poços LI-07 e LI-03. Esses poços foram utilizados para comparação do resultado da paragênese diagenética calculado com a descrição de lâminas– “teste cego”.

Teste cego 1

Nota-se no intervalo do poço Li-07 que existem dois intervalos com grande proporção de AF3, um inferior (3ª trilha da esquerda para a direita), que segundo o resultado do cálculo da paragênese diagenética, apresentaria pouca dissolução e um predomínio de sílica microcristalina associada a uma subida do nível base (4ª trilha da esquerda para a direita), e um intervalo superior, onde predominaria dissolução e calcedônia, associadas a um nível bases raso estável com alguns rebaixamentos (figura 6.12). Após esta definição, foram descritas 16 lâminas desse poço (pontos pretos da figura), e a comparação dos resultados previstos com os constatados é apresentada na figura 6.12. O índice de acerto para a presença ou ausência de cada produto diagenético foi de 81% para a dissolução, 81% para calcedônia e 75% para sílica microcristalina.

Figura 6.12. Resultado do teste cego 1. Comparação dos dados de lâminas (6ª, 8ª e 10ª trilha da esquerda para a direita) - cada ponto representa a amostra descrita - com os dados calculados (5ª, 7ª e 9ª trilhas da esquerda para a direita) para as três paragêneses diagenéticas principais - poço Li-07.

Teste cego 2

Para o poço Li-03 foram descritas 14 lâminas delgadas, e os resultados deste “teste cego” são apresentados na figura 6.13. O índice de acerto da presença ou ausência de cada produto diagenético para esse poço foi de 78% para a dissolução, 71% para calcedônia e 64% para sílica microcristalina.

Figura 6.13. Resultado do teste cego 2. Comparação dos dados de lâminas (6ª, 8ª e 10ª trilha da esquerda para a direita) - cada ponto representa a amostra descrita - com os dados calculados (5ª, 7ª e 9ª trilhas da esquerda para a direita) para as três paragêneses diagenéticas principais - poço Li-03.

O fluxograma da figura 6.14. resume a sucessão de etapas do trabalho que culminou na predição de curvas dos três produtos principais da diagênese para poços com testemunhos, porém sem descrição e análise semiquantitativa da diagênese em lâminas delgadas (método de predição 1D da paragênese diagenética).

Figura 6.14. Fluxograma do método efetuado para a análise dos produtos diagenéticos, definição dos seus controles e predição da paragênese para poços sem amostras e/ou descrição de lâminas.

7 Correlações sedimentares, dos produtos diagenéticos e distribuição das fácies sedimentares e dos produtos diagenéticos em um *grid* 3D

7.1. Correlações sedimentares

As correlações sedimentares entre poços foram efetuadas com base na análise estratigráfica das sucessões verticais das associações de fácies sedimentares para os intervalos testemunhados. O objetivo foi identificar as superfícies estratigráficas de máxima regressão (SRM) e de máxima cheia (SMC – adaptada da SIM – superfície de inundação máxima do marinho, *sensu* Bento Freire, 2012) do sistema carbonático lacustre e então correlacioná-las aos poços adjacentes. A identificação dessas superfícies levou a definição de um ciclo de média frequência (com cerca de 20m de espessura), interpretado como de origem climática, definido então por duas superfícies de regressão máxima (SRM), uma inferior e outra superior. Entre as duas “SRMs” também foi reconhecido o momento de máxima cheia do lago, que seria o momento de intensa pluviosidade e consequentemente, maior aporte de siliciclásticos (Andrews, 2015), reflete muitas vezes em uma maior quantidade de rochas siliciclásticas ou de rochas carbonáticas profundas (p. ex. AF4).

A figura 7.1. apresenta a definição de um ciclo estratigráfico (de cerca de 20 m de espessura) do poço BD-04 e sua correlação com um poço adjacente (BD-11), 2 quilômetros distante. A sucessão das associações de fácies do exemplo apresentado na figura mostra que a máxima cheia (SMC) seria representada pelo maior empilhamento da AF6 e a máxima regressão (SRM) pelo maior empilhamento da AF2. Obviamente esta não é uma regra, e depende da posição paleogeográfica do poço em questão. O que deve ser analisada é a sucessão das associações de fácies. A correlação desse ciclo estratigráfico para o poço adjacente do exemplo da figura 7.1 mostra bem isso. Nota-se que a superfície de máxima regressão superior neste poço foi marcada sobre a AF3, uma vez que a associação de fácies sobreposta é AF7.

Figura 7 1. Definição do ciclo estratigráfico e correlação com poço adjacente.

