

Oscilações paleobatimétricas de alta frequência induzidas por ciclos orbitais na Bacia de Campos

High-frequency paleobathymetry oscillations in the Campos Basin driven by orbital cycles

Valquíria Porfírio Barbosa | Armando Antonio Scarparo Cunha | Seirin Shimabukuro | Luiz Antonio Pierantoni Gamboa

resumo

Um estudo integrado de cicloestratigrafia, paleoecologia e bioestratigrafia foi desenvolvido em depósitos sedimentares rítmicos do Oligo-Mioceno da Bacia de Campos, Brasil. Os dados bioestratigráficos, combinados com a análise espectral de séries numéricas representativas das variações do conteúdo de carbonato de cálcio dos testemunhos do poço A, revelam a existência de padrões cíclicos de frequências compatíveis com os ciclos de Milankovitch. Oscilações cíclicas nas biofácies de foraminíferos bentônicos reconhecidas nestes testemunhos possuem a mesma frequência e fase dos ciclos de excentricidade longa (400 Ka). Embora mudanças paleoceanográficas (como alterações nas correntes oceânicas, temperatura das águas e suprimento de nutrientes) possam modificar os padrões de distribuição e frequência das associações de foraminíferos, a metodologia empregada na interpretação das biofácies, o contexto geológico da área estudada e o modelo genético proposto para a formação destas rochas com padrão rítmico sugerem que as alterações nas biofácies de foraminíferos bentônicos estão diretamente relacionadas às flutuações

paleobatimétricas induzidas por oscilações glacio-eustáticas do nível relativo do mar. De acordo com o modelo proposto para a formação dos pares de marga-carbonato, ciclos de produtividade e diluição foram determinantes. Em períodos regressivos, o recuo da linha de costa em direção ao oceano favoreceu um aporte maior de argila nas áreas batiais, fazendo com que o aumento do volume de terrígenos inibisse a produção de carbonato pelágico (foraminíferos planctônicos e nanofósseis calcários), criando condições propícias para a deposição das margas. Durante a fase transgressiva, o aporte de sedimentos continentais foi relativamente menor, favorecendo o aumento da produtividade de carbonato pelágico e a redução do teor de argila, formando as camadas de carbonato. Observa-se, também, que as variações paleobatimétricas interpretadas a partir dos dados de foraminíferos estão em fase com os ciclos transgressivos-regressivos, sugerindo uma causa comum tanto para a formação dos pares marga-carbonato como para as oscilações paleobatimétricas registradas pelas biofácies.

Palavras-chave: paleobatimetria | Ciclos de Milankovitch | Bacia de Campos | paleoecologia

abstract

An integrated palaeoecological, biostratigraphic and cyclostratigraphic study was carried out on sedimentary rhythm sequences in the Oligocene-Miocene of the Campos Basin, Brazil. The biostratigraphic data combined with the spectral analysis performed on numerical data based on carbonate content variations of cores from well A, Campos Basin, reveal a periodicity related to the Milankovitch cycles. Benthic foraminiferal biofacies oscillations recognized in these cores have the same frequency and phase of long eccentricity cycles (400 Ka). Paleooceanographic changes (such as changes in ocean currents, water temperature and food supply) can modify the distribution and frequency patterns of foraminifera assemblages. However, the method used to interpretate the biofacies, the geological context of the studied area and the proposed genetic model to explain the origin of these rhythmically patterned rocks, suggest that changes in foraminiferal biofacies are directly related to the paleobathymetric variations induced

by glacio-eustatic oscillations of relative sea level. According to the proposed model, productivity-dilution cycles were instrumental in the origin of these marl-limestone couplets. During regressive phases, conditions were established to increase continental runoff to a bathyal setting. The increase of continental runoff with decrease of contribution of the main carbonate components led to the deposition of marlstone. During the transgressive phase, the relative reduction in clay input from continental sediments, favored a productivity growth of pelagic carbonate (calcareous nannofossil and planktonic foraminifera), which created conditions facilitating the deposition of limestone layers. The paleobathymetry oscillations, interpreted from the benthic foraminifera assemblage, and the formation of couplets, seems to be in phase with the transgressive-regressive cycles indicating a common cause to both processes.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: paleobathymetry | Milankovitch Cycles | Campos Basin | palaeoecology

Figura 1
Mapa de Localização da
Bacia de Campos e dos
poços estudados.

Figure 1
Location map of the Campos
Basin and the studied wells.



introdução

Depósitos sedimentares batiais do Oligo-Mioceno com feições rítmicas são comuns em muitos poços da Bacia de Campos e sua formação. Segundo Azambuja (1990), teria ocorrido em resposta às variações glacio-eustáticas do nível relativo do mar, promovidas pela alternância de estágios glaciais e interglaciais, como resultado da separação do continente Sulamericano da Antártica no Oligoceno (Abertura da Passagem de Drake). Nesse cenário, as variações eustáticas e a formação dos depósitos rítmicos estariam conectados aos ciclos orbitais climáticos da Terra (Ciclos de Milankovitch). Apesar da ampla aceitação deste modelo, uma quantificação detalhada de tais variações do nível relativo do mar e da amplitude temporal destes ciclos na Bacia de Campos são abordagens ainda inéditas. Assim, com esse intuito, foram estudados neste trabalho os testemunhos 3, 4, e 5 do poço A (fig. 1), compostos por margas e carbonatos pelágicos dispostos segundo um padrão rítmico (fig. 2), depositados entre o intervalo geocronológico de 22 Ma e 25 Ma.

Os dados bioestratigráficos provenientes do estudo detalhado de nanofósseis calcários forneceram um arcabouço bioestratigráfico de alta resolução, que permitiu obter uma estimativa da duração dos ciclos orbitais reconhecidos nos testemunhos por meio de técnicas de análise espectral. O estudo dos foraminíferos bentônicos, também de alta resolução, possibilitou compor uma curva paleobatimétrica com precisão compatível à ordem de grandeza dos ciclos orbitais. Esta elevada resolução permitiu observar que a curva paleobatimétrica e o ciclo sedimentar de menor frequência seguiam um mesmo padrão, sugerindo uma causa comum à formação dos ritmos e às oscilações paleobatimétricas. Assim, a análise integrada desses resultados, além de possibilitar uma melhor compreensão da origem dos pares de margas-carbonato registrados nos testemunhos, também fornece um embasamento significativo para o modelo deposicional destas rochas da Bacia de Campos.

métodos e materiais

As amostras utilizadas nos estudos de foraminíferos e nanofósseis foram coletadas em intervalos regulares de 10cm nos testemunhos 3, 4 e 5 do



Figura 2
Ritmos do Mioceno-Oligoceno da Bacia de Campos (poço A, testemunho 5) com as curvas de variação de cor (perfil de cor).

Figure 2
Miocene-Oligocene rhythms from the Campos Basin (Well A, core 5) and its color log variation curves.

poço A. As interpretações bioestratigráficas e paleobatimétricas foram fundamentadas em análises qualitativas e quantitativas de nanofósseis calcários e de foraminíferos bentônicos, respectivamente. As técnicas de preparação das lâminas de nanofósseis seguiram os procedimentos usuais, como exemplificados em Antunes (1997). Em relação à preparação das amostras para foraminíferos, cerca de 30g de rocha seca e pulverizada foram tratadas com uma solução de 10% de peróxido de hidrogênio, posteriormente lavadas em peneira de 0,063mm e secas em estufa a 60°C; do resíduo seco quarteado foram triados cerca de 300 espécimes de foraminíferos bentônicos. Posteriormente, os espécimes foram classificados através da comparação com descrições e ilustrações fornecidas por bibliografias especializadas, entre as quais

se destacam os trabalhos de Cushman (1918; 1920; 1922; 1923; 1924; 1930; 1931; 1937a; 1937b; 1937c; 1939), Boltovskoy (1980), Poag (1981), Tjalsma e Lohmann (1983), Boersma (1984), Jones (1994), Kohl (1985), Koutsoukos (1985), Belanger e Berggren (1986), van Morkhoven *et al.* (1986), Katz e Miller (1987), Loeblich e Tappan (1988; 1994), Charnock e Jones (1990), Kuhnt e Kaminski (1990), Bolli *et al.* (1994), Bornmalm (1997), Kuhnt *et al.* (1999), Robertson (1998), Katz *et al.* (2003), van Hinsbergen *et al.* (2005), entre outros.

