

Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira

Tectonic, stratigraphy and sedimentation during the Aptian along the Brazilian eastern margin

Jeferson Luiz Dias

resumo

Os principais aspectos tectônicos, estratigráficos e sedimentológicos do Andar Aptiano na margem leste do Brasil foram analisados a partir de dados de 28 poços perfurados pela Petrobras, incluindo a descrição de 750 m de testemunhos.

O Andar Aptiano nas bacias estudadas (de Santos a Camamu-Almada) pode ser subdividido em dois pacotes com características tectono-sedimentares distintas.

O Andar Aptiano Inferior (porção terminal do Andar Jiquiá e Andar Alagoas Inferior) é caracterizado por uma sedimentação predominantemente continental, com incursões marinhas que ocorreram durante o final da fase rifte. Neste período, houve um deslocamento da deformação crustal para as porções axiais do rifte, ocasionando uma exposição subaérea de extensas áreas proximais (discordância pré-Aptiano Superior).

O Andar Aptiano Superior (genericamente correspondente ao Andar Alagoas Superior) é caracterizado por uma sedimentação marinha que ocorreu em ambiente de quiescência tectônica com falhamentos localizados. Neste período, a sedimentação continental foi predominante apenas nas porções proximais das bacias marginais. Nas porções mais distais os sedimentos foram depositados num ambiente marinho raso de um mar epicontinental.

No final do Aptiano, um período de aridez associado à barreira representada pela Dorsal de São Paulo e pelo Alto de Florianópolis resultou na deposição de espesso pacote evaporítico (“Evento Ibura”). Os evaporitos, com espessuras de até 2 000 m no Platô de São Paulo, correspondem a um evento cuja duração foi estimada em cerca de 600.000 anos.

(originais recebidos em 06.04.2005)

Palavras-chave: Aptiano | Alagoas | seqüência transicional | Atlântico Sul

abstract

The main tectonic, stratigraphic and sedimentological aspects of the Aptian Stage along the Brazilian Eastern Basins were analyzed based on data from 28 wells drilled by Petrobras, including the description of 750 meters of cores.

The Aptian along the Eastern Margin (from Santos to Camamu-Almada basins) can be subdivided into 2 main packages with specific tectonic and sedimentological characteristics. The Lower Aptian (upper part of Jiquiá to lower part of Alagoas local stages) is characterized by continental sedimentation under rift tectonics. Scarce marine incursions were recognized in this package. Sedimentation occurred mainly in grabens located in the central portions of the rift and in scattered grabens located in proximal areas. This caused subaerial exposure of large proximal areas generating a regional unconformity called "pre-Upper Aptian Unconformity".

The Upper Aptian (Upper Alagoas local stage) package was deposited under stable tectonic conditions in a sag basin. The lower portion of this unit is characterized by a fluvio-alluvial sedimentation with a widespread occurrence throughout the proximal areas of all marginal basins. Distal sediments however were deposited under shallow marine conditions.

At the end of the Aptian a strong period of aridity and the presence of a volcanic barrier, the São Paulo High, allowed the deposition of a very thick evaporitic package ("Ibura Event"). These evaporites are estimated to be deposited in about 600,000 years.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: Aptian | Alagoas | sag | South Atlantic

introdução

Rochas pertencentes ao Andar Aptiano podem ser encontradas em todas as bacias marginais brasileiras bem como em algumas regiões intracontinentais. No Brasil, este andar costuma ser genericamente relacionado ao Andar (local) Alagoas. Nas bacias da margem leste, o Andar Alagoas costuma ser posicionado no pacote de rochas entre a chamada "discordância pré-Alagoas" e o topo do pacote evaporítico "Ibura". Genericamente, corresponde à Seqüência do Golfo, como definida

por Asmus e Porto (1980) e informalmente conhecida como Seqüência Transicional.

Com o objetivo de se reconstituírem as condições tectono-sedimentares vigentes durante o Aptiano na margem leste do Brasil foi escolhida a área situada entre as cidades de Florianópolis e Salvador. Como são raros os afloramentos de rochas desta idade neste segmento da costa, foram utilizados na análise dados de 28 poços perfurados pela Petrobras, localizados nas bacias de Santos, Campos, Espírito Santo e Camamu-Almada (fig.1). A análise dos dados destes poços incluiu a descrição de 750 m de testemunhos.

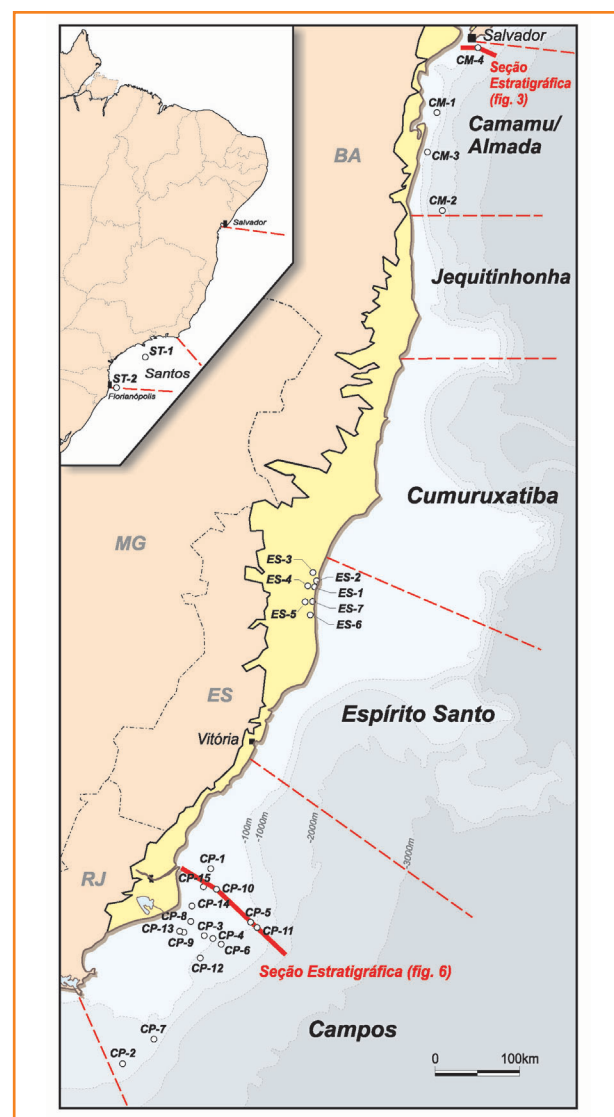


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, mostrando os poços e as bacias analisadas.

Figure 1 – Location Map of the studied area showing the analyzed wells and basins.

Andar Aptiano versus Andar Alagoas

Os limites geocronológicos do Andar Aptiano tem apresentado variações resultantes de muitas revisões. A versão adotada aqui é a de Gradstein *et al.* (1994), que construíram uma carta estratigráfica exclusivamente para o Mesozóico, aparentemente com boa aceitação pela comunidade científica internacional, em função das várias citações do documento desde sua publicação. O Andar Aptiano, segundo Gradstein *et al.* (1994), vai de 121,0 Ma ($\pm 1,4$ Ma) a 112,2 Ma ($\pm 1,1$ Ma), totalizando cerca de 8,8 Ma. Deste total, 4,0 Ma pertencem ao Aptiano Inferior e os restantes 4,8 Ma ao Aptiano Superior (fig.2).

No Brasil, o Andar Alagoas foi definido por Schaller (1969) na Bacia de Sergipe-Alagoas, en-

globando as rochas das formações Muribeca e Ponta Verde, a porção superior da Formação Coqueiro Seco e a porção basal da Formação Riachuelo.

Apesar do grande esforço até hoje realizado, a definição de um "único" Andar Alagoas (ou de suas subdivisões), com base exclusivamente em Palinologia, e válida para todas as bacias brasileiras, ainda não foi alcançada. A impressão de que as assembléias florísticas apresentam variação na quantidade das formas e níveis de extinção, dependendo da bacia que está sendo analisada, é compreensível, visto que as distâncias envolvidas são continentais e as condições de preservação distintas. Por enquanto, parece mais realista delimitar áreas, englobando uma ou algumas bacias, onde as assembléias florísticas que tenham comprovado significado cronoestratigráfico apresentem características mais homo-

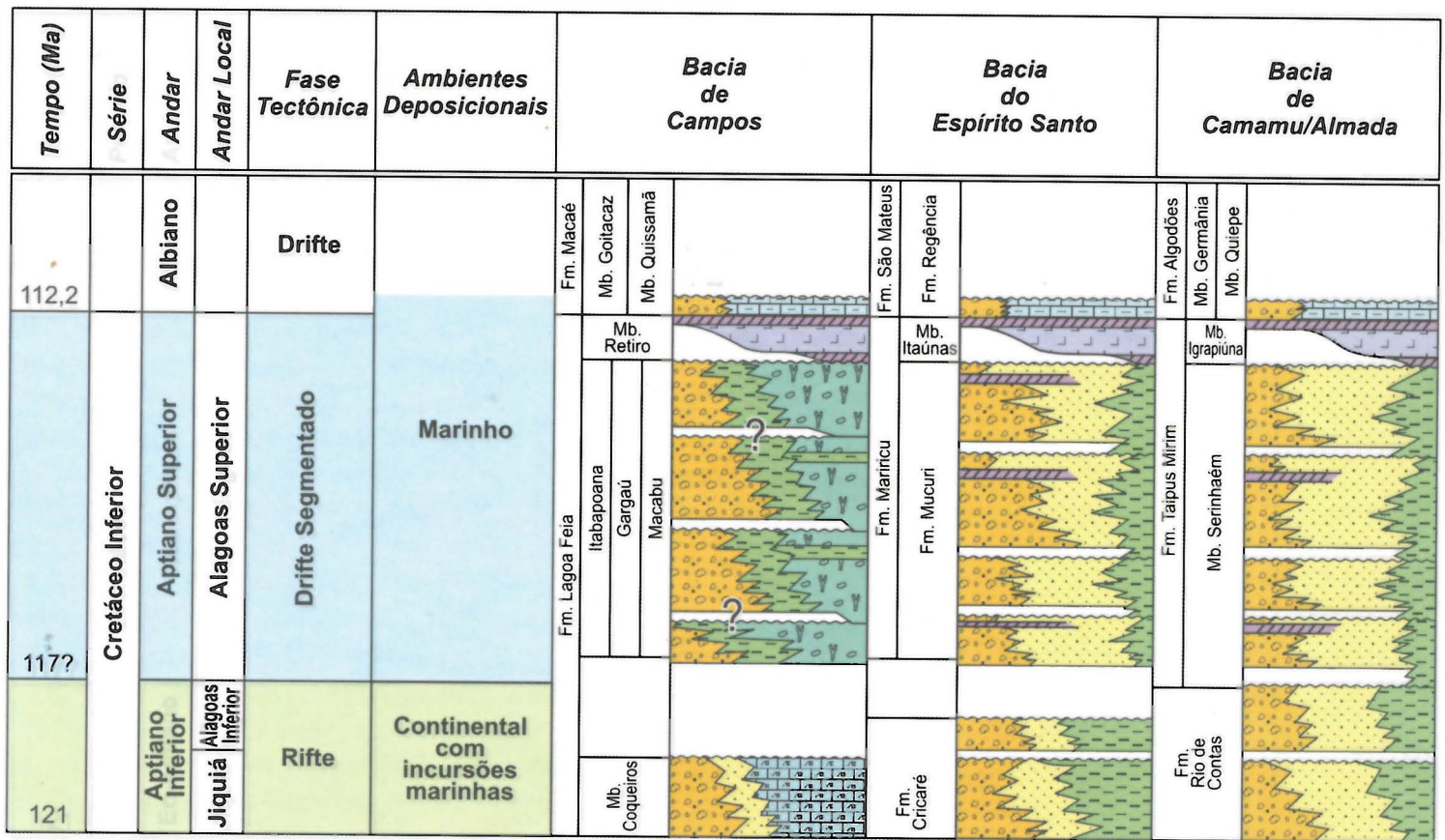


Figura 2 – Geocronologia, fases tectônicas, estratigrafia e ambientes deposicionais interpretados para o Aptiano entre as bacias de Campos e Camamu-Almada.