Uma vez definidas as superfícies estratigráficas de média frequência correlacionáveis nos poços testemunhados, as assinaturas em perfis petrofísicos (raios *gama* - principal, sônico e resistividade) dessas superfícies foram identificadas e então extrapoladas para os intervalos não testemunhados. Assim, foram definidos 7 ciclos estratigráficos de média frequência (figura 7.2). Apesar dessa possibilidade de correlação entre intervalos de poços sem testemunho utilizando os perfis petrofísicos, a distribuição das fácies, e conseqüentemente, dos produtos diagenéticos em um modelo 3D foi feita para os poços com testemunhos pertencentes a um mesmo intervalo de ciclo estratigráfico (figura 7.3). Os poços que cumpriram essa exigência e entraram como dado *hard* no modelo 3D foram BD-04, BD-11, BD08, RJS-15C, RJS-168 e RJS-279; e o ciclo de média frequência associado a eles foi o “ciclo 4” (representado por uma afogamento basal, seguido de um raseamento – figura 7.3.). Dessa forma, a área do modelo 3D restringiu-se aos campos de Badejo, Trilha e Linguado.

Figura 7 2.Ciclos estratigráficos de média frequência para o intervalo da Cozinha Inferior.

Figura 7 3. Intervalo modelado no 3D – “Ciclo 4” escolhido por conter o maior numero de testemunhos (3ª trilha da esquerda para a direita) associados a um mesmo ciclo.

7.2. Correlações dos produtos diagenéticos

Para efetuar as correlações dos produtos diagenéticos, foi utilizado o perfil de velocidade relativa de variação do nível base calculado a partir das fácies sedimentares e das curvas de raios *gama* e sônico, conforme descrito no capítulo 6. Porém, sua correlação não é simples, pois para um mesmo momento, a depender da sua posição paleogeográfica, um poço pode estar em uma situação de nível base estável, enquanto que o poço adjacente no fundo estável, outro poço em subida gradual outro em subida rápida etc. Por esse motivo, a correlação lateral e análise da sucessão vertical dessa “fácies” é dificultada. Assim, foi feita uma manipulação dos dados desta curva da seguinte maneira:

- 1) Re-amostragem da curva em 20 e 20 cm. A re-amostragem em espaçamentos iguais considera uma premissa de que a taxa de acumulação sedimentar é constante;
- 2) Amplificação dos dados discretos para números com sentido lógico de fundo *versus* raso, subida *versus* queda, assim foram atribuídos os seguintes valores ao perfil discreto: fundo estável = 10, subida rápida = 8, subida gradual = 6, queda gradual=4, queda rápida = 2, raso estável = 5;
- 3) Cálculo da média aritmética da curva.
- 4) Criação de uma curva de soma do desvio da média. Assim, se a média = 5 e o valor numérico for 8, o primeiro ponto seria +3 o segundo +6, o terceiro +9 e assim por diante. Isso representaria uma subida do nível naquele ponto, e de forma contrária, se a média for 5 e o valor numérico da curva for 2, o primeiro ponto seria -3 o segundo -6, o terceiro -9 etc.

A partir dessa manipulação foi possível identificar eventos de quebras de tendência correlatos em diferentes posições geográficas. Além disso, eventos de alta frequência acabam sendo atenuados no *trend* geral da curva, devido aos desvios ser sempre somados. A figura 7.4 demonstra o procedimento de manipulação utilizado (A) e o reflexo do resultado da curva para dois poços analisados em um mesmo ciclo estratigráfico (B). Notar que em um a curva mostra a queda iniciando na subida gradual (BD-08) e outro no raso estável (BD-04).

7.3. Distribuição das associações de fácies sedimentares e dos produtos diagenéticos em um *grid* 3D

O objetivo principal deste trabalho foi entender os controles da diagênese e estabelecer um método predição e também de distribuição espacial dos produtos diagenéticos, e consequentemente, prever as regiões mais prováveis de alterações permoporosas secundárias geradas no reservatório (cimentação por sílica, por calcedônia e dissolução).

Assim, foi construído um *grid* 3D do intervalo “ciclo 4” descrito anteriormente. Inicialmente foi gerada uma superfície com todos os marcadores de topo e base do “ciclo 4” marcados em todos os poços. O *grid* possui células de 50m nos eixos horizontais e cerca de 1m no eixo vertical em um total de células de 7.624.320 e 80 *layers*. A área modelada, de 170 km² é apresentada na figura 7.6.

O que se buscou foi transformar a predição dos produtos diagenéticos resolvida previamente, do 1D (poço) para o 3D (modelo). Como as curvas geradas no 1D foram calculadas a partir das associações de fácies sedimentares (dados de testemunhos) e das curvas de velocidade relativa de variação do nível base (método criado neste trabalho), para a predição dos produtos diagenéticos em um modelo 3D, esses mesmos dados de entrada também foram necessários.