Em função da sua elevada sensibilidade ecológica às variações físico-químicas do meio, os foraminíferos bentônicos são, reconhecidamente, o grupo mais empregado em inferências paleoecológicas do Paleozoico ao Recente. Entre uma de suas principais aplicações está o emprego como indicadores de paleobatimetria, sobretudo para bacias oceânicas do Mesozoico e do Cenozoico, como demonstram diversos trabalhos dessa natureza (e. g., Natland, 1957; Bandy, 1960; Slinger e Baker, 1972; Culver e Buzas, 1981; Murray, 1991, entre outros). Em síntese, estes estudos mostram que as associações de foraminíferos bentônicos passam por mudanças sistemáticas em função do aumento do gradiente batimétrico, uma vez que parâmetros físico-químicos condicionantes à distribuição das espécies (e. g., temperatura, massas d'água, disponibilidade de nutrientes e oxigenação) variam de acordo com a profundidade. Assim, durante a seleção das espécies que compõem as biofácies, foram obviamente empregados apenas os táxons, cuja distribuição é controlada primariamente por parâmetros diretamente relacionados à profundidade, o que foi feito com base no vasto conhecimento da ecologia dos foraminíferos bentônicos, hoje de amplo domínio e acesso (e. g., Belanger e Berggren, 1986; Bornmalm, 1997; Culver, 1988; Culver e Buzas, 1981; Ingle, 1980; Katz e Miller, 1987; Miller e Katz, 1987; Robertson, 1998 e van Morkhoven *et al.*, 1986, entre outros).

Nesse sentido, de acordo com Culver e Buzas (1981), os padrões de distribuição e frequência de associações de foraminíferos bentônicos são geralmente mais significativos na determinação das paleobatimetrias do que aquelas fundamentadas em espécies isoladas, para as quais é atribuído um significado isobatial (conceito utilizado até a década de 1970). Isso se deve ao fato de que a distribuição das espécies, mesmo estando relacionada à profundidade, é controlada em grande escala pela distribuição de fatores bióticos (e. g. microhabitat) e abióticos (e. g., massas d'água), que, em muitos casos, não têm uma

interdependência intrínseca com a batimetria do local. Por outro lado, quando se avalia uma associação e o comportamento de seus constituintes em conjunto, é possível estabelecer de forma mais segura uma tendência de distribuição e frequência, controlada predominantemente por um determinado parâmetro.

Neste estudo, a coleta de dados e o processamento das amostras seguiram estas premissas, ou seja, as amostras e as biofácies representativas foram discriminadas com base no padrão de distribuição e frequência das associações, através da quantificação das espécies componentes, somadas à avaliação qualitativa de mudanças na composição destas associações. A contagem de espécies foi padronizada em porcentagens e os dados compilados e plotados, em tabelas de distribuição. Desta forma, a avaliação dos padrões de distribuição e frequência permitiu o reconhecimento de associações controladas essencialmente pela batimetria. Na composição da curva paleobatimétrica, ainda que algumas espécies pudessem indicar intervalos de profundidades máximas ou mínimas, optou-se por utilizar um ponto mediano de amplitude batimétrica entre estes extremos.

A análise espectral foi desenvolvida sob uma série numérica, que reflete as variações de cor dos testemunhos a partir da conversão da imagem digital dos testemunhos em uma matriz numérica, representando o atributo de cor de cada pixel. Para cada pixel foi atribuído um número entre 0 a 255, os quais oscilam em função da cor (sendo o zero representativo da cor branca e 255 da cor preta), com 254 tons de cinza qualificados pelos valores contidos entre 0 e 255. Essa matriz foi matematicamente simplificada para uma única coluna, que representa as variações do conteúdo carbonático das rochas. A análise de resíduo insolúvel foi feita em vários pontos de controle, para averiguar e assegurar que a coloração dos testemunhos estivesse diretamente relacionada ao teor de carbonato de cálcio, ou seja, quanto mais escura a rocha mais pobre em carbonato de cálcio. Essa técnica tem sido rotineiramente utilizada com excelentes resultados (e. g., Sageman *et al.*, 1997; Cramer *et al.*, 2003; Lourens *et al.*, 2005). Para a análise espectral, a matriz foi subdividida em duas: a primeira contendo os dados do testemunho 3 e a segunda, os dados dos testemunhos 4 e 5. O objetivo dessa divisão foi representar matematicamente, ainda que de forma imprecisa, a mudança gradativa da taxa de acumulação, conforme estimativas feitas a partir da análise bioestratigráfica. Na avaliação dos periodogramas, ao invés de discriminar frequências

isoladas, preferiu-se trabalhar com faixas de frequência, pois associá-las aos ciclos orbitais em análise espectrais desenvolvidas em dados geológicos atenua imprecisões provenientes de alterações na taxa de acumulação. A amplitude temporal dos ciclos de Milankovitch, usada como termo de comparação aos ciclos reconhecidos nos testemunhos do poço A, foi obtida com base em cálculos de alta precisão apresentados por Laskar (2004). Os cálculos mostrados por este autor foram desenvolvidos a partir de funções matemáticas, que permitem estimar a duração e a amplitude dos parâmetros astronômicos para os ciclos de precessão, obliquidade e excentricidade para qualquer intervalo geocronológico. Este conjunto de cálculos matemáticos e astronômicos é denominado solução LA2004. A figura 3 ilustra o comportamento teórico dos ciclos de precessão, obliquidade e excentricidade, no que tange aos parâmetros astronômicos (eixo de inclinação da Terra, elipsidade da órbita terrestre e parametrização do efeito precessional) e à duração dos ciclos em tempo para o intervalo geocronológico entre 22 Ma e 25 Ma. As principais frequências destes ciclos são desenvolvidas e ilustradas em periodogramas, cujos resultados são resumidos em tabelas, nas quais é possível observar as frequências mais comuns associadas a cada ciclo orbital e o seu significado temporal. As análises espectrais dos ciclos teóricos de Laskar (2004) foram calculadas por meio do programa de computador Analyseries, versão 2 (Paillard *et al.*, 1996). Os resultados das análises espectrais foram obtidos pelo método Blackman-Tuckey. A partir dos dados primários (curva de cor dos testemunhos 3, 4 e 5), isolou-se a curva que representa a frequência do ciclo de excentricidade longa (aproximadamente 400 Ka), utilizando um filtro gaussiano do próprio programa Analyseries.