Figure 2 – Geochronology, tectonic phases, stratigraphy and depositional environments for the Aptian Stage of Campos to Camamu-Almada basins.

gêneas e não se tentar extrapolar para todas as bacias brasileiras as características de uma determinada região.

Apesar da imprecisão ainda vigente na correlação entre os andares Alagoas e Aptiano (Dias-Brito *et al.* 1987; Arai *et al.* 1989), foram assumidas, aqui, algumas premissas que aparentemente apresentam maior consistência e possuem utilidade prática:

a) denominou-se de Andar Alagoas Inferior o pacote situado entre o topo do Andar Jiquiá e o nível de extinção da forma *T. crisopolensis* (biozona P-230). Este nível de extinção corresponderia à passagem do Eoaptiano para o Neo-aptiano, segundo Regali e Viana (1989). Associações fóssilíferas indicam que a base do Aptiano se posiciona em algum nível estratigráfico da porção superior do Andar Jiquiá. Assim, ter-se-ia uma porção basal do Andar Aptiano mais velha do que o Andar Alagoas.

b) denominou-se de Andar Alagoas Superior o pacote situado acima do nível de extinção da forma *T. crisopolensis*. Como a marcação do topo do Andar Alagoas, por Palinologia, ainda é assunto controverso, assume-se que o topo do andar deve situar-se próximo ao topo dos evaporitos “Ibura”. Desta maneira, o Andar Alagoas Superior deve corresponder aproximadamente ao Andar Aptiano Superior (fig.2).

tectônica, estratigrafia e sedimentação

O Andar Aptiano, na porção estudada da margem leste do Brasil, pode ser subdividido em dois pacotes com características tectono-sedimentares distintas, genericamente correspondentes aos subandares Aptiano Inferior e Aptiano Superior. Enquanto o Eoaptiano é caracterizado por uma sedimentação predominantemente continental, com incursões marinhas esporádicas, que ocorreu num ambiente tectônico de rifte, o Neo-

aptiano caracteriza-se por uma sedimentação marinha que ocorreu num contexto de quiescência tectônica predominante.

Aptiano Inferior

Este andar pode ser correlacionado, nas bacias brasileiras, à porção terminal do Andar Jiquiá e à porção inferior do Andar Alagoas. Na porção da margem estudada, o pacote pertencente ao Andar Jiquiá foi seguramente perfurado na Bacia de Campos, onde corresponde à porção superior da Sequência das Coquinas (Membro Coqueiros da Formação Lagoa Feia). As coquinas de bivalvos e rochas siliciclásticas associadas foram depositadas em ambiente flúvio-lacustre durante a fase rifte. Entretanto, em alguns delgados níveis de folhelhos foram encontrados foraminíferos planctônicos e bentônicos que caracterizam as primeiras incursões marinhas nesta bacia (Silva-Telles Jr., 1996).

A porção inferior do Andar Alagoas só foi encontrada até o momento em áreas localizadas nas bacias do Espírito Santo e Camamu-Almada. Fora da área de estudo, foi também perfurada nas bacias de Tucano, Jacuípe e Sergipe-Alagoas. Quando foi possível caracterizar o contexto tectônico da sedimentação, verificou-se que estas ocorrências estavam associadas a blocos rebaixados devido à atividade de falhas típicas da fase rifte. Localmente, o tectonismo foi intenso, como na área do poço CM-4 (norte da Bacia de Camamu-Almada), onde se depositaram centenas de metros de conglomerados sintectônicos (fig.3). A presença de grande número de seixos angulosos e inalterados é indicativa de uma deposição por leques aluviais próximos a falhas, de maneira semelhante à Formação Salvador na Bacia do Recôncavo.

Algumas observações indicam que a tectônica rifte deve ter sido predominante nas porções mais distais das bacias estudadas. Indicações do deslocamento para leste do processo de rifteamento foram identificadas na Bacia de Campos, no final do Andar Jiquiá (Rangel e Carminatti, 2000) e na porção superior do pacote rifte no norte da Bacia de Camamu-Almada (Dias, 1991). O deslocamento da deformação para a zona axial de um sistema de rifte durante a fase final

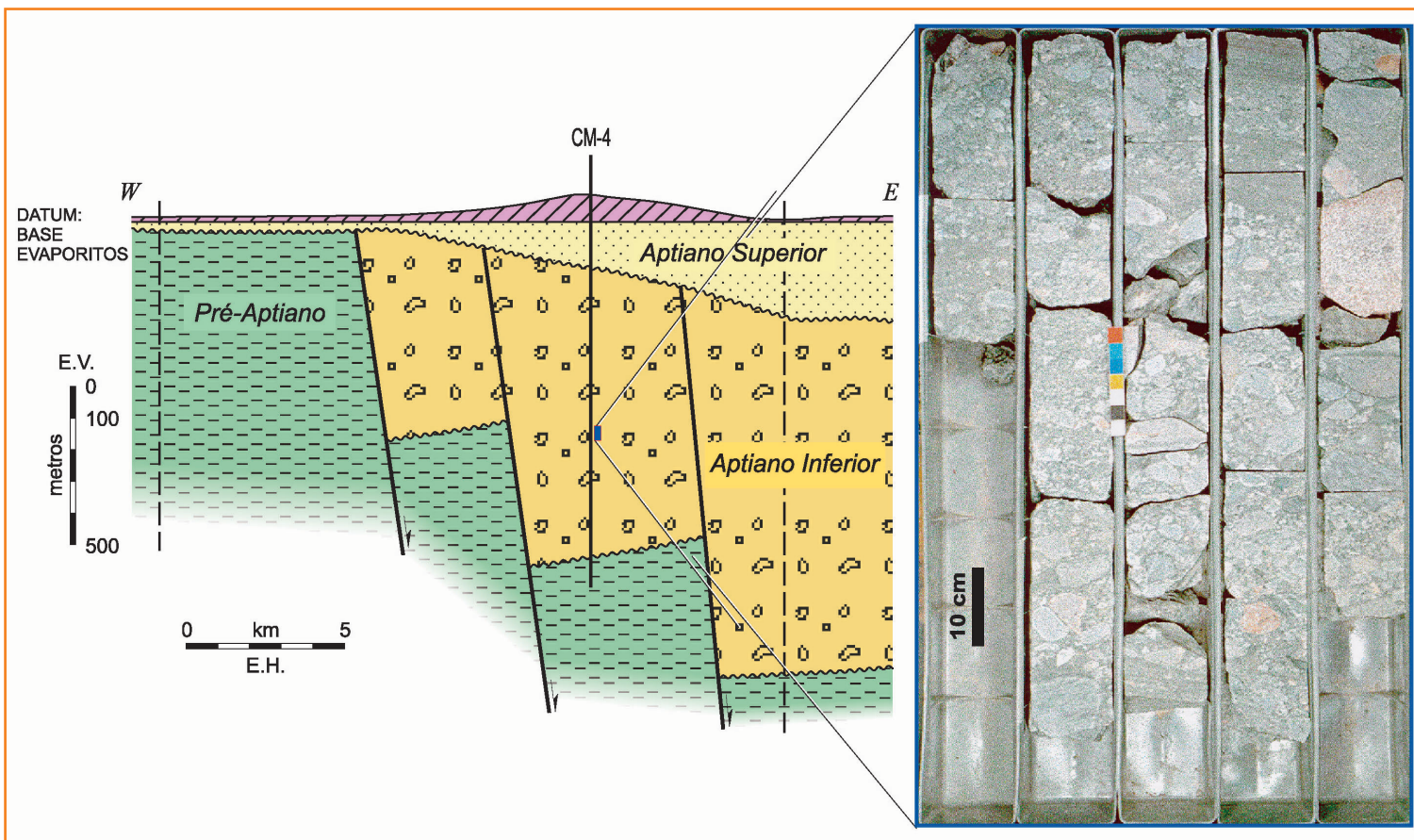


Figura 3 – Seção geológica no norte da Bacia de Camamu (localização na fig.1) ressaltando o posicionamento estratigráfico dos conglomerados polimíticos imaturos do poço CM-4.

Figure 3 – Geological section located in Camamu Basin (location on fig.1) showing the stratigraphic position of the immature conglomerates of well CM-4.

do processo foi também identificada no Atlântico Norte e no Golfo de Suez (Favre e Stampfi, 1992). Na margem leste do Brasil isto significa que, durante boa parte do Eoaptiano, as porções proximais das bacias foram caracterizadas por grábens inativos e, portanto, sujeitas a processos erosionais, enquanto nas porções mais distais ocorria intensa sedimentação, ainda num contexto tectônico de rifte (figs. 4a e 5b).

Este quadro resultou na exposição subaérea de grande parte das porções proximais das bacias, que só foram cobertas pelos sedimentos do Andar Aptiano Superior ou mais novos, e que é reconhecida por uma discordância regional que ocorre em todas as bacias estudadas, aqui denominada de "Discordância pré-Aptiano Superior" (fig.4b). Esta discordância geralmente se expressa por truncamentos erosionais entre as camadas do Andar Aptiano Superior e as do Andar Jiquiá ou mais velhas, e que podem ser identificados tanto

em sísmica quanto em poços. O hiato envolvido vai depender da posição do ponto de medida, podendo-se esperar tempos maiores nas porções mais proximais e sobre paleoaltos estruturais remanescentes da fase rifte.