Desta forma, os dados sísmicos utilizados como tendência para a criação de um modelo de fácies e de velocidade relativa de variação do nível base (para a modelagem, a curva de velocidade relativa de variação do nível base também foi tratada como uma curva de fácies) foram - figura 7.6:

- (A) isópaca do mapeamento sísmico das superfícies base e topo da Coquina Inferior;
- (B) mapa de declividade gerado a partir da isópaca sísmica;
- (C) mapa de declividade gerado a partir da isópaca sísmica cortado pelas isópacas menos espessas (menores que 60m). Esse mapa foi criado para filtrar isópacas espessas com declividades altas.

Figura 7 6. Insumos sísmicos usados na modelagem 3D.

7.3.1. Distribuição das associações de fácies sedimentares

O intervalo modelado foi o intervalo do “ciclo 4” (figura 7.5). Esse ciclo tem um hemicíclo inferior de afogamento até a SMC4 e um hemicíclo superior regressivo até a SRM5. Para a modelagem das associações de fácies sedimentares (AFs), inicialmente foram estabelecidas as correlações entre a proporção de determinada AF (no ciclo 4) e os valores encontrados nos mapas de insumos sísmicos no local do poço. Essa técnica visa achar a correlação com o melhor coeficiente de correlação e assim utiliza a equação da reta encontrada para regredir os mapas sísmicos e transformá-los em mapas de proporção fácies.

As correlações entre as proporções de AFs (eixo y) e os mapas sísmicos (eixo X) e as retas utilizadas para as três AFs de coquinas (AF2, AF3 e AF4) são mostradas na figura 7.7.

Figura 7 7. Correlações entre as associações de fácies e os mapas sísmicos.

A figura mostra uma correlação negativa entre a isópaca e a AF2, ou seja, maior proporção de AF2 em poços de regiões menos espessas (regiões mais rasas). Em contrapartida, essa correlação é positiva com a AF4 (maior proporção em poços de regiões mais espessas, ou seja, mais profundas). Já a relação entre a AF3 e o mapa de declividade cortado pela isópaca foi positiva, pois como se tratam de fácies depositadas no ambiente de *shoreface*, as posições rasas (isópacas menos espessas) e relativamente mais inclinadas no perfil de praia (alta declividade) teriam maiores proporções dessas fácies. Depois de regredidos, esses mapas foram usados como insumos da simulação de fácies 3D entrando como tendências de probabilidade. O algoritmo de simulação de fácies utilizado foi o da gaussiana truncada do software petrel ®.

O algoritmo da gaussiana truncada consegue representar a transição sucessiva de uma determinada fácies para outra. Desenvolvido pelo *Institut Français du Pétrole* (IFP) esse algoritmo simula as fácies diretamente usando o conjunto de cortes com divisões no campo gaussiano. Esse algoritmo pode ser resumido em 6 etapas principais (Simon, 1997): (i) cálculo da proporção de fácies em determinado *layer* do modelo geocelular (dado estimado a partir dos dados poços que interceptam um determinado *layer*); (ii) construção da curva de frequência acumulada das proporções globais das fácies (iii) determinação dos truncamentos globais a partir da distribuição gaussiana padronizada cujos valores correspondem as proporções de fácies; (iv) transformação das fácies em um conjunto contínuo com distribuição gaussiana; (v) simulação condicional das variáveis contínuas e (vi) retorno às fácies.

A figura 7.8 mostra o resultado dessa simulação para as AFs em um *layer* específico do modelo 3D e a figura 7.9 mostra a coerência entre o resultado da simulação e o modelo conceitual de distribuição lateral de fácies (ver figura 4.10).

Figura 7 8. Exemplo de *layer* do resultado da simulação de fácies 3D.

Figura 7 9. Coerência entre o resultado da simulação e o modelo conceitual de distribuição lateral de fácies – ver figura 4.10.

7.3.2. Distribuição das velocidades relativas de variação do nível base

Assim como feito para as AFs, para a distribuição 3D da curva de velocidade relativa de variação do nível base foram estabelecidas inicialmente as correlações entre a proporção de determinada velocidade relativa de variação (tratada também como uma “fácies”) e os valores encontrados nos mapas de insumos sísmicos (isópaca e declividade) no local do poço. Assim, a equação da reta encontrada em cada uma das correlações foi utilizada para regredir os mapas sísmicos e transformá-los em mapas de proporção dessas “fácies”.

Para esta análise, o “ciclo 4” foi subdividido em raseamento e afogamento e as correlações encontradas são apresentadas nas figuras 7.10 e 7.11.

Figura 7 10. Correlações entre as proporções das “fácies” de velocidade relativa de variação do nível base e os insumos sísmicos para o hem ciclo de raseamento.