Cabe ainda ressaltar que os padrões de ciclicidade e as taxas de acumulação reconhecidos neste estudo (poço A), se comparados aos padrões e taxas obtidas por Azambuja (1990) em estudo cicloestratigráfico realizado no poço B, são bastante similares (figs. 4, 5 e 6). Os dois poços, aqui denominados de A e B (fig. 1), são próximos e mostram grandes similaridades estratigráficas e litológicas. O fato de Azambuja (1990) ter utilizado técnicas completamente distintas das aplicadas neste trabalho, visto que muitas destas técnicas e métodos não existiam naquela época, e ter obtidos resultados similares no que diz respeito à parametrização dos ciclos e taxas de acumulação, corrobora a robustez dos resultados obtidos neste trabalho. No caso do poço B, as análises espectrais

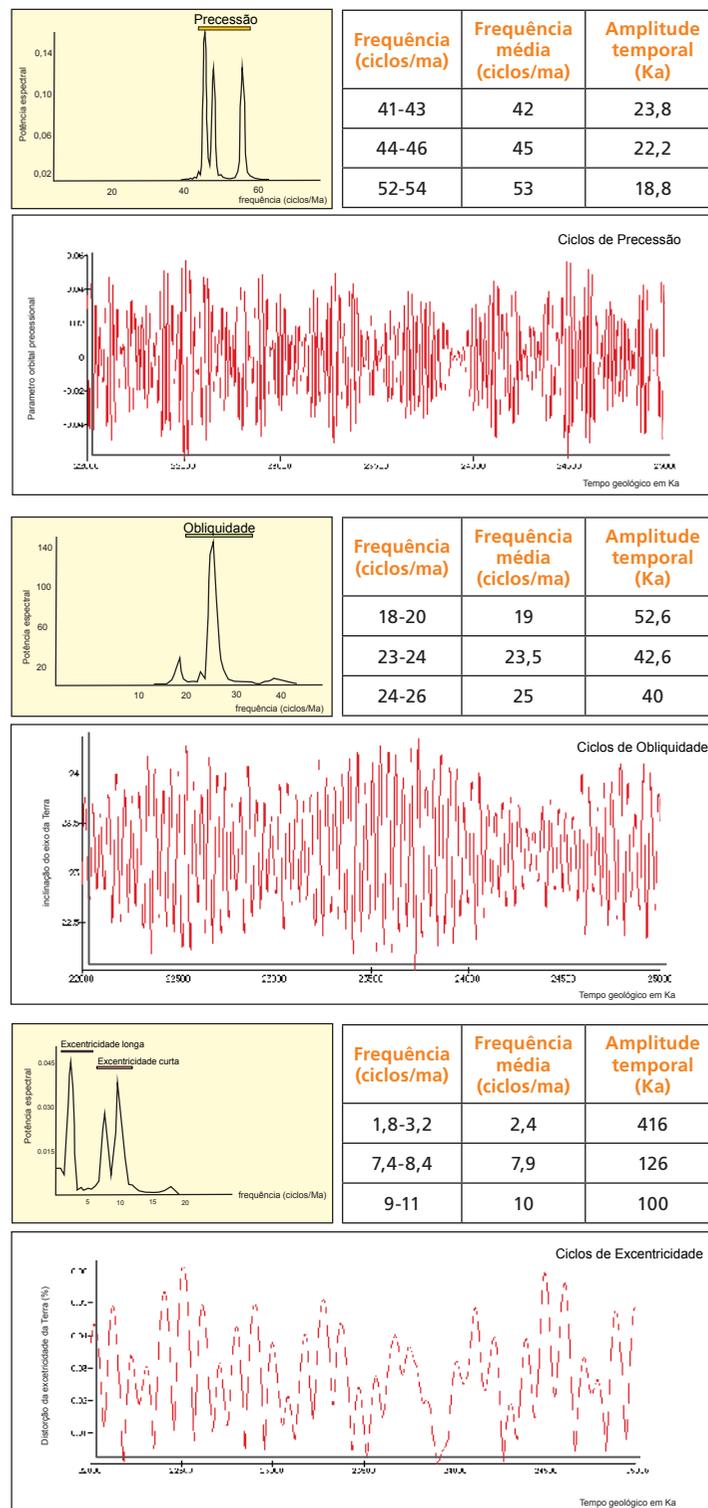


Figura 3 – Excentricidade, Obliquidade e Precessão da Terra entre 22 e 25 Ma. As curvas e as análises espectrais foram calculadas pelo programa de computador Analyseries 2.0 (Paillard *et al.*, 1996) versão 2005. Os cálculos seguem a solução astronômica La2004 (Laskar *et al.*, 2004).

Figure 3 – Eccentricity, obliquity and precession of the Earth between 22 and 25 Ma. The spectral analyses were performed by the software Analyseries 2.0 (Paillard *et al.* 1996) version 2005. The calculations follow the La2004 astronomical solution (Laskar *et al.*, 2004).

Figura 4

Poço B. a) Depósitos rítmicos de margas e carbonatos depositados em ambiente batial da Bacia de Campos durante o Mioceno-Oligoceno. A taxa de acumulação regional para os pares marga-carbonato é 1 cm /Ka (modificado de Azambuja Filho, 1990). b) Ciclicidade observada nos pares de marga-carbonato é definida pela variação do teor de carbonato de cálcio. O conteúdo de carbonato é associado a abundância relativa dos nanofósseis calcários e foraminíferos (modificado de Azambuja Filho, 1990). c) Periodograma (calculado a partir da variação do teor de carbonato); as frequências dominantes são relacionadas aos ciclos de Milankovitch. A conversão do ciclo em espessura para tempo foi obtida dividindo a espessura pela taxa de acumulação (modificado de Azambuja Filho, 1990).