A acomodação dos movimentos crustais entre o segmento situado ao sul da Bacia de Santos, onde já havia acreção de crosta oceânica, e o segmento situado mais ao norte deve ter ocorrido na região onde hoje se localiza a Dorsal de São Paulo e o Alto de Florianópolis, provavelmente dominada por falhas transformantes (fig.5b). Segundo Chang *et al.* (1992), as taxas de estiramento crustal calculadas na Bacia de Santos são perfeitamente compatíveis com as taxas de espalhamento oceânico do Atlântico Sul Meridional ao sul da zona transformante.

Durante o Eoalagoas, a sedimentação na margem leste brasileira foi predominantemente continental (sistemas de leques aluviais, fluviais e lacus-

tres), mas indicações de incursões marinhas foram identificadas em algumas bacias. Camadas de halita perfuradas na Bacia de Sergipe-Alagoas (“Evaporitos Paripueira”) foram interpretadas como tendo sido formadas a partir de uma salmoura marinha com influência continental (Florêncio, 1996). Folhelhos contendo dinoflagelados foram encontrados em níveis argilosos do Andar Alagoas Inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas (Marília S. P. Regali, informação verbal) e em outros poços da Bacia de Camamu-Almada (Cecília C. Lana, informação verbal). Acritarcos foram detectados em alguns níveis em poços da Bacia de Camamu-Almada (Elisabete Pedrão, informação verbal).

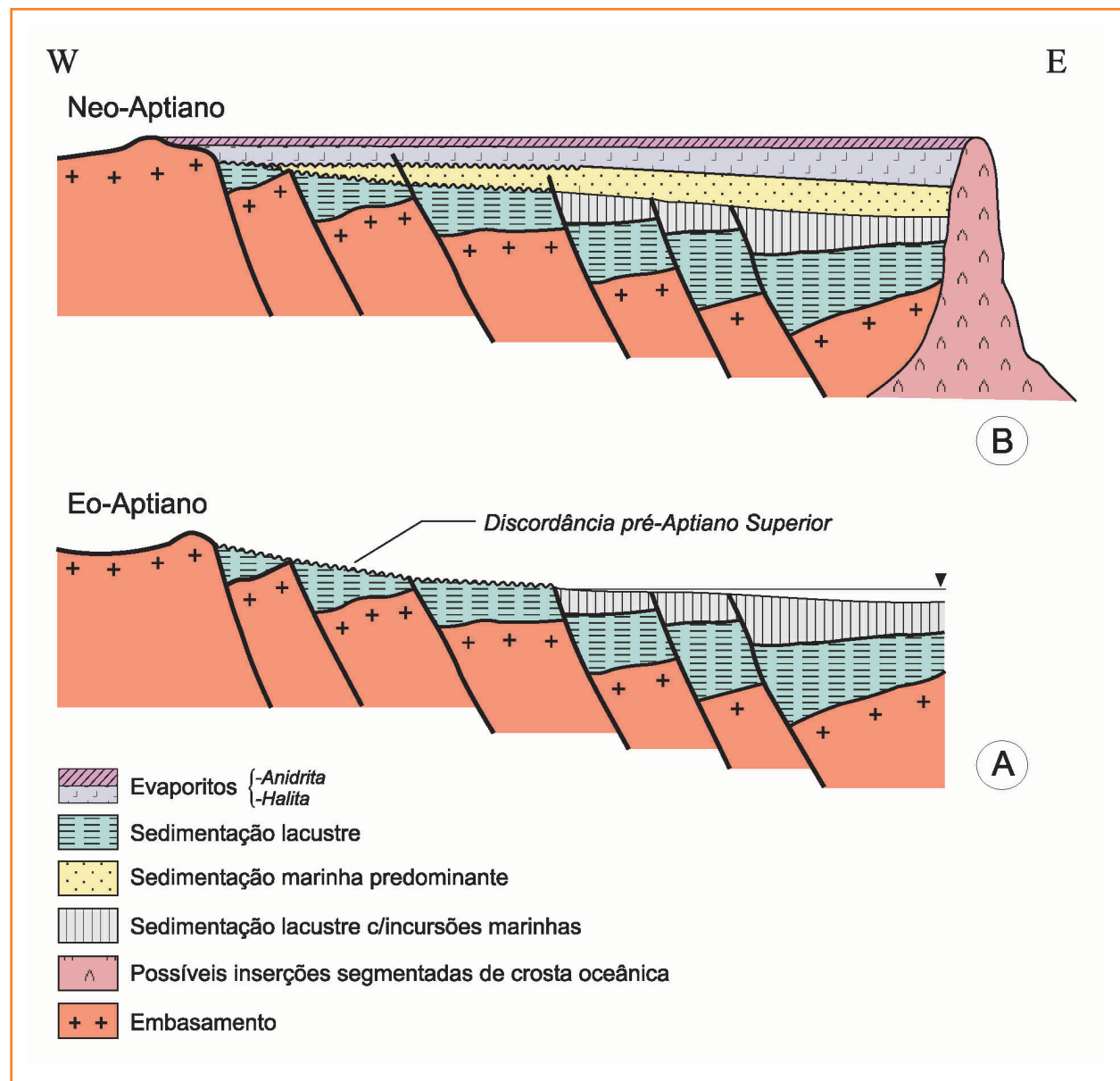
O clima durante o Eoaptiano foi predominantemente quente e úmido, como atestam as ocorrências globais de folhelhos pretos, ricos em matéria orgânica, resultantes de um período de disoxia/anoxia conhecido como OAE 1A (Evento Anóxico Oceânico 1A, Bralower *et al.* 1994). Este período de *greenhouse* está muito bem caracterizado no sul do Gondwana, onde folhelhos ricos em matéria orgânica amorfa foram encontrados no Platô das Malvinas (poço DSDP-511 – fig.5b) e poços perfurados na Bacia de Orange, o que expressa a alta produtividade orgânica vigente no Oceano Atlântico Sul Meridional. Além disto, a circulação das águas nas porções meridionais do

Figura 4

Seções esquemáticas mostrando o deslocamento para leste do processo de rifteamento e a exposição das áreas proximais durante o Eoaptiano (A); e o recobrimento da discordância pré-Aptiano Superior pela sedimentação marinha durante o Neo-aptiano, em condições de quiescência tectônica (B).

Figure 4

Schematic cross sections showing the eastward displacement of the rift and the exposition of the proximal areas during the Early Aptian (A); and the marine sedimentation over the pre-Upper Aptian Unconformity that occurred under stable tectonic conditions during the Late Aptian (B).



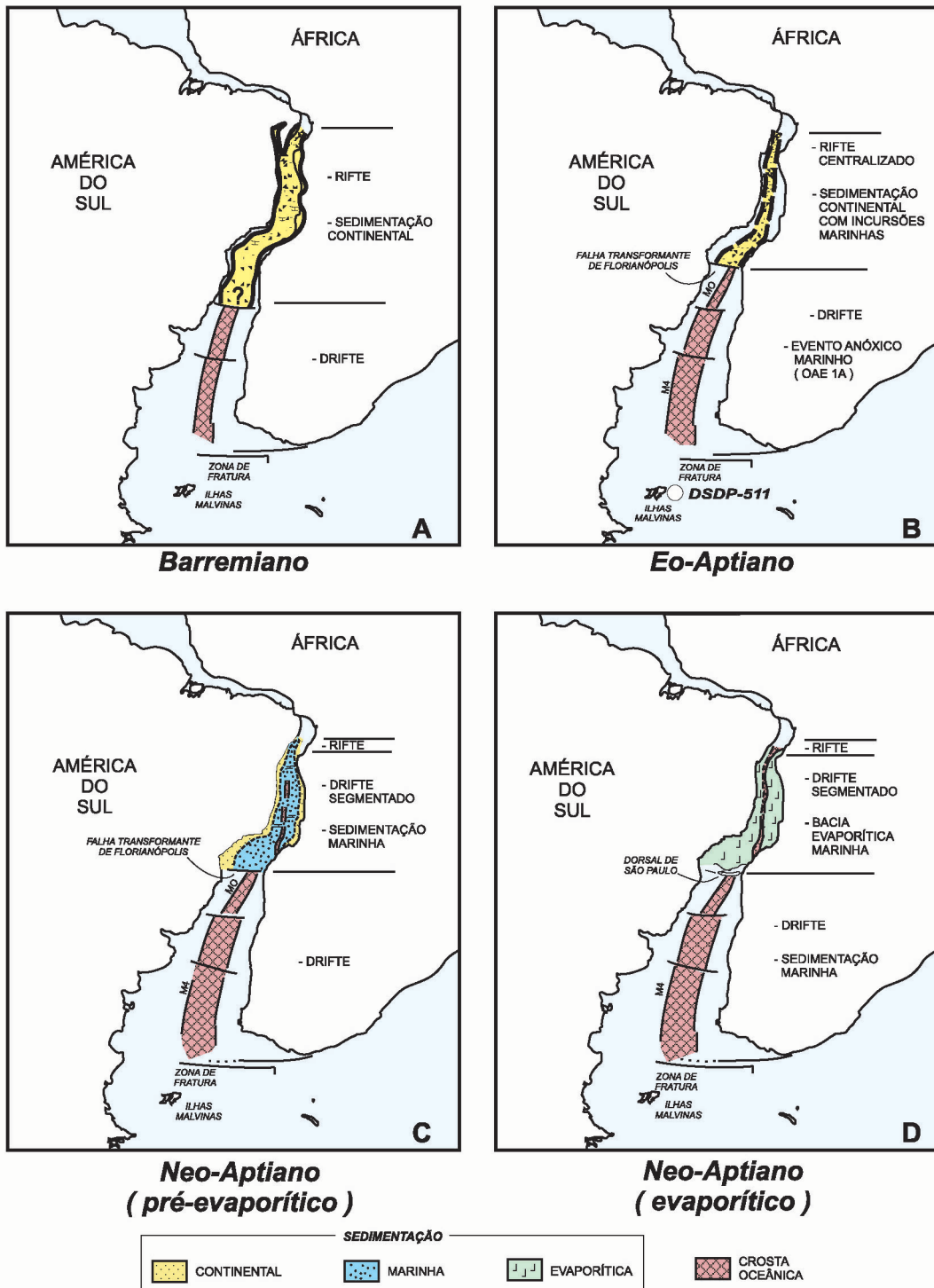


Figura 5

Reconstruções paleogeográficas do Barremiano ao Neo-aptiano, mostrando as principais fases tectônicas e a abrangência da sedimentação marinha no Oceano Atlântico Sul.

Figure 5

Paleogeographic reconstructions from the Barremian to Late Aptian showing the main tectonic phases and the areas of marine sedimentation in the South Atlantic Ocean.