A figura 7.10. mostra uma correlação negativa entre a isópaca e o raso estável, ou seja, maior proporção de raso estável em poços de regiões menos espessas (regiões mais rasas). Já as correlações com a declividade e as subidas e quedas foram positivas para subidas e quedas rápidas (quanto maior a declividade maior a proporção de quedas e subidas rápidas encontradas no poço) e negativas para as subidas e quedas graduais foi positiva (quanto menor a declividade maior a proporção de quedas e subidas graduais encontradas no poço). Essa relação inversa entre o rápido e gradual faz muito sentido, uma

vez que para admitindo-se uma mesma velocidade de variação do nível base (seja ele caindo ou subindo), para uma menor declividade é necessária uma distância maior para se percorrer uma mesma diferença de altura de variação do nível do lago (ver 7.12). Assim, o que controla essas diferenças relativas de velocidade de variação do nível base nesse caso provavelmente são apenas as diferenças paleotopográficas.

Figura 7 11. Correlações entre as proporções das “fácies” de velocidade relativa de variação do nível base e os insumos sísmicos para o hemicíclo de afogamento.

A figura 7.11. mostra uma correlação negativa entre a isópaca e o raso estável, ou seja, maior proporção de raso estável em poços de regiões menos espessas (regiões mais rasas). Em contrapartida, essa correlação é positiva com o fundo estável (maior proporção em poços de regiões mais espessas, ou seja, mais profundas). Já no caso das subidas, a relação de inversão que aparece no raseamento não aparece no afogamento, o que pode ser explicado pela subida do nível até declividades baixas e assim, as variações captadas pelos produtos diagenéticos seriam mais relacionadas às diferenças de velocidade de variação do nível base propriamente dito do que controladas pela paleotopografia (figura 7.12.).

Figura 7 12. Diferenças entre as distâncias percorridas para se atingir uma mesma variação do nível do lago conforme a declividade. Em A para o hemisférico de raseamento e em B para o hemisférico de afogamento.

O algoritmo utilizado na simulação dessa propriedade também foi o da gaussiana truncada do software petrel®. Os resultados da simulação em uma determinada *layer* para o afogamento e para o raseamento são apresentados na figura 7.13.

Figura 7 13. Exemplo de *layer* do resultado da simulação das “fácies” 3D de velocidade relativa de variação do nível base para afogamento e raseamento.

7.3.3. Distribuição da paragênese diagenética em um modelo 3D

Com a geração dos dois insumos 3D, o cubo de distribuição das associações de fácies sedimentares e o cubo de velocidade relativa de variação do nível base, foi possível utilizar a mesma lógica de criação das curvas 1D de dissolução, calcedônia e sílica microcristalina. Assim como no poço, foram determinados graus de maior probabilidade de ocorrência de determinado produto diagenético fazendo o “caminho inverso” da figura 6.3, conforme mostra a figura 7.14, que exemplifica os graus de probabilidade de ocorrência dos produtos para a AF2 em um modelo 3D.

Figura 7 14. Método de predição 3D da paragênese diagenética a partir da curva de velocidade relativa de variação do nível base e das AFs calculadas para poços sem descrição de lâminas delgadas.

Dessa forma, foram criados 3 modelos 3D de “graus de probabilidade de ocorrências” dos produtos diagenéticos, um de dissolução, um de calcedônia e outro de sílica. As figuras 7.15 a 7.17 mostra os respectivos mapas médios dos resultados calculados no modelo 3D para cada um desses produtos e os poços que entraram como dado *hard* na modelagem. A figura 7.18 mostra o as regiões de predomínio de cada um desses produtos (dissolução em vermelho, calcedônia em laranja e sílica microcristalina em azul).

Figura 7 15. Mapa médio obtido para a cimentação de sílica microcristalina.

Figura 7 16. Mapa médio obtido para a cimentação de calcedônia

Dissolução

Figura 7 17. Mapa médio obtido para a dissolução

Figura 7 18. Regiões de predomínio de cada um dos produtos diagenéticos (dissolução em vermelho, calcedônia em laranja e sílica microcristalina em azul).

A análise dos resultados dos mapas dos produtos diagenéticos e os dados de produção acumulada de óleo (Np) de todos os poços que produziram no intervalo da Coquina Inferior dos campos de Badejo, Linguado e Trilha demonstra que a correlação negativa entre a sílica total estimada em grau no modelo 3D possui maior coeficiente de correlação que a correlação positiva entre a mesma produção acumulada e a dissolução estimada também em grau, conforme apresentado na figura 7.19.