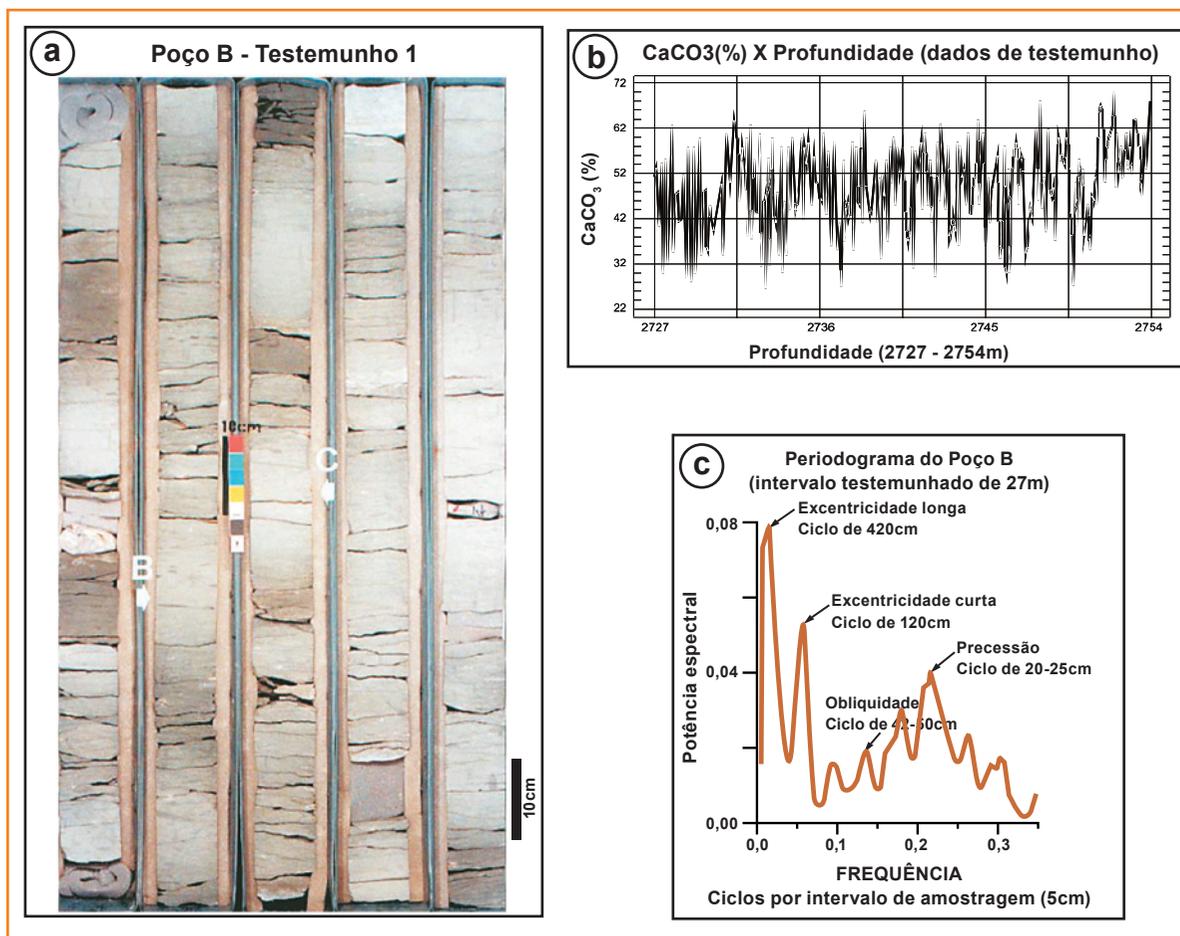


Figure 4

Well B data. a) Rhythmically interbedded marlstones and limestones deposited in a bathyal environment during the Campos Basin Miocene-Oligocene. The regional average accumulation rate for the carbonate-marlstones couplets is 1.0 cm/Ka (modified from Azambuja Filho, 1990). b) The cyclicity observed in the marl-limestone couplets is defined by the carbonate content variation in the core. The carbonate content is related to the relative abundance of calcareous nannofossils and foraminifera (modified from Azambuja Filho, 1990). c) Periodogram (calculated base on carbonate content data); The dominant frequencies correspond to Milankovitch periodicity cycles. The conversion of the cycle thickness into time was made by dividing the thickness by the accumulation rate (modified from Azambuja Filho, 1990).

fundamentam-se em curvas calcimétricas obtidas por medidas feitas em calcimetro. O método matemático aplicado foi a análise de Fourier Simples, processada no programa Statistica, sem teste, coerência estatística ou filtragem das principais frequências.

análise espectral: resultados e interpretações

A bioestratigrafia foi empregada para mesurar a quantidade de tempo envolvida na seção estudada, por isso, a primeira ocorrência da espécie (FO) de nanofósseis calcário *Sphenolithus disbelemnus* (22,76 Ma) e as últimas ocorrências das espécies (LO) *Sphenolithus delphix* (23,11 Ma) e *Sphenolithus ciperoensis* (24,04 Ma) foram escolhidas como principais marcadores geocronológicos do intervalo analisado, tendo a idade absoluta destes eventos fundamentado o cálculo das taxas de acumulação e

estimativas da duração dos ciclos orbitais. A escala de tempo geológico adotada para atribuir idades absolutas a estes eventos bioestratigráficos, eleitos como marcos, foi a de Gradstein *et al.* (2004), em função da maior adequação desta aos resultados obtidos no estudo cicloestratigráfico. A razão entre a espessura dos intervalos delimitados pelos eventos bioestratigráficos e o tempo envolvido na deposição destes intervalos de rochas definiram os valores das taxas de acumulação (tabela 1).

Observa-se que a estimativa temporal de alguns dos ciclos reconhecidos nos periodogramas (figs. 5 e 6) são relativamente imprecisas se comparados aos valores temporais teóricos dos ciclos de Milankovitch calculados por Laskar *et al.* (2004). Isto se deve, em parte, à própria dispersão em amplitude e frequência dos ciclos orbitais teóricos para o intervalo de tempo geológico entre 22 Ma e 25 Ma (fig. 3). Entretanto, alterações na taxa de sedimentação ao longo da seção e o tamanho relativamente pequeno da série temporal (definida pelo comprimento reduzido dos testemunhos) são limitações que dificultam o reconhecimento dos

| Datums Bioestratigráficos | Prof. (m) | Espessura do intervalo (m) | Idade (Ma) | Amplitude (Ma) | Taxa de sedimentação (cm/lca) |
|------------------------------------|-----------|----------------------------|------------|----------------|-------------------------------|
| FO <i>Sphenolithus disbelemnos</i> | 2635,95 | | 22,76 | | |
| LO <i>Sphenolithus delphix</i> | 2639,75 | 3,80 | 23,11 | 0,35 | 1,09 |
| LO <i>Sphenolithus ciproensis</i> | 2662,20 | 22,45 | 24,04 | 0,93 | 2,41 |

Tabela 1

Pontos de amarração para a conversão do domínio profundidade para tempo. Os marcos bioestratigráficos são primeira (FO) e últimas ocorrências (UO) de nanofósseis calcários. Idade absolutas de Gradstein et al. (2004).

Table 1

Tie-points used to convert data from the depth-domain to the time-domain. The Biostratigraphic markers are the first occurrence (FO) or the last occurrence (LO) of calcareous nanofossil species. Absolute Age from Gradstein et al. (2004).

ciclos orbitais, tornando-os menos conspícuos nos periodogramas. Deve-se ainda considerar que os dados bioestratigráficos permitem uma estimativa da taxa de acumulação, extremamente útil no reconhecimento da ordem de grandeza dos ciclos. Contudo, esse método também apresenta imprecisões inerentes à datação absoluta dos eventos de extinções e surgimento de espécies fósseis. Deste

modo, a transformação da dimensão métrica em temporal, usualmente denominada em estudos cicloestratigráficos de modelo tempo-profundidade, serve apenas como referência no dimensionamento dos ciclos, não podendo ser aplicada como indicador preciso da duração individual de cada ciclo. No que se refere ao periodograma que ilustra os ciclos do testemunho 3 (fig. 5), a maior imprecisão