Oceano Atlântico era restrita devido à existência de uma barreira localizada ao sul do Platô das Malvinas (Dias, 1998).

Esta restrição à circulação oceânica deve ter dificultado a chegada das águas marinhas em latitudes menores. Apenas eventualmente teriam atingido as bacias da margem leste brasileira. No entanto, é possível que, durante o Eoaptiano, a influência marinha tenha sido maior nas bacias situadas mais ao sul, como a Bacia de Santos, por exemplo.

Aptiano Superior

A deposição durante o Neo-aptiano (genericamente correspondente ao Neo-alagoas) na porção da margem estudada se processou em ambiente de quiescência tectônica, com falhamentos mais expressivos ocorrendo localmente. Apenas no extremo norte da margem leste brasileira

(nas bacias de Alagoas e do Cabo) o tectonismo se manteve intenso, formando *horsts* e grábens típicos da fase rifte. Nas bacias situadas ao sul da cidade de Salvador, no entanto, as falhas que foram contemporâneas à sedimentação neo-aptiana são em menor número e de menor rejeito quando comparadas com as falhas da fase rifte nas mesmas áreas (Vieira *et al.* 1987 - fig.6). Isto pressupõe que num ambiente tectônico, onde o basculamento devido ao resfriamento termal e à flexura era predominante na maioria das bacias, localmente poderiam ocorrer falhamentos normais resultantes de estiramento crustal.

Tal situação poderia ser explicada por um estágio tectônico caracterizado por acreções segmentadas de crosta oceânica formando células ao longo do lineamento da futura cadeia meso-oceânica (fig.5c). Isto provocaria um relaxamento do estiramento crustal nas áreas adjacentes a estas células (caracterizadas por subsi-

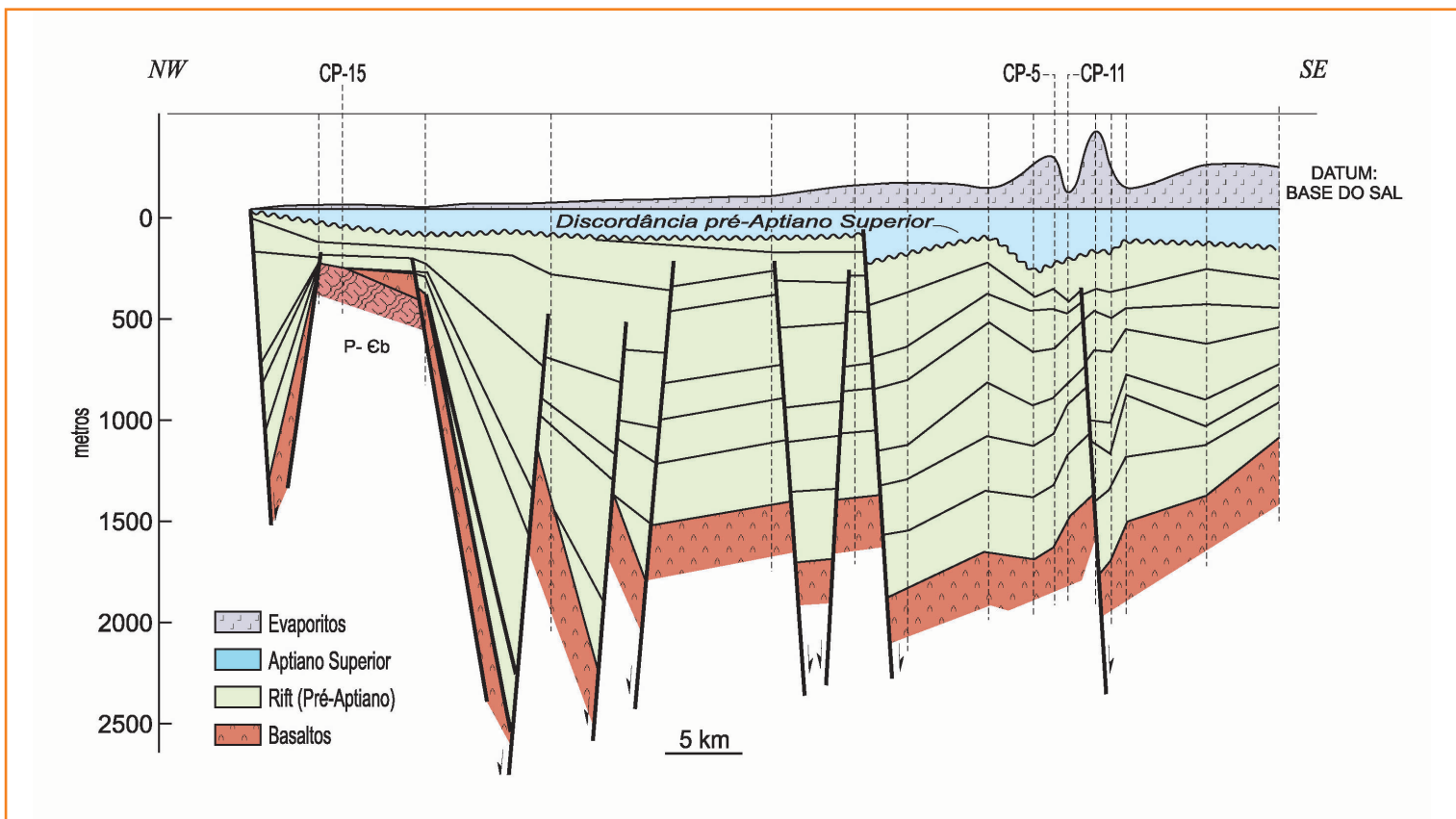


Figura 6 – Seção estratigráfica na Bacia de Campos ressaltando as falhas e seus respectivos rejeitos (localização na fig.1). Repare no reduzido número de falhas que afetam o Andar Aptiano (modificado de Rangel e Carminatti, 2000).

Figure 6 – Stratigraphic cross section located in Campos Basin (location on fig.1) showing the relative low number of faults that affect the Aptian package (modified from Rangel and Carminatti, 2000).

dência e quiescência tectônica) e algum estiramento (com subsidência e alguns falhamentos) nas áreas onde o processo de inserção de crosta oceânica ainda não tivesse começado. Esta situação é genericamente semelhante ao que vem ocorrendo no Mar Vermelho durante a sua recente história geológica (Bonatti, 1985).

O tectonismo em crosta continental continuou muito ativo durante o Neo-aptiano e Albiano apenas nas bacias de Alagoas e do Cabo (Dias, 1991). A definição de uma fase tectônica caracterizada por uma implantação segmentada de crosta oceânica, subsidência generalizada e com falhamentos localizados poderia explicar o dia-cronismo do final da fase rifte, reconhecida nas bacias da margem leste (Chang *et al.* 1992; Dias, 1993). Esta fase foi aqui denominada de "Drifte Segmentado".

Várias feições diagnósticas da sedimentação marinha foram reconhecidas nos testemunhos analisados do Aptiano Superior, tanto em rochas siliciclásticas quanto em rochas carbonáticas e evaporíticas, especialmente nas bacias de Campos e Espírito Santo.

A deposição continental foi predominante apenas nas porções mais proximais das bacias marginais e nas bacias interiores (Recôncavo-Tucano e Araripe), manifestando-se através de sistemas deposicionais dominados por leques aluviais e canais fluviais entrelaçados. Como a maioria dos poços perfurados nas bacias da margem leste situa-se nestas porções marginais, não é comum a identificação de fósseis marinhos. Localmente, no entanto, formas marinhas têm sido descritas, como os dinoflagelados sistematicamente identificados nas amostras de folhelho do Andar Alagoas Superior do poço CM-2 (Botelho Neto *et al.* 1997).

Na Bacia do Espírito Santo, a análise de perfis elétricos e de testemunhos contínuos (cerca de 300 m) retirados em pacotes predominantemente siliciclásticos da Formação Mariricu / Membro Mucuri nos poços ES-6 e ES-7 (fig.1) possibilitou uma análise estratigráfica e sedimentológica detalhada.

Nesta área foram definidas quatro seqüências de terceira ordem com padrões de empilhamento bem definidos, e que mostram sempre uma

associação de fácies fluvial na base (trato de sistemas de mar baixo e/ou início do trato de sistema transgressivo) seguida por associações de fácies relacionadas a ambientes marinho-marginais. Da seqüência mais antiga (ASS-1) para a mais nova (ASS-4) nota-se uma progressiva diminuição da influência de marés nas fácies que se seguiram à deposição fluvial (fig.7). Esta é uma das características de preenchimento de um vale por sistemas estuarinos, onde a influência da maré é mais acentuada no início do preenchimento, quando as restrições topográficas são mais acentuadas e as velocidades de maré são maiores.

As fácies com influência de maré (fig.8a) que se sobrepõem às fácies fluviais foram interpretadas como pertencentes aos tratos de sistemas transgressivo e de mar alto. O trato de sistemas de mar alto tardio foi interpretado a partir das fácies de supramaré que ocorrem no topo das seqüências e que são representadas por depósitos evaporíticos tipo *sabkha* - salina costeira (fig.8b). Análises isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nestas anidritas revelaram valores de $0,7088 \pm 0,0008$, indicativos de deposição a partir de águas marinhas durante o Aptiano Superior (Dias, 1998).

A presença de intercalações anidriticas e a análise do padrão de empilhamento através de perfis em poços situados no norte da Bacia de Camamu conduziram à interpretação de seqüências semelhantes às da Bacia do Espírito Santo (fig.2), reforçando a existência de um processo de abrangência regional, provavelmente a eustasia, na delimitação das mesmas.