Embora existam outros fatores intrínsecos à melhor ou pior produtividade do poço, (completação, intervalo canhoneado, danificação do sistema de elevação e escoamento etc) em linhas gerais, é o dado mais direto que se tem sobre as características do fluxo do reservatório (vinculados ao sistema permoporoso). Considerando hipoteticamente que os poços encontravam-se na mesma situação de condicionamento, o fato dessas correlações terem essas características pode ser atribuído a dois fatores: (i) a presença/ausência de sílica é o fator mais importante no controle da produtividade do poço (ii) a dissolução possui uma correlação positiva com o Np, porém, como o coeficiente de correlação não é alto, os poços que mais produziram podem ter uma contribuição também atribuída a uma melhor permoporosidade primária (deposicional).

Figura 7 19.Correlações entre os graus ocorrência de sílica total e dissolução estimadas pelo método de predição 3D e a produção acumulada dos poços de Badejo, Linguado e Trilha. Dos 24 poços apresentados nos gráficos, apenas 5 entraram como dado *hard* no modelo 3D.

Dessa forma, a partir dos modelos 3Ds de fácies e de produtos diagenéticos foi criado um mapa (figura 7.20.) em que se destacam as regiões com presença das AF2 e/ou

AF3 e com sílica total menor que grau 1. Esse resultado é apresentado em mapa com a produção acumulada (relativas - em bolhas) dos poços produtores dos campos de Badejo, Linguado e Trilha. Notar que os poços que mais produziram caíram na zona onde há o predomínio das AFs 2 e 3, pouca silicificação e também dentro da zona de dissolução (linha em preto). Nota-se que a maior produção ocorre na concessão de Linguado (a sul) em regiões onde há menos sílica total estimada, mas com a presença de dissolução e maior concentração das AF2 e AF3. Ressalta-se que muitos dos poços produtores (poços sem a identificação) não entraram como dado de entrada (dado *hard*) na geração dos modelos preditivos 3D (4 poços como dado de entrada e 19 poços incorporados no modelo preditivo).

Figura 7 20. Mapa das regiões com a presença de AF2 e AF3 e sílica menor que grau 1. O mapa apresenta a produção final dos poços (bolhas em preto) e o contorno das zonas com dissolução (linha de contorno preta). Notar que muitos dos poços (sem a identificação) não entraram como dado de entrada na geração dos modelos preditivos 3D.

8 Conclusões

A descrição semiquantitativa sistemática da paragênese diagenética se mostrou uma ferramenta eficaz para o entendimento dos controles da diagênese. A análise desses dados como um perfil de poço facilitou sua associação com os ciclos sedimentares e, consequentemente, o entendimento da ciclicidade dos eventos diagenéticos.

Constatou-se que existe um forte controle do (s) tipo(s) de produto(s) diagenético(s) com a variação do nível base do lago, como interpretado com base nas associações de fácies. Os cimentos de sílica microcristalina (quartzo) e de calcita tipo *bladed* ocorrem preferencialmente quando o nível base está alto e as rochas sob condições lacustre freáticas. Essa característica pode ser explicada pelo fato de que nesse momento, devido ao grande escoamento superficial, o lago encontra-se enriquecido em Si e Mg (proveniente do intemperismo e lixiviação das seções de rochas anteriores), porém ainda diluído (com um volume de água muito amplo), favorecendo a precipitação do quartzo (e não da calcedônia) e da calcita *bladed*, magnesiânica. A partir do momento em que o nível do lago começa a cair, a concentração de Si aumenta relativamente, a calcedônia passa a ser o cimento principal, e as condições predominantes provavelmente estariam relacionadas à zona de mistura, pois o nível estaria mais baixo, porém ainda não totalmente em condições de domínio meteórico. Ressalta-se que é comum a calcedônia ocorrer junto com dissolução, ou com vestígios de dissolução pretérita. Seguindo com o rebaixamento do nível do lago, quando as rochas passam para a zona de domínio meteórico ocorre a precipitação de calcita blocosa (provavelmente necessitando de um tempo de residência baixo) no meteórico freático, e dissolução no meteórico vadoso. Quando o nível do lago volta a subir, as condições do início da subida favoreceriam novamente a precipitação de calcedônia, e, em um nível mais alto, de sílica microcristalina, iniciando assim um novo ciclo de alterações diagenéticas.

A correlação da paleobatimetria deposicional da associação de fácies sedimentar com o nível base requerido para determinado(s) tipo(s) de produto(s) diagenético(s) encontrado(s) levou à criação de uma curva de “velocidade relativa de variação do nível base”. Desta forma, uma associação de fácies depositada em um nível do lago raso, por vezes emerso, com uma paragênese diagenética de nível base alto é interpretada como sendo produto de uma subida rápida do nível base. De forma inversa, se uma associação de fácies depositada em uma batimetria mais funda possuir um paragênese diagenética rasa, interpreta-se que houve uma queda brusca do nível do lago. Esse mesmo raciocínio foi utilizado para interpretar a “velocidade relativa de variação do nível base” das diversas

associações de fácies com as respectivas diversas paragêneses diagenéticas. As velocidades relativas de variação do nível base interpretadas foram seis: raso estável, fundo estável, queda rápida, subida rápida, queda gradual e subida gradual.