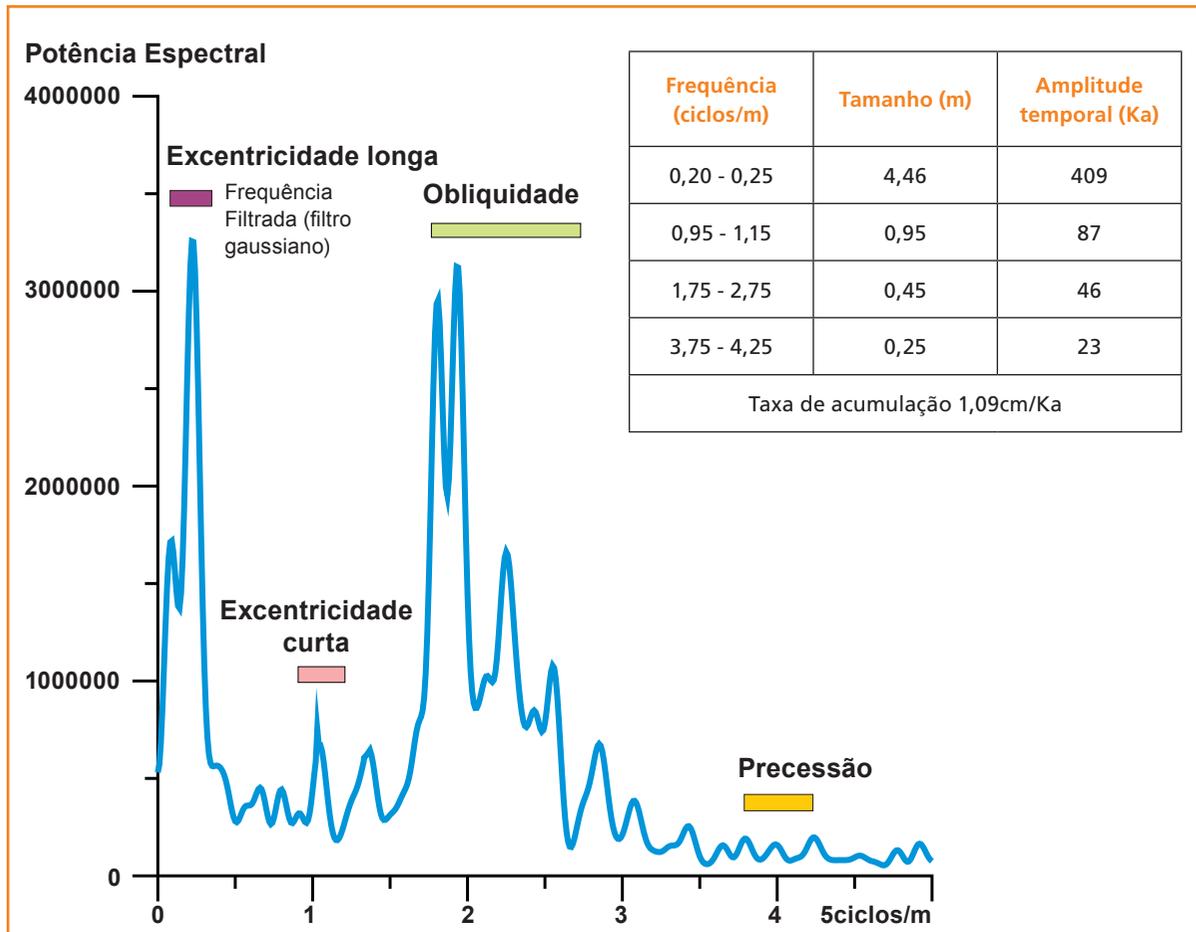


Figura 5

Densidade espectral como função da frequência (Periodograma). A análise foi processada usando o perfil de cor do testemunho 3, com o método Blackman-Tukey (programa AnalySeries 2.0 - Paillard et al., 1996). Largura da banda 10440 lags com 18000 pontos (comprimento do testemunho 18m; nível de confiança de 90%). A amplitude temporal dos ciclos foi estimada em base a taxa de acumulação de 1,09 cm/Ka.

Figura 5

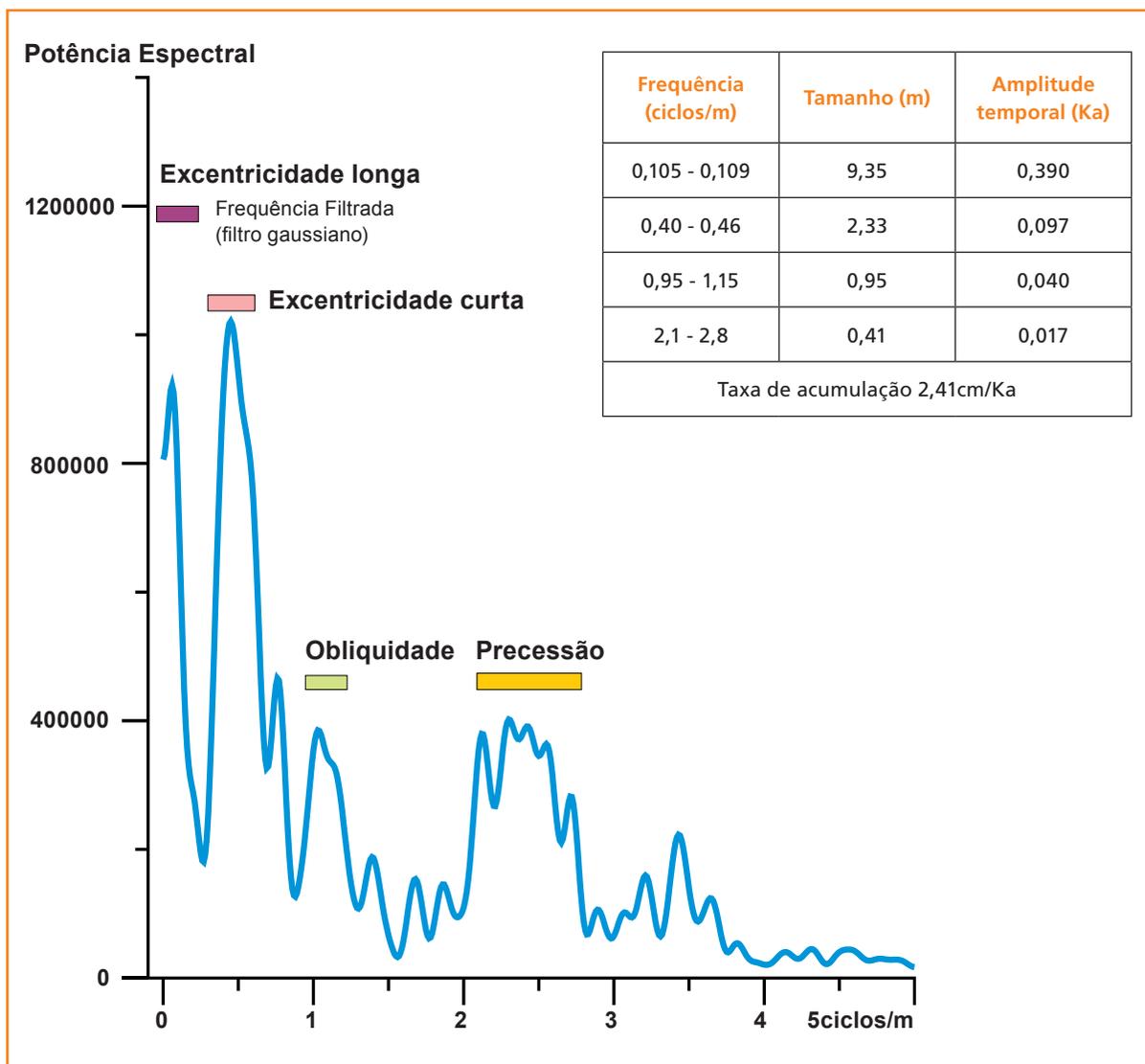
Spectral density as a function of frequency (Periodogram). The analysis was based on the core 3 color index, using the Blackman-Tukey method in the Software AnalySeries 2.0 (Paillard et al., 1996). Bandwidth for 10440 lags on 18000 values (core length 18 m; 90% level confidence). The time span of the cycles was estimated based on an average accumulation rate of 1.09 cm/Ka.

Figura 6

Densidade espectral como função da frequência (Periodograma). A análise foi processada usando o perfil de cor dos testemunhos 4 e 5, com o método Blackman-Tukey (programa AnalySeries 2.0 - Paillard *et al.*, 1996). Largura da banda 8692 lags com 22400 pontos (comprimento do testemunho 22,4m; nível de confiança de 90%). A amplitude temporal dos ciclos foi estimada em base a taxa de acumulação de 2,41 cm/Ka.

Figura 6

Spectral density as a function of frequency (Periodogram). The analysis was based on the color index of cores 4 and 5, using the Blackman-Tukey method in the Software AnalySeries 2.0 (Paillard *et al.*, 1996). Bandwidth for 8692 lags on 22400 values (core lengths 22.4 m; 90% level confidence). The time span of the cycles was estimated based on an average accumulation rate of 2.41 cm/Ka.



foi associada aos ciclos de excentricidade curta e obliquidade. O primeiro apresenta valores espectrais relativamente baixos, e o segundo, apesar dos valores espectrais elevados, caracteriza-se por uma alta dispersão de frequências, o que definiu uma faixa mais larga que o adequado. Na análise espectral dos testemunhos 4 e 5 (fig. 6), o ciclo com estimativa temporal mais díspar em relação aos valores calculados por Laskar *et al.* (2004) foi o ciclo precessional. A faixa espectral é muito larga, tornando imprecisa a definição da melhor frequência a ser associada a esse ciclo.