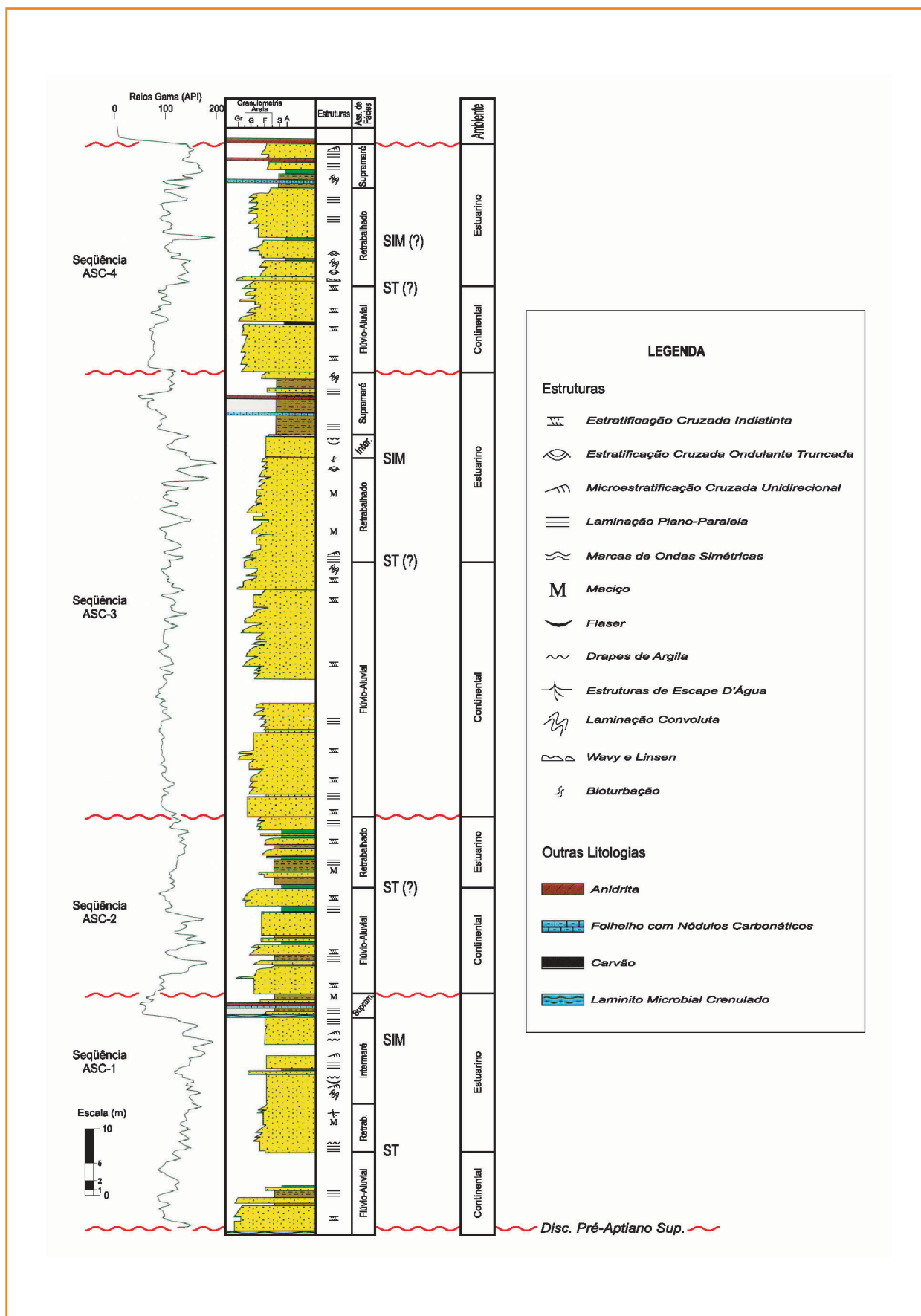
A deposição marinha, durante o Neo-aptiano pré-evaporítico, também foi identificada nos carbonatos perfurados na Bacia de Campos (Formação Lagoa Feia / Membro Macabu). Nesta bacia, embora os poços não tenham sido tão bem testemunhados quanto os poços da Bacia do Espírito Santo, foi possível identificar padrões de empilhamento através de perfis elétricos (especialmente os valores de RG). As fácies correspondentes foram interpretadas a partir de alguns testemunhos e de lâminas de amostras de calha. Em geral, cada seqüência apresenta, na base, valores de RG baixos, que os testemunhos mostraram corresponder às fácies de supramaré e intermaré superior (ambas fortemente caracterizadas

Figura 7

Associações de fácies, seqüências e ambientes deposicionais definidas para o Subandar Aptiano Superior no poço ES-7 (localização na fig.1). Análise com base em testemunhagem contínua de todo o intervalo.

Figure 7

Facies association, sequences and depositional environments of the Upper Aptian interpreted using continuous coring of well ES-7 (location on fig.1).



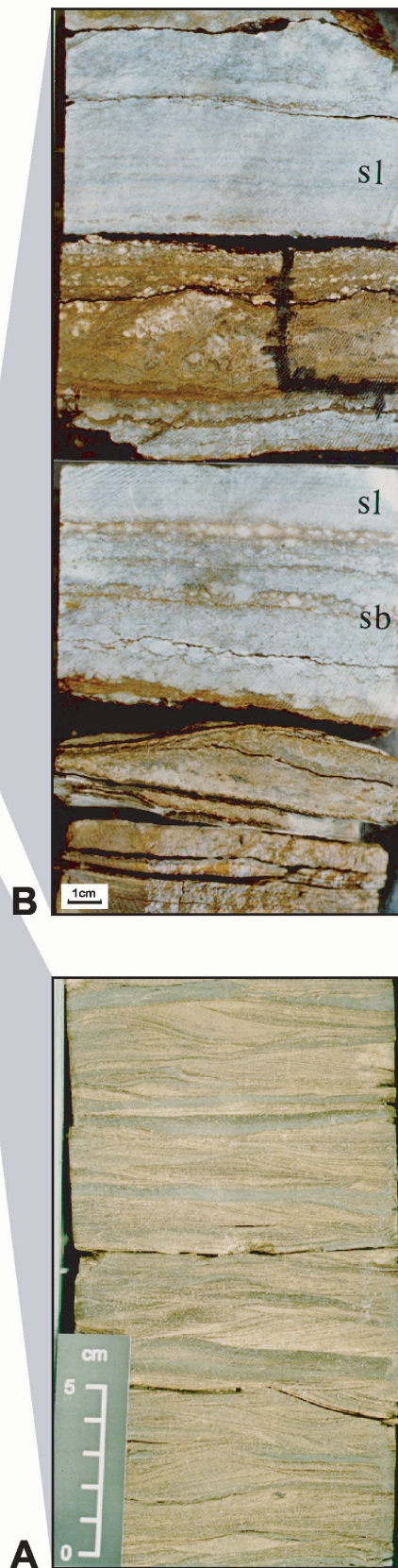
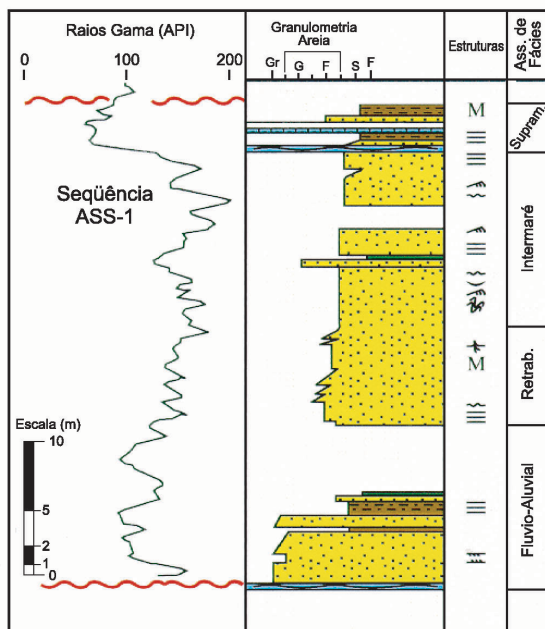


Figura 8

Associações de fácies marinho-marginais do Aptiano Superior definidas no poço ES-7 (localização na fig.1). Associação de fácies de intermaré: arenitos de granulometria média a muito fina com microestratificação cruzada, *drapes* e *flasers* de argila (A); associação de fácies de supramaré: camadas centimétricas de anidrita nodular – *sabkha* (sb) e de anidrita laminada – salina (sl), intercaladas com folhelhos com nódulos carbonáticos (B).

Figure 8

Shallow marine facies associations of the Upper Aptian interpreted in well ES-7 (location on fig.1). Intertidal Facies Association: medium to very fine sandstones with small cross stratification, *drapes* and *flasers* in (A); Supratidal Facies Association: shales with carbonatic nodules intercalated with centimetric beds of nodular anhydrite – *sabkha* (sb) and laminated anhydrite – saline (sl) in (B).

por laminitos microbiais e estromatolitos – fig.9). Estas fácies são recobertas por feições de RG com valores mais elevados, maior conteúdo argiloso, correspondentes à Fácies de Intermaré Inferior. No topo de cada seqüência localizam-se os valores de RG mais elevados, correspondentes às fácies mais distais de todo o sistema carbonático (*mudstones* laminados) e interpretados como de ambiente de inframaré de baixa energia. Como a amostragem por poços é relativamente esparsa supõe-se que, ao longo do *strike* deposicional do sistema carbonático, ocorram fácies de alta energia como *grainstones* de deltas de maré ou mesmo bioconstruções, como é o caso da plataforma carbonática atual do Golfo Pérsico, onde esta mudança faciológica ao longo do *strike* deposicional é muito conspícua. Nestas seqüências foram identificados delgados folhelhos com teores de carbono orgânico entre 2% e 5% (Dias,1998).

Embora o pacote carbonático do Aptiano Superior na Bacia de Campos apresente espessuras de até 430 m, comparáveis com as seqüências siliciclásticas das bacias situadas ao norte dela, não foi possível estabelecer com exatidão uma cronocorrelação entre as seqüências de terceira ordem identificadas nas duas áreas.

O ambiente marinho vigente nas bacias da margem leste no Neo-aptiano foi o resultado do aumento significativo na circulação das águas no Oceano Atlântico Sul Meridional na passagem do Eo para o Neo-aptiano. Este aumento de circulação, atestado por condições de fundo oxidantes no Platô das Malvinas e na Bacia de Orange (Dias,1998), se manteve durante boa parte do Neo-aptiano e deve ser o resultado da menor influência da barreira localizada ao sul do Platô das Malvinas. Esta situação provavelmente foi concomitante a um período de eustasia positiva, o que propiciou que a influência marinha, durante o Neo-aptiano, se estendesse de maneira mais efetiva para regiões mais setentrionais, resultando na primeira grande ingressão marinha na margem brasileira.

Durante o Neo-aptiano, as raras falhas contemporâneas à sedimentação ocasionaram apenas o aumento localizado do espaço de acomodação, não sendo responsáveis pelas principais

mudanças faciológicas constatadas nas bacias estudadas. A gradativa mudança faciológica observada a partir da borda, principalmente na Bacia de Campos, indica que, na época da deposição do Andar Aptiano Superior, o nível de base era pouco inclinado, semelhante a uma rampa. Esta caracterização é válida pelo menos até cerca de 100 km da borda deposicional nesta bacia.

Assim, pode-se interpretar a existência, durante o Neo-aptiano (pré-evaporítico), de um mar epicontinental com extensas regiões proximais muito rasas (com grande influência continental) e com um litoral recortado, eventualmente seccionado por vales. Nos embaiamentos, onde as águas se tornaram hipersalinas a ponto de impedir a existência de predadores, proliferaram as comunidades microbiais formadoras dos microbiolitos (Bacia de Campos – fig.10). Nos vales, desenvolveram-se sistemas estuarinos, como os da Bacia do Espírito Santo. Em outros trechos menos recortados da paleolinha de costa é possível que ocorram sistemas marinho-marginais com maior influência de ondas.