A curva de “velocidade relativa de variação do nível base” possui uma boa correlação com os perfis de raio gama e sônico, portanto, foi possível discretizar os valores de raios *gama* e sônico para cada tipo de velocidade relativa de variação do nível base associado a uma determinada associação de fácies. Essa discretização permitiu a criação de uma curva de velocidade relativa de variação do nível base sintética, a partir da associação de fácies (dados de testemunho) e dos valores cruzados de raios *gama* e sônico.

Assim, após a criação dessa curva sintética de velocidade relativa de variação do nível base, foi possível fazer o “caminho inverso”, ou seja, prever o tipo de produto diagenético para determinada associação de fácies que está sob determinada velocidade relativa de variação do nível base. Devido à dificuldade de estimar a porcentagem volumétrica de cada produto diagenético foi dado um grau, de zero a três, de “probabilidade de ocorrência”, sendo zero, nula e três a mais alta. Desta forma, se a associação de fácies é interpretada como depositada em um nível do lago raso, ou até emerso, e o cálculo da curva velocidade relativa de variação do nível base resultou que essa associação estaria em uma subida rápida, a probabilidade de ocorrer dissolução seria nula (0), de calcedônia baixa (1) e de sílica microcristalina alta (3).

Após a predição 1D (no poço) foram estabelecidas correlações entre os dados de poços (associações de fácies e velocidade relativa de variação do nível base) e os mapas sísmicos de isópaca (Coquina Inferior) e de declividade para a construção de um modelo 3D de associação de fácies sedimentar e também um modelo 3D de velocidade relativa de variação do nível base, usando para tanto a simulação gaussiana truncada do petrel®. Com esses dois modelos 3Ds foi possível então usar o mesmo raciocínio usado no 1D e construir modelos preditivos 3D, para sílica microcristalina, calcedônia e dissolução.

A análise em mapa desse resultado e da produção de óleo acumulada dos poços mostra que mais importante para a produção são as regiões de predomínio de fácies com permoporosidades primárias boas (AF2 e AF3), mas sem sílica (quartzo e/ou calcedônia) do que fácies com permoporosidades primárias boas dissolvidas, ou seja, a cimentação de sílica tem um papel mais importante na penalização da produção de óleo do que a dissolução na sua melhora.

A análise sistemática dos produtos diagenéticos permitiu a proposição de um método de predição da diagênese nas escalas de poço e de modelo geocelular. O método aqui proposto apresentou excelente previsibilidade nessas duas escalas, tanto para predizer as paragêneses diagenéticas quanto para prever a produtividade dos poços produtores do intervalo estratigráfico estudado. Esse estudo e o método de predição aqui proposto tem grande potencial de aplicação em outras áreas, não só em reservatórios de coquinas, mas também em outras rochas carbonáticas com eodiagênese expressiva relacionada a variações do nível de base.

9 Referências Bibliográficas

- ABRAHÃO, D., WARME, J.E. 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, Pages 287 - 305 (1990).
- ANDREWS S.D. AND HARTLEY. A.J. (2015) The response of lake margin sedimentary systems to climatically driven lake level fluctuations: Middle Devonian, Orcadian Basin, Scotland. **Sedimentology** Volume 62, Issue 6, pages 1693–1716, October 2015
- ARAI, M. Paleogeografia do Atlântico Sul no Aptiano: um novo modelo a partir de dados micropaleontológicos recentes. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 17, n. 2, p. 331-351, 2009.
- AZEVEDO, R. L. M. Paleoceanografia e a evolução do Atlântico Sul no Albiano. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 231-249, 2004
- BARROS, M. C. 1980, Geologia e Recursos Petrolíferos da Bacia de Campos. **Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia**, vol. 1, p. 254-265.
- BAUMGARTEN, C. S. Evolução estrutural de Pampo, Badejo, e Linguado durante a deposição da Formação Lagoa Feia. In: **Boletim Técnico da Petrobrás**, v. 28, n. 2, p. 91-101, 1985.
- BENTO FREIRE, E. 2012. **Caracterização estratigráfica em alta resolução das sequências calcárias de origem microbiana do intervalo paleocênico da Formação Yacoraite (Sequência Balbuena IV) na região de Salta – Argentina**. Rio de Janeiro, Ano. 2012. Mestrado em Geologia – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Ano 2012.
- BERTANI, R. T. & CAROZZI, A. V. Microfacies, Depositional Models and Diagenesis of Lagoa Feia Formation (Lower Cretaceous), Campos Basin, Offshore Brazil. **Ciência Técnica Petróleo**. Seção Exploração de Petróleo nº 14. 1984, 104p.
- BRUHN, C.H.L., GOMES, J.A.T., LUCCHESI, C.D., JOHANN, P.R.S. Campos Basin: Reservoir Characterization and Management – Historical Overview and Future Challenges. OTC 15220. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2003. 14p.
- BIZOTTO, A. C. 2014. **Coquinas eopaptianas do sudoeste da Bacia de Campos: fácies deposicionais, eventos diagenéticos e fatores controladores da qualidade do reservatório**. Dissertação de mestrado. UNESP, 2014.
- CARVALHO, M. D.; MONTEIRO, M.; PIMENTEL, A. M.; REHIM, H. A. 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, p. 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**, CENPES-1.940, 110 p.