A duração temporal dos ciclos reconhecidos no periodograma referente ao testemunho 3 (fig. 5) foi calculada a partir da taxa de acumulação, estimada pela razão entre a espessura e o tempo limitados pela primeira ocorrência (FO) da espécie *Sphenolithus disbelemnos* (22,76 Ma) e a última ocorrência (LO)

da espécie *Sphenolithus delphix* (23,11 Ma) (taxa de acumulação de 1,09 cm/Ka; cerca de 380cm de rochas representam 350 Ka). A análise espectral deste testemunho mostra duas bandas de frequência com valores espectrais elevados, estatisticamente significativos. Outras bandas com potências espectrais relativamente baixas são também visíveis no gráfico. Aquelas com valores espectrais estatisticamente altos definem os ciclos de excentricidade longa e de obliquidade. As outras, cujas faixas de frequência possuem potência espectral baixa, estatisticamente pouco significativas, são associadas aos ciclos de excentricidade curta e de precessão. Utilizando o valor médio das faixas de frequência, foram calculados quatro ciclos de 4,46m, 0,95m, 0,45m e 0,25m, cuja duração temporal é estimada em 409 Ka, 87 Ka, 46 Ka e 23 Ka, respectivamente (fig. 5).

No que se refere à análise espectral e reconhecimento dos ciclos nos testemunhos 4 e 5, as últimas ocorrências das espécies *Sphenolithus delphix* (23,11 Ma) e *Sphenolithus ciperensis* (24,04 Ma) foram escolhidas para elaboração do modelo tempo-profundidade, ou seja, para o cálculo da taxa de acumulação e a identificação temporal dos ciclos (taxa de acumulação de 2,41cm/Ka; cerca de 2.245cm de rochas representam 930 Ka). O periodograma que expressa os resultados da análise espectral dos testemunhos 4 e 5 apresenta quatro faixas de frequências de valores espectrais elevados (fig. 6). As menores frequências com valores espectrais mais elevados foram associadas aos ciclos de excentricidade e obliquidade. O ciclo precessional está definido no gráfico por uma faixa relativamente larga de valores espectrais moderados. As frequências mais baixas foram interpretadas como ruído. A partir do

valor médio das faixas de frequência, foi calculado o comprimento dos quatro ciclos orbitais, cujos valores obtidos foram 9,35m, 2,33m, 0,95m e 0,41m, com estimativa temporal de 390 Ka, 97 Ka, 40 Ka e 17 Ka, respectivamente.

biofácies de foraminíferos bentônicos - curva de paleobatimetria

Estima-se que a paleobatimetria da seção estudada tenha se mantido dentro do domínio da Zona Batial Médio (500-1.000m) no Oligoceno

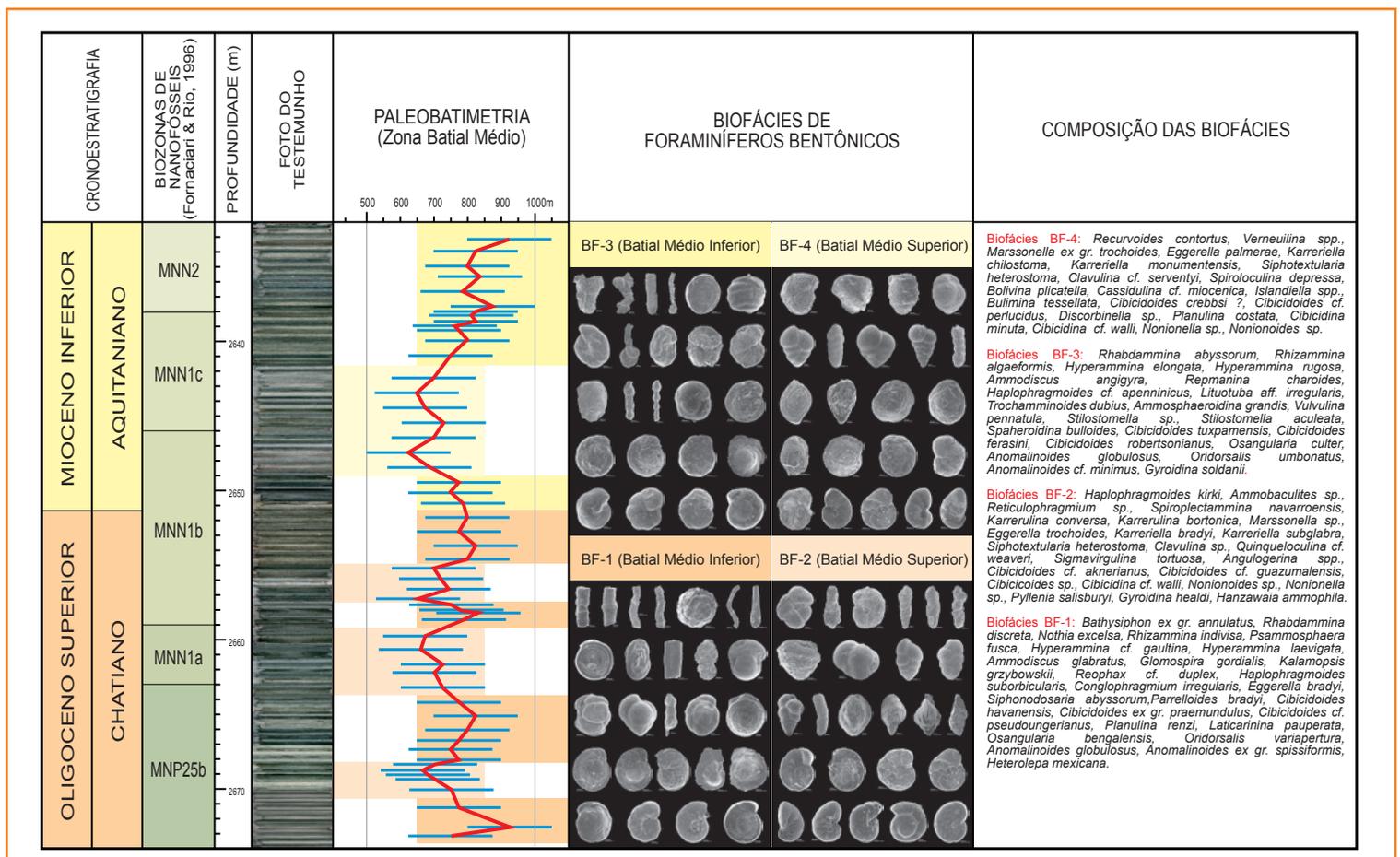


Figura 7 - Evolução paleobatimétrica do Poço A. São identificadas quatro biofácies principais, indicativas das variações batimétricas mais representativas ocorridas na Bacia de Campos no Oligoceno Superior - Mioceno Inferior.

Figure 7 - Paleobathymetry history of Well A. There are four main biofacies related to the major bathymetric changes in the Campos Basin Upper Oligocene-Lower Miocene.

Superior e no Mioceno Inferior (fig. 7), sendo, entretanto, caracterizada por consecutivos e expressivos eventos de aumento e redução batimétrica, os quais permitiram subdividir esta zona em dois compartimentos: Batial Médio Inferior (~500–750 m) e Batial Médio Superior (~750–1000 m). Estes eventos de mudança batimétrica foram registrados a partir da individualização de quatro biofácies de foraminíferos bentônicos, que ocorrem de forma alternada ao longo do intervalo estudado (fig. 7). Vale ressaltar que, embora a composição destas biofácies mantenha-se relativamente inalterada ao longo da seção, as tendências de distribuição e os valores de frequência das espécies que as compõem mostram significativas variações, que representam claramente os compartimentos batimétricos inferidos. No que se refere às mudanças na composição das biofácies, embora sutis, estas ocorrem distintamente entre as duas épocas envolvidas, distinguindo-se, assim, duas biofácies para a sequência oligocênica (BF-1 e BF-2) e duas para a miocênica (BF-3 e BF-4).