Análises de subsidência realizadas na Bacia de Campos (Chang *et al.* 1992), e em outras bacias, mostram um pulso de grande subsidência durante o período Aptiano/Albiano, compatível com o resfriamento da crosta continental estirada durante a fase rifte. Estudos dos traços de fissão realizados em afloramentos de rochas metamórficas no Estado do Rio de Janeiro (Fonseca e Poupeau, 1984, *apud* Chang *et al.* 1992), mostraram que os processos erosivos nas montanhas adjacentes à Bacia de Campos começaram há cerca de 120 Ma (início do Aptiano). Esta subsidência acentuada deve ter sido responsável pela criação principal do espaço necessário para acomodar as rochas do Andar Aptiano Superior em grande parte da área estudada (fig.4b). A este processo de subsidência, que pode ser assumido como mais ou menos constante ao longo do tempo, superimpôs-se a variação eustática, responsável maior pelas seqüências de terceira ordem definidas.

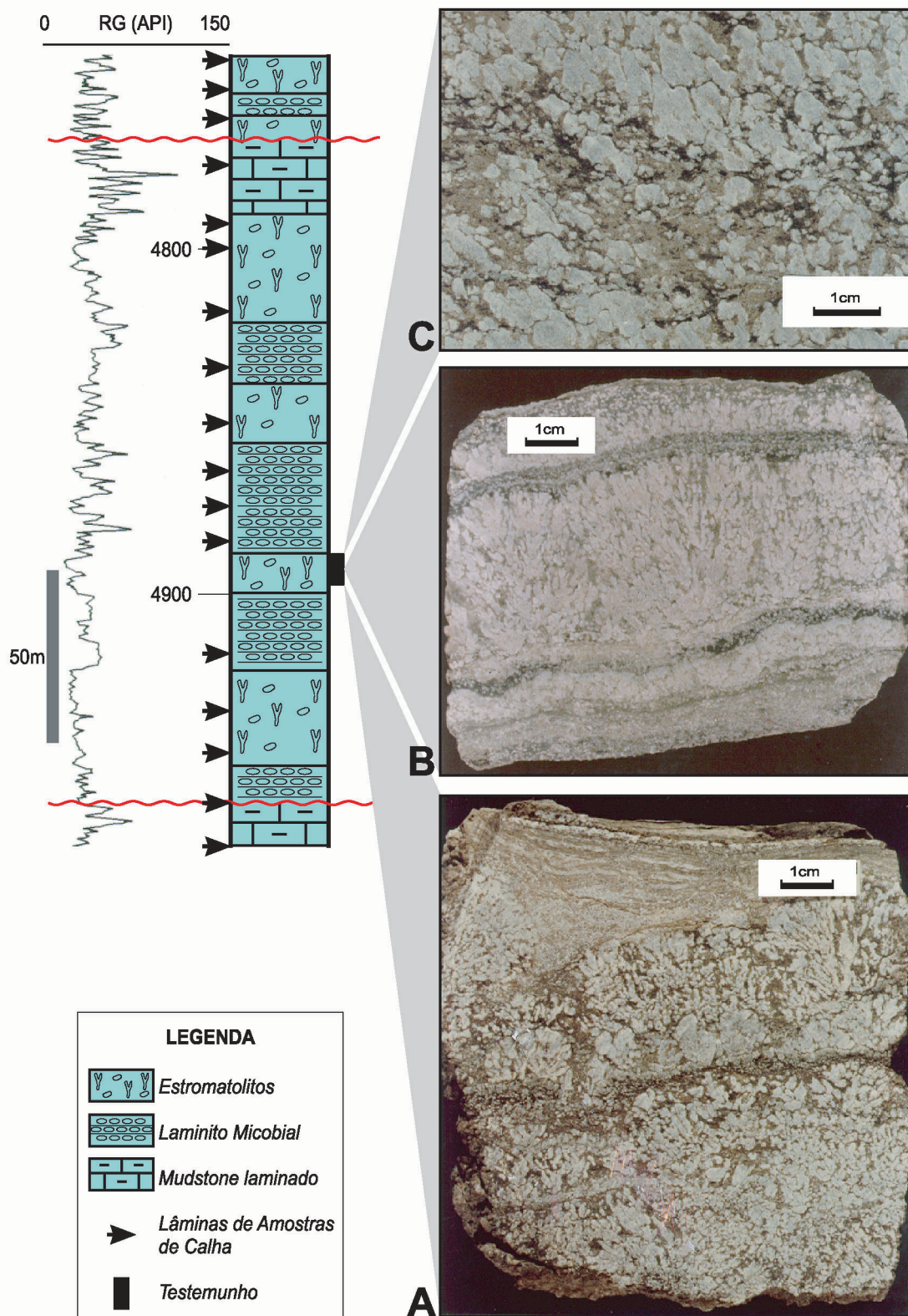
O relevo criado nas bordas das bacias devido ao resfriamento e à flexura da crosta continental, associado ao clima árido/semi-árido predominante no Neo-aptiano, permitiu a deposição do es-

Figura 9

Perfil-tipo de uma seqüência de terceira ordem definida para o Aptiano Superior na Bacia de Campos, ressaltando a associação de fácies de intermaré superior amostrada pelo testemunho: (A) estromatolito dendrítico/foliforme; (B) estromatolito dendrítico e (C) estromatolito foliforme.

Figure 9

Typical Upper Aptian third order sequence in Campos Basin. Upper Intertidal facies associations are recognized in core positioned in GR lower values: dendritic/bush-shaped stromatolites in (A); dendritic stromatolites in (B) and bush-shaped stromatolites in (C).



peço pacote de conglomerados (predominantemente continentais) comuns a quase todas as bacias da margem leste do Brasil. Deve-se salientar que, sistematicamente, o Andar Aptiano Superior (incluindo os conglomerados proximais) se

adelgaça para a borda das bacias (Dias, 1991). Este comportamento é radicalmente diferente do que normalmente ocorre durante a fase rifte, onde os conglomerados depositados por leques aluviais espessam para a falha de borda. Isto sugere que o relevo responsável pela deposição dos leques aluviais não foi gerado por falhamentos de borda e sim por soerguimento lateral provocado pelas subsidências térmica e flexural nas porções mais distais, durante a fase de drifte segmentado.

Este processo não se restringiu ao Neo-aptiano, mas também continuou ativo ainda no começo do Eoalbio, como atestam os conglomerados perfurados na borda da Bacia de Campos (Dias, 1998), significando que as condições tectônicas vigentes eram semelhantes tanto no final do Aptiano, quanto no começo do Albiano. Esta continuidade tectônica e sedimentológica foi interrompida apenas por um episódio deposicional relativamente rápido, os "Evaporitos Ibura".

seqüência evaporítica Ibura

A deposição de um pacote de rochas evaporíticas denuncia um período de aridez no final do Aptiano. Embora tenha resultado na deposição de um espesso pacote (até 2 000 m de espessura), cálculos a partir de taxas deposicionais evaporíticas, especialmente as dos depósitos do sudoeste da Austrália (Logan, 1987), indicam que o episódio não durou mais do que 600.000 anos, o que corresponde a uma seqüência de quarta ordem.

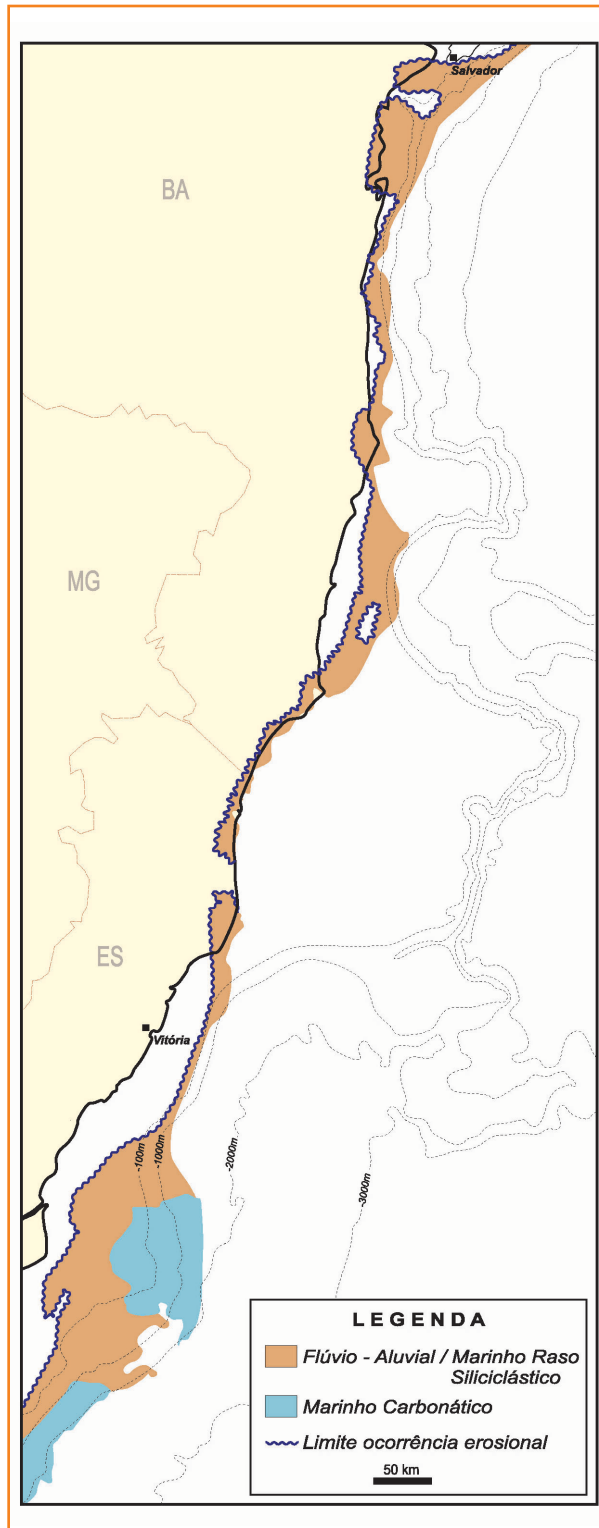
A análise de cerca de 345 m de testemunhos retirados nos poços ES-1, ES-2, ES-3, ES-4 e ES-5, situados na Bacia do Espírito Santo (fig. 1) permitiu caracterizar a seqüência evaporítica Ibura como constituída, na base, por ciclos onde predomina a halita e no topo por ciclos onde predomina a anidrita. Os ciclos de halita foram interpretados como pertencentes ao trato de sistemas de mar baixo. O pacote de anidritas que recobre o pacote halítico foi interpretado como pertencente ao início do trato de sistemas transgressivo, uma vez que, além de representar uma diluição da concentração da salmoura, o limite deposicional deste pacote está bastante desloca-

Figura 10

Mapa de fácies do Subandar Aptiano Superior pré-evaporítico (modificado de Dias, 1991).