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER A. A. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. **Tectonophysics**, 213 (1992) 97-138.

CHOQUETTE, P.W., PRAY, L.C. 1970. Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin** V. 54, No. 2, P. 207-250.

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. (Coords.) 1990. **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, PETROBRAS, p.333-360.

DIAS, J. L. Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 7-25, nov. 2004/maio 2005.

DIAS-BRITO, D. 1982. Evolução paleoecológica da Bacia de Campos durante a deposição dos calcilutitos, margas e folhelhos da Formação Macaé (Albiano e Cenomaniano?). **Boletim técnico da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 84-97.

DIAS-BRITO, D. 1987. A Bacia de Campos no Mesocretáceo: uma contribuição à paleoceanografia do Atlântico Sul primitivo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, n. 2, p. 162-167, 1987.

DIAS-BRITO, D. 1995. **Calcisferas e microfácies em rochas carbonáticas pelágicas mesocretáceas**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 688 p. Tese de Doutorado.

DIAS-BRITO, D. Global stratigraphy, palaeobiogeography and palaeoecology of Albian-Maastrichtian pithonellid calcispheres: impact on Tethys configuration. **Cretaceous Research**, v.21,p. 315-349, 2000.

DIAS-BRITO, D.; FERRÉ, B. Roveacrinids (stemless crinoids) in the Albian carbonates of the offshore Santos Basin, southeastern Brazil: stratigraphic, palaeobiogeographic and palaeoceanographic significance. **Journal of South American Earth South Atlantic**, v. 14, p. 203-218, 2001.

DUNHAM, R.J. 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. p.108-122.

EMBRY, A. F.; KLOVAN, J. E. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Islands, Northwest Territories. **Bulletin of Canadian Petroleum Geology**, v.19, p. 730-781, 1971.

FLÜGEL, E. **Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application.** Springer-Verlag. p.984. 2004.

FOLK, R. L., 1965, Some aspects of recrystallization in ancient limestones, in L. C. Pray, and R. S. Murray, eds., Dolomitization and Limestone Diagenesis: Tulsa, OK, SEPM Special Publication No. 13, p. 14-48.

GUARDADO, L. R., SPADINI, A. R., BRANDÃO, J. S. L, AND MELLO, M. R. 2000, Petroleum System of the Campos Basin, In: M. R. Mello and B. J. Katz, eds., Petroleum systems of South Atlantic margins: American Association of Petroleum Geologists Memoir 73, p. 317-324

HEANEY, P.J. 1993 A proposed mechanism for the growth of chalcedony. **Contributions to Mineralogy and Petrology** (1993) Vol 115: p.66-74

LONGMAN, M. W. 1980. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin.** v. 64, n.4, p. 461-487.

MAHRAN, T.M., 1999. Late Oligocene lacustrine deposition of the Sodmin Formation, Abu Hammad Basin, Red Sea, Egypt; sedimentology and factors controlling palustrine carbonates. **Journal of African Earth Sciences** 29, 567-592

MEISLING, K. WHEELER, H. E.; COBBOLD, P. R.; MOUNT, V. S. 2001, Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil, 1959. Unconformity bounded units in stratigraphy. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, vol. 85, nº. 11, p. 1903-1924.

MELLO, M. R. & HESSEL, M. H. 1998, Biological marker and paleozoological characterization of the early marine incursion in the lacustrine sequences of the Campos Basin, Brazil (abs.): Extended Abstracts Volume, **AAPG Annual Convention**, Salt Lake City, Utah, v. 2, A455.

MIALL, A. D. 2000. Principles of sedimentary basin analysis. Springer-Verlag, New-York, 2000, 616.

MIZUSAKI, A. M. P. **Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos – caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos. Dissertação de Mestrado.** UFRJ, 104 p., 1986.