Mioceno Superior

Biofácies BF-1 – Batial médio inferior (500–750m), compreende significativa frequência das espécies: *Ammodiscus angigyra*, *Ammosphaeroidina grandis*, *Glomospira charoides*, *Haplophragmoides cf. apenninicus*, *Hyperammina elongate*, *Hyperammina rugosa*, *Lituotuba aff. irregularis*, *Rhizammina algaeformis*, *Rhabdammina abyssorum*, *Thocamminoides dubius*, *Vulvulina pennatula*; *Anomalinoides globulosus*, *Anomalinoides cf. minimus*, *Cibicidoides ferasini*, *Cibicidoides tuxpamensis*, *Cibicidoides robertsonianus*, *Gyroidina soldanii*, *Oridorsalis umbonatus*, *Osangularia culter*, *Sphaeroidina bulloides*, *Stilostomella aculeate*, *Stilostomella sp* (estampa 1).

Biofácies BF-2 – Batial médio superior (750–1.000m), as espécies mais significativas são: *Clavulina cf. serventyi*, *Eggerella palmerae*, *Karrerella chilostoma*, *Karrerella monumentensis*, *Marssonella spp.*, *Recurvoides contortus*, *Siphotextularia heterostoma*, *Verneuilina spp.*, *Bolivina plicatella*, *Bulimina tessellata*, *Cassidulina cf. miocenica*, *Cibicidina minuta*, *Cibicidina cf. walli*, *Cibicidoides crebbsi* ?, *Cibicidoides cf. perlucidus*, *Discorbinella spp.*; *Islandiella spp.*; *Nonionellina spp.*, *Nonion spp.*, *Planulina costata*, *Spiroloculina depressa* (estampa 2).

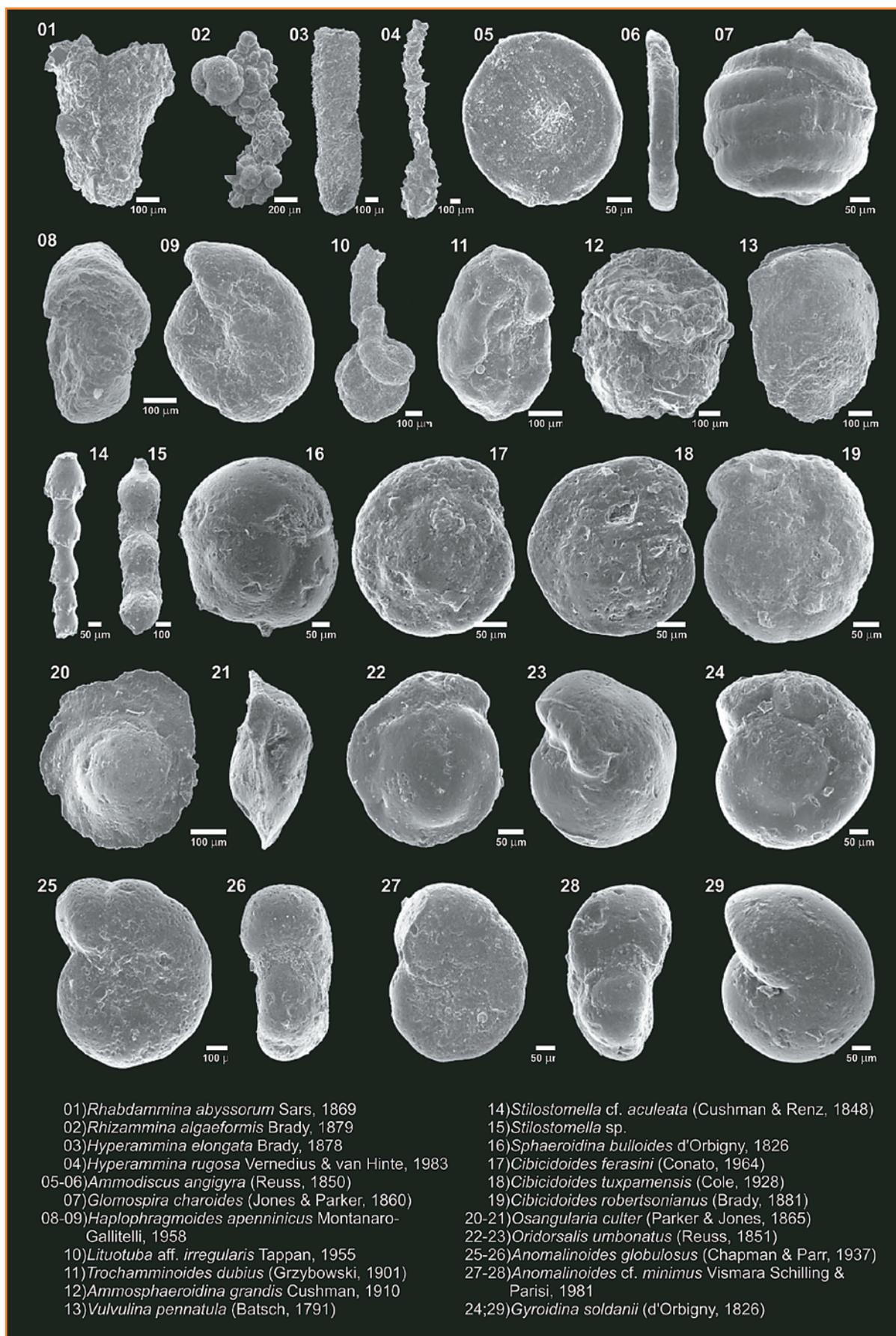
Oligoceno Superior

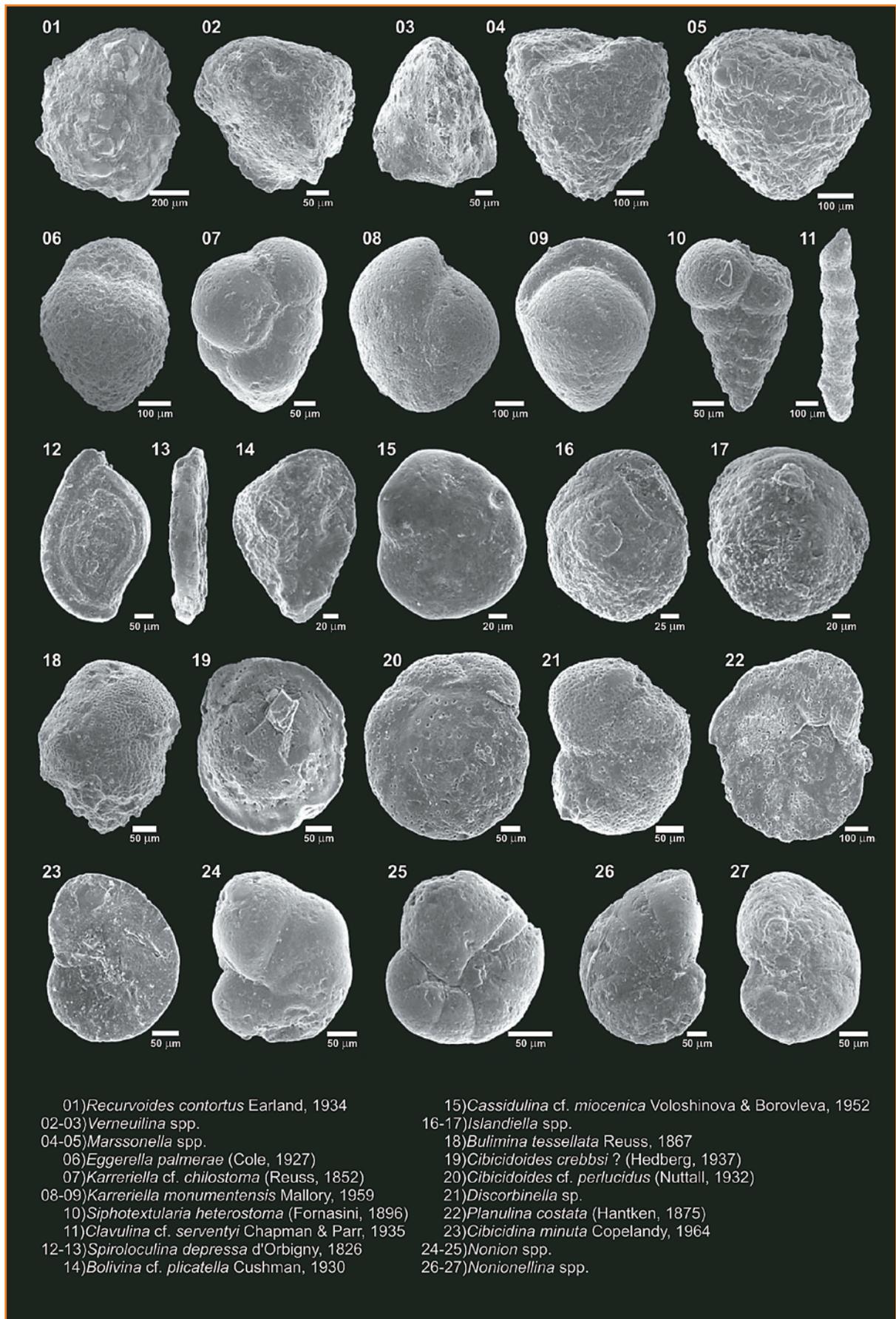
Biofácies BF-1 – Batial médio inferior (500–750m), compreende significativa frequência das espécies: *Ammodiscus glabratus*, *Bathysiphon ex gr. annulatus*, *Conglophragmium irregularis*, *Eggerella bradyi*, *Haplophragmoides suborbicularis*, *Hyperammina laevigata*, *Hyperammina cf. gaultina*, *Glomospira gordialis*, *Kalamopsis grzybowskii*, *Nothia excelsa*, *Psammosphaera fusca*, *Reophax cf. duplex*, *Rhabdammina discreta*, *Rhizammina indivisa*, *Thochamminoides proteus*, *Anomalinoides globulosus*, *Anomalinoides ex gr. spissiformis*, *Cibicidoides havanensis*, *Cibicidoides ex gr. praemundulus*, *Cibicidoides cf. pseudoungerianus*, *Heterolepa mexicana*, *Laticarinina pauperata*, *Osangularia bengalensis*, *Oridorsalis variapertura*, *Planulina renzi* (Estampa 3).