Figure 10

Facies Map of the pre-evaporitic Upper Aptian package (modified from Dias, 1991).



do para oeste em relação ao limite deposicional das halitas (fig.4b).

O início da deposição evaporítica ocorreu em *onlap* sobre uma discordância que marca o topo das seqüências neo-aptianas pré-evaporíticas. Esta discordância foi bem caracterizada na Bacia do Espírito Santo, onde os ciclos halíticos basais "*onlapam*" uma camada de anidrita secundária. O caráter "*onlapante*" da base do pacote evaporítico foi também constatado por Demercian (1996), quando este observou, através de linhas sísmicas, o *onlap* dos refletores sobre um alto vulcânico no Platô de São Paulo.

A deposição evaporítica se processou em ambiente marinho, como atestam os elevados teores de bromo nas halitas e os valores isotópicos de estrôncio das anidritas, compatíveis com as águas marinhas do final do Aptiano (Dias, 1998). Várias feições sedimentológicas foram identificadas nos testemunhos, indicando que a precipitação se processou em águas muito rasas (fig.11).

A expressiva deposição evaporítica na margem leste brasileira só foi possível devido à formação de uma barreira no final do Aptiano que, ao impedir a livre circulação das águas marinhas e, associada a um clima árido/semi-árido, criou as condições para o aumento da concentração da salmoura até o nível de precipitação dos minerais evaporíticos.

Esta barreira foi construída por um significativo vulcanismo que resultou na formação de uma muralha vulcânica de direção E-W conhecida como Dorsal de São Paulo (Kumar e Gambôa, 1979). O prolongamento geográfico da Dorsal de São Paulo para o continente coincide com o Alto de Florianópolis, onde o poço ST-2 (fig.1) atingiu, mas não atravessou, rochas traqui-andesíticas datadas de $113,2 \pm 0,1$ Ma pelo método Ar/Ar (Mizusaki, A. M. P., 1993 - informação verbal). Esta idade está próxima ao topo do Aptiano, posicionado por Gradstein *et al.* (1994) em $112,1 \pm 1,4$ Ma. No Alto de Florianópolis, estas rochas

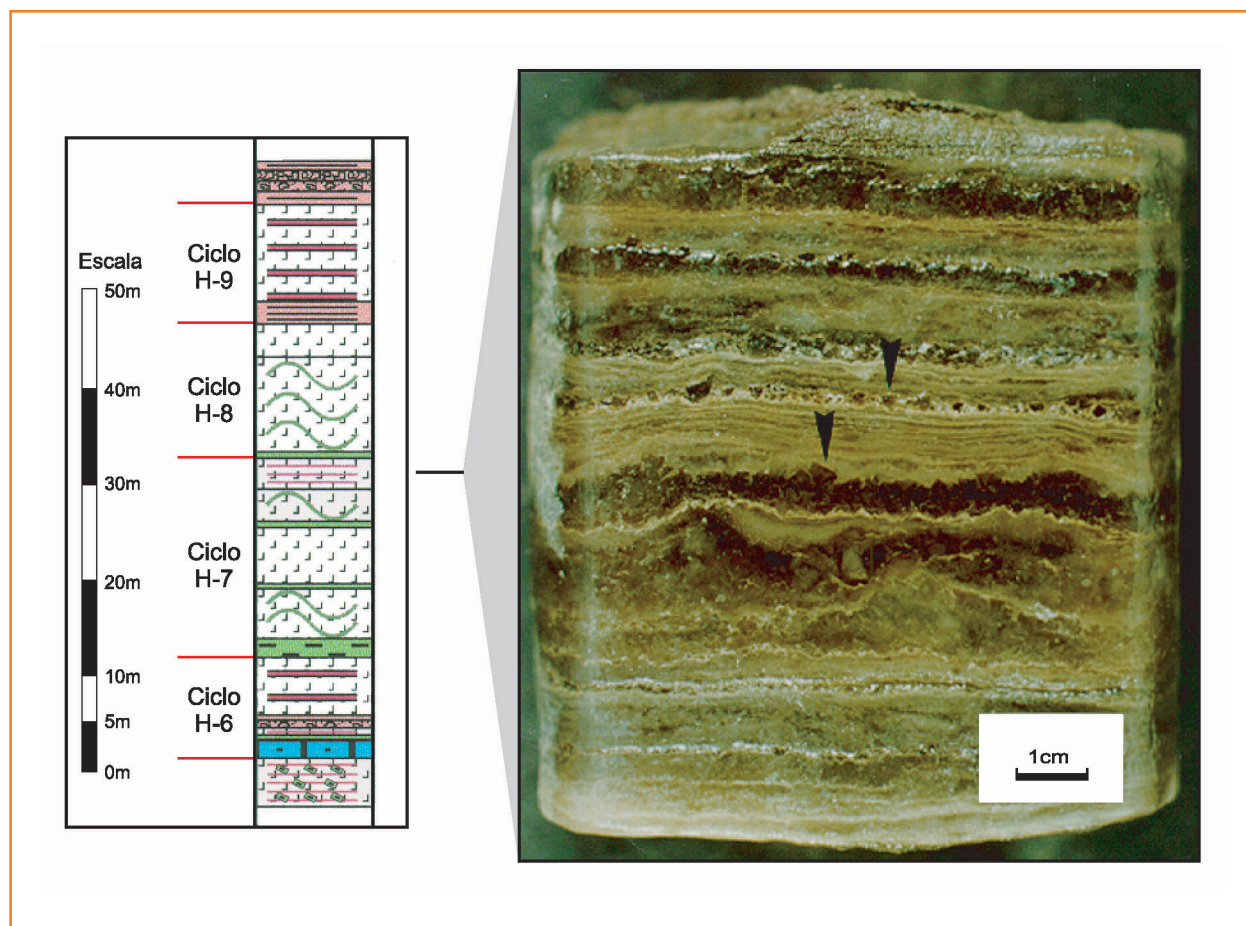


Figura 11

Típicos ciclos halíticos da base da seqüência evaporítica Ibura ressaltando a fácies de halita finamente laminada com anidrita. Repare nas crostas com cristais de halita tipo *chevron* e *cornet* muito bem formadas (setas), indicadores de precipitação em águas muito rasas. Poço ES-1 (localização na fig.1).

Figure 11

Typical halite cycles positioned at the base of the Ibura Evaporitic Sequence. The photograph shows halite laminated by anhydrite. Arrows are indicating chevron and cornet halite crystals that are indicative of precipitation in very shallow waters. Well ES-1 (location on fig.1).

formaram relevos com forma dômica e foram cobertas pelas anidritas do Andar Aptiano Superior ou pelos carbonatos do Andar Albiano (Dias *et al.* 1994).

O limite meridional dos evaporitos posiciona-se muito mais para sul no Brasil do que na África. Isto indica que o limite sul dos evaporitos é marcado exclusivamente pelo conjunto Dorsal de São Paulo - Alto de Florianópolis (fig.5d), não havendo a contribuição nem da Elevação do Rio Grande no lado brasileiro, nem da Cadeia Walvis no lado africano. Estas últimas feições são provavelmente mais jovens, implantadas sobre crosta oceânica de idade pelo menos neocretácea. Se a datação de 113 Ma corresponder ao evento vulcânico principal, pode-se supor que os evaporitos sejam um pouco mais jovens, possivelmente com idade entre 112 e 113 Ma.

Assim, no final do Neo-aptiano uma extensa e rasa bacia evaporítica com mais de 1 500 km de extensão e até 500 km de largura formou-se ao norte da barreira representada pela Dorsal de São Paulo (fig.5d).

A presença de camadas de anidrita/gipso em extensas áreas dentro do Continente Gondwana advém do fato de que a rápida deposição inerente à deposição evaporítica, não acompanhada por subsidência tectônica, faz com que uma transgressão atinja áreas muito maiores do que aquelas associadas à deposição das rochas sotopostas.

Durante a deposição dos evaporitos, falhas ocorreram apenas localmente, aumentando o espaço de acomodação em alguns metros ou poucas dezenas de metros. Tal influência já tinha sido identificada nas áreas dos poços ES-1 e ES-2 por Bacellar e Silva, 1991.

A porção terminal da seqüência que inclui as rochas evaporíticas é composta por calcários imediatamente sobrepostos aos evaporitos. Tanto na Bacia de Campos quanto na do Espírito Santo, estes calcários são predominantemente *mudstones* com escasso conteúdo fossilífero, eventualmente com feições de exposição, depositados num ambiente raso e hipersalino (Spadini *et al.* 1988). O topo da seqüência evaporítica posiciona-se numa discordância no topo destes calcários, em geral poucas dezenas de metros acima dos evaporitos.

Quando se compara o pacote de halitas das bacias de Sergipe e do Espírito Santo, observa-se uma impressionante semelhança faciológica entre as duas (Cerqueira *et al.* 1986; Dias, 1998). Na Bacia de Sergipe, no entanto, a maior concentração da salmoura permitiu a deposição de sais mais solúveis do que a halita. Os ciclos identificados na Bacia do Espírito Santo podem também ser correlacionados aos ciclos definidos na Bacia de Sergipe por Cerqueira *et al.* (1986).

A similaridade de muitos aspectos da seqüência evaporítica nas duas bacias, afastadas por mais de 900 km uma da outra, apontam para um controle regional do espaço de acomodação na margem leste brasileira, no final do Aptiano. Como não se admite uma variação de tão alta freqüência para a subsidência termal nesta época, o fator controlador do espaço de acomodação mais importante deve ter sido a variação eustática.

Este período de aridez e intensa deposição evaporítica pode ser correlacionado a uma anomalia positiva de $\delta^{18}\text{O}$ e de um aumento de volume e tamanho dos fragmentos de matéria orgânica continental (interpretado como uma indicação de rebaixamento relativo do nível do mar), observados no poço DSDP-511, no topo do Andar Aptiano (Dias, 1998). Esta anomalia foi interpretada como um período de intenso resfriamento (o maior identificado no Cretáceo), talvez um período de *icehouse*.

A deposição albiana que se seguiu parece retomar as condições de *greenhouse* e de progressivo incremento na circulação oceânica, característica da metade superior do Cretáceo.

conclusões

O Andar Aptiano na porção da margem leste brasileira, entre as bacias de Santos a Camamu-Almada, pode ser subdividido em dois pacotes com características tectono-sedimentares distintas.