MOURA, J.A. & PRAÇA, U.M. Ostracodes das seqüências não-marinhas e transicionais mesozóicas (andares Jiquiá e Alagoas), Bacia de Campos. **Coletânea de Trabalhos Paleontológicos** 27 (2): 401-408, Brasília, 1985.

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. Anais ..., p. 717-731.

PETERSON, M.N.A., VON DER BORCH, C.C., 1965. Chert: modern norganic deposition in a carbonate-precipitating locality. **Science** 14, 1501-1503.

PICARD, M.D. 1971. Classification of fine-grained sedimentar rocks. **Journal of**

Sedimentary Petrology, 41, 179-195.

PRAÇA, U. M. 1996. Calcários de águas rasas e calcários palustres da sequência das Coquinas, Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 39, Salvador. Anais, p.319-321.

RANGEL, H.D.; MARTINS, F.A.L.; ESTEVES, F.R.; FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia de Campos, **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, p. 203-218.

RANGEL, H. D. & CARMINATTI, M. 2000. Rift lake stratigraphy of the Lagoa Feia Formation, Campos Basin, Brazil, in E.H. Gierlowski-Kordesch and K.R. Kelts, eds., **Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology**, 46, p. 225-244.

READING, H. G. 1986. Facies. In: Reading, H. G. (ed.) **Sedimentary Environments and Facies**, Blackwell, 1986, 4-19

READING, H. G. 1996. **Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy**. 1996, 688p. Blackwell Publishing.

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. Anais... 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. Anais ..., v. 3, p. 247-258.

SCHALLER, H.; TERRA, G.S; SOUZA-CRUZ, C.E.; SPADINI, A.R. 1981. **Estudo Preliminar dos Reservatórios da Formação Lagoa Feia - Área de Badejo-Pampo, Bacia de Campos: PETROBRAS/CENPES/LABOR, Relatório Interno DEPEX-2.825**. 17 p.

SCHOLLE, P. A. & ULMER-SCHOLLE, D. A. A color guide to petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis. Tulsa. **American Association of Petroleum Geologists**, Memoir 77, 2003, 474p.

SILVA-TELLES, JR., A.C.; HENZ, G.I.; ARAI, M. 1994. Evidências das primeiras ingressões marinhas na fase rift da margem leste brasileira. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**. Rio de Janeiro, v.8 (2/4): 409-410, abr./dez. 1994.

SILVA-TELLES JR., A. C. **Estratigrafia de seqüências de alta resolução do Membro Coqueiros da Formação Lagoa Feia (Barremiano?/Aptiano da Bacia de Campos - Brasil)**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. 268 f., 2v. Dissertação de Mestrado.

SIMON, V.H. 1997. **Simulação plurigaussiana truncada com condicionamento**. Dissertação de Mestrado. Unicamp. Campinas – São Paulo; Dezembro de 1997.

SPADINI, A.R. 1981. **The Macaé fine-grained limestones: their potential for oil production**. Rio de Janeiro, PETROBRAS. (Relatório interno).

SPADINI, A.R.; ESTEVES, F.R.; DIAS-BRITO, D.; AZEVEDO, R.L.M.; RODRIGUES, R. The Macaé Formation, Campos Basin, Brazil: Its evolution in the context of the initial history of the South Atlantic. **Revista Brasileira de Geociências**, 18 (3): 261-272, setembro de 1988.

TAKAKI, T., & RODRIGUES, R 1984. Isótopos estáveis de carbono e oxigênio dos calcários como indicadores paleoambientais – Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo. XXXIII **Congresso Brasileiro de Geologia**. 10 – 4750-4762.

TERRA, G.J.S. et al. Classificação de rochas carbonáticas aplicáveis as bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v.18, n.1, p.9-29, 2010.

TUCKER, M. E. **Sedimentary Petrology – An introduction to the origin of sedimentary rocks**. 3 ed. Blackwell, 252 p. 1992.

TUCKER, M. E. & WRIGHT, V. P. 2009, **Carbonate Sedimentology**. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 482 p.

WALKER, R. G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker, R. G. & James, N. P. (eds.) **Facies Models and Response to Sea-level Change**, Geological Association of Canada, 1992, 1-14.

WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**, Chicago, v.30, n.5, p.377-392, 1922.

WHITAKER, .H.McD., 1973, "Gutter Casts", a new name for scour and fill structures: with examples from the Llandoveryian of ringe fike and Malmoya, Southern Norway: **Norsk Geiologisk Tidsskrift**, v. 53,pp. 403 to 417

WINTER, R.W.; JAHNERT, R.J.; FRANÇA, A.B. maio/novembro 2007. Bacia de Campos. In: MILANI, E. J. (Editor coordenador) **Boletim de Geociências da Petrobras** – v. 15, n. 2 – maio/novembro 2007, Rio de Janeiro, p. 511-529.

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