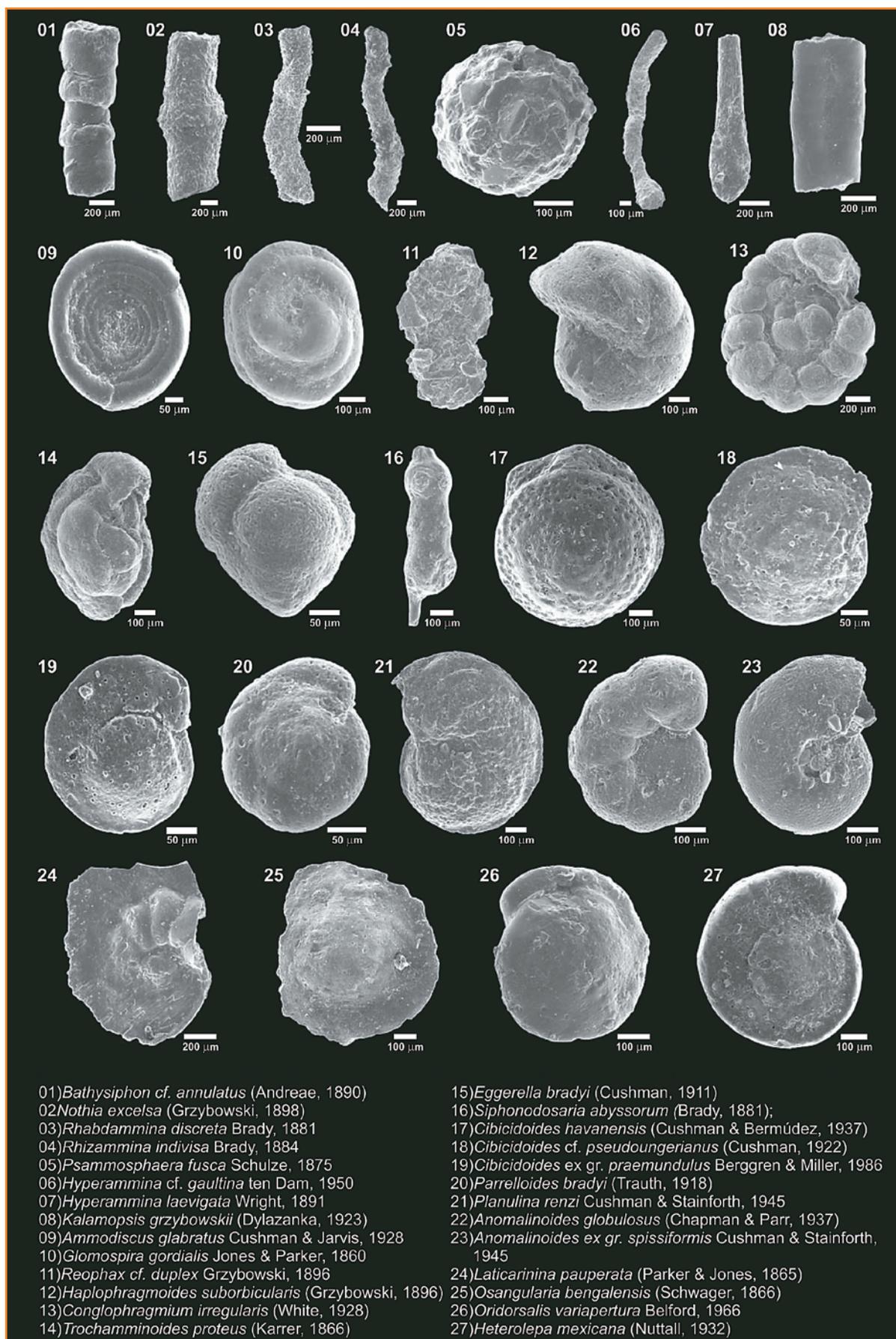
Biofácies BF-2 – Batial médio superior (750–1.000m), as espécies mais significativas são: *Ammobaculites sp.*, *Clavulina sp.*, *Eggerella trochoides*, *Haplophragmoides kirk*, *Karrerella bradyi*, *Karrerella subglabra*, *Karrerulina conversa*, *Karrerulina conversa*, *Marssonella ex gr. trochoides*, *Reticulophragmium amplexans*, *Siphotextularia heterostoma*, *Spiroplectammina navarroensis*, *Angulogerina spp.*, *Cibicidina cf. walli*, *Cibicidoides cf. aknerianus*, *Cibicidoides cf. guazumalensis*, *Cibicidoides sp.*, *Gyroidina healdi*, *Hanzawaia ammophila*, *Nonionella sp.*, *Nonionoides sp.*, *Pullenia Salisbury*, *Quinqueloculina cf. weaveri*, *Sigmavirgulina tortuosa* (estampa 4).

resultados – interpretação e discussão dos dados obtidos

No Oligo-Mioceno, a Bacia de Campos foi intensamente influenciada por mudanças paleoceanográficas, advindas da ocorrência de expressivas alterações climáticas e paleogeográficas no oceano Atlântico Sul, as quais foram responsáveis pela formação da calota polar Antártica. Nesse cenário, modelos paleoclimáticos demonstram que depósitos formados durante regimes glaciais-interglaciais são fortemente controlados pelos ciclos orbitais climáticos da Terra (Palike, *et al.*, 2006; Wade e Palike, 2004). Os resultados obtidos neste estudo vêm ao encontro destes modelos, indicando que a origem dos pares margas-carbonato registrados nos poços