O Andar Aptiano Inferior (porção terminal do Andar Jiquiá e Andar Alagoas Inferior) é caracterizado por uma sedimentação predominantemente continental com incursões marinhas que ocorreram durante o final da fase rifte. Neste pe-

ríodo, houve um deslocamento da deformação crustal para as porções axiais do rifte, ocasionando uma exposição subaérea de extensas áreas proximais (discordância pré-Aptiano Superior).

O Andar Aptiano Superior (genericamente correspondente ao Andar Alagoas Superior) é caracterizado por uma sedimentação marinha que ocorreu em ambiente de quiescência tectônica com falhamentos localizados (fase de drifte segmentado). Neste período, a sedimentação continental foi predominante apenas nas porções proximais das bacias marginais. Nas porções mais distais os sedimentos foram depositados num ambiente marinho raso (tanto siliciclástico quanto carbonático) de um mar epicontinental, o que representa a primeira grande ingressão marinha na margem leste do Brasil.

No final do Aptiano, um período de aridez associado à barreira representada pela Dorsal de São Paulo e pelo Alto de Florianópolis resultou na deposição de espesso pacote evaporítico ("evento Ibura"). Os evaporitos, com espessuras de até 2 000 m no Platô de São Paulo, correspondem a um evento cuja duração foi estimada em cerca de 600.000 anos.

agradecimentos

Ao Dr. Antônio Manuel F. de Figueiredo pela preciosa orientação durante a realização da tese de doutorado, base do atual artigo. A todos os colegas da Petrobras que, direta ou indiretamente, influenciaram na realização deste trabalho.

referências bibliográficas

ARAI, M.; HASHIMOTO, A. T.; UESUGUI, N. Significado cronoestratigráfico da associação microflorística do Cretáceo Inferior do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1/2, p. 87-103, jan./jun. 1989.

ASMUS, H. E.; PORTO, R. Diferenças nos estágios iniciais da evolução da margem continental brasileira: possíveis causas e implicações. In: CONGRESSO BRA-

SILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Camburiú. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1980. v. 1, p. 225-239.

BACELLAR, L. A. P.; SILVA, J. G. R. Evolução tectono-sedimentar da região do Campo de Conceição da Barra - Bacia do Espírito Santo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2., 1991, São Paulo, **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991. p.445-453.

BONATTI, E. Punctiform initiation of seafloor spreading in the Red Sea during transition from a continental to an oceanic rift. **Nature**, London, v. 316, p. 33-37, 1985.

BOTELHO NETO, J.; PEDRÃO, E.; ARAÚJO, C. V.; CONDÉ, V. C.; CONCEIÇÃO, J. C. J. **Palinoestratigrafia e palinofácies da seção Aptiana Superior do poço BAS-102** (Intervalo de 3435 a 4881 m): Contribuição à estratigrafia de seqüências da Bacia de Almada, Bahia. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. DIVEX, 1997. 6 p. Comunicação Técnica.

BRALOWER, T. J.; ARTHUR, M. A.; LECKIE, R. M.; SLITER, W. V.; ALLARD, D. J.; SCHLANGER, S. O. Timing and palaeoceanography of Oceanic Dysoxia/Anoxia in the Late Barremian to Early Aptian (Early Cretaceous). **Palaios**, Tulsa, Okla., v. 9, p. 335-369, 1994.

CERQUEIRA, R. M.; PEREIRA, J. C.; PESSOA, A. F. C. Jazida de potássio de Santa Rosa de Lima (SE) - Geologia e avaliação de reservas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986, Goiânia. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1986. v. 5, p. 2168-2175. 1986.

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER, A. A. Tectonic and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 213, n. 1-2, p. 97-138, 1992.

DEMERCIAN, L. S. **A halocinese na evolução do sul da Bacia de Santos do Aptiano ao Cretáceo Superior**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. 201 f. Dissertação (Mestrado).

DIAS, J. L. **Análise estratigráfica e evolução da fase "rift" nas bacias das margens leste e sudeste**

do Brasil. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991. 145 f. Dissertação (Mestrado).

DIAS, J. L. **Análise sedimentológica e estratigráfica do Andar Aptiano em parte da Margem Leste do Brasil e no Platô das Malvinas:** considerações sobre as primeiras incursões e ingressões marinhas do Oceano Atlântico Sul Meridional. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 208 p. Tese (Doutorado).

DIAS, J. L.; SAD, A. R. E.; FONTANA, R. L.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Pelotas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 235-245, jan./mar. 1994.

DIAS-BRITO, D.; UESUGUI, N.; HASHIMOTO, A. Uma Reflexão histórica em torno do andar Alagoas, importante e problemática unidade cronoestratigráfica do Cretáceo Inferior do Brasil.. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 111-115, 1987.

FAVRE, P.; STAMPFLI, G. M. From rifting to passive margin: the examples of the Red Sea, Central Atlantic and Alpine Tethys. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 215, p. 69-97, 1992.

FLORÊNCIO, C. P. **Geologia dos evaporitos Pari-pueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe/Alagoas.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 94 f. Dissertação (Mestrado).

GRADSTEIN, F. M.; AGTERBERG, F. P.; OGG, J. G.; HAN-DENBOL, J.; Van VEEN, P.; THERRY, J.; HUANG, Z. A Mesozoic time scale. **Journal of Geophysical Research**, B, Washington, v. 99, n. B12, p. 24051-24074. 1994.

KUMAR, N.; GAMBÔA, L. A. P. Evolution of the São Paulo plateau (southeastern Brazilian margin) and implications for the early history of the South Atlantic. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, Colo., v. 90, 1979, part.1, p. 281-293.

LOGAN, B. W. **The MacLeod evaporite basin, Western Australia.** Tulsa, Okla., American Association of Petroleum Geologists, 1987. 140 p. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 44).

RANGEL, H. D.; CARMINATTI, M. **Rift lake stratigraphy of the Lagoa Feia Formation, Campos**

Basin, Brazil. Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 2000. p. 225-244. (American Association of Petroleum Geologists. Studies in Geology, 46).

REGALI, M. S. P.; VIANA, C. F. **Sedimentos do Neojurássico-Eocretáceo do Brasil:** Idade e correlação com a escala internacional. Rio de Janeiro: PETROBRAS. SEDES. CEN-SUD, 1989. 95 p.

SCHALLER, H. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas. **Boletim Técnico da PETROBRAS**. Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 21-86, jan./mar. 1969.

SILVA-TELLES JR., A. G. **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., 2 v. Dissertação (Mestrado).

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 South Atlantic. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 261-272, 1988.

VIEIRA, J. C.; DIAS, J. L.; CATTO, A. J. **Evolução estrutural da fase rift da Bacia de Campos.** In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1., 1987, Rio de Janeiro, R J. [Trabalhos apresentados]... Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1987. p. 488-500.

expanded abstract

The Aptian Stage occurs in all sedimentary basins along the Brazilian Margin and represents an important event in the South Atlantic evolution. In order to study the main geologic aspects of this stage 28 wells drilled by PETROBRAS were analyzed along the Brazilian Eastern Margin (from the Santos basin to Camamu-Almada basin). The main sedimentological and stratigraphic aspects of the Aptian package have been established based on the description of 750 meters of cores.

The Aptian along the Eastern Margin can be subdivided into 2 main packages with specific tectonic and sedimentological characteristics.

The Lower Aptian (Upper Jiquiá to Lower Alagoas local stages) is characterized by continental sedimentation under rift tectonics. Scarce marine incursions were recognized in this package. Planctonic and benthonic foraminifers were identified in very thin shale beds of Upper Jiquiá in the Campos Basin. Acritarchs and dinoflagellates were recognized in many shale levels of Lower Alagoas along the Camamu and Almada basins. The scarcity of marine incursions into the Brazilian Eastern Margin during the Early Aptian was related to the difficulty of waters to move northwards due to a very restrict marine water circulation in the southern portion of the South Atlantic Ocean.

Sedimentation during the Early Aptian occurred mainly in grabens located in the central portions of the rift and in scattered grabens located in proximal areas. The eastward displacement of the main grabens caused subaerial exposure of large proximal areas generating a regional unconformity called "pre-Upper Aptian Unconformity".

The Upper Aptian (Upper Alagoas local stage) package was deposited under stable tectonic conditions in a sag basin. This package can be subdivided into two portions of different lithological characteristics. The lower one is composed of siliciclastic and carbonatic rocks and the upper one is composed of evaporitic rocks.

The pre-evaporitic unit was characterized by fluvio-alluvial sedimentation with a widespread occurrence throughout the proximal areas of all marginal basins. Distal sediments however, were deposited under shallow marine conditions. In the Campos Basin this marine sediments are composed mainly by microbiolites (stromatolites and microbial laminites). In the Espírito Santo Basin marine sediments are essentially siliciclastic in origin and were deposited under the impact of tidal currents. In this latter area very thin anhydrite beds (sabkha and coastal salinas

environments) show isotopic values of Sr indicative of marine influence during deposition. Four third-order sequences can be defined in this pre-evaporitic package. The sequence boundaries are unconformities defined by conspicuous lithological contrasts both in carbonate and siliciclastic marine sediments.

At the end of the Aptian a strong period of aridity and the presence of a volcanic barrier, the São Paulo High, allowed the deposition of a very thick evaporitic package ("Ibura Event"). The analysis of the cores from these evaporites in wells drilled in the Espírito Santo Basin show that the Evaporitic Sequence is mainly composed by halite at the base and by anhydrite at the top. Many depositional cycles were recognized in this sequence. Precipitation rates of evaporitic minerals were used to calculate that the Evaporitic Sequence was deposited in about 600,000 years, thus corresponding to a fourth order sequence.

On contrast to the Early Aptian rift phase, the Late Aptian was characterized by regional subsidence and localized active faults. This tectonic scenario indicates a period of punctual oceanic crust accretion defined as "Segmented Drift". This tectonic environment is similar to that which occurred in the Red Sea during its recent geological evolution.

Pre-evaporitic sequences were recognized in the Espírito Santo and Camamu-Almada basins (500 km apart from each other). There is also a correlation between the cycles and facies of the evaporitic sequence of Espírito Santo and Sergipe-Alagoas basins (900 km apart from each other). Correlations at such a long distance indicate that the main depositional control during the Late Aptian was probably the eustasy.

autor author



Jeferson Luiz Dias

E&P Exploração

Interpretação e Avaliação das Bacias da Costa Sul

Pólo Norte

e-mail: jefdias@petrobras.com.br

Jeferson Luiz Dias nasceu em Porto Alegre, RS, em 20 de maio de 1956, graduou-se em Geologia pela UFRGS em 1977, com Mestrado em Geologia pela UFRJ em 1991 e Doutorado em Geociências pela UFRGS em 1998. Ingressou na Petrobras em 1978, tendo trabalhado como intérprete em diversas bacias da margem brasileira. Desde 2000 é Gerente de Interpretação do Norte da Bacia de Santos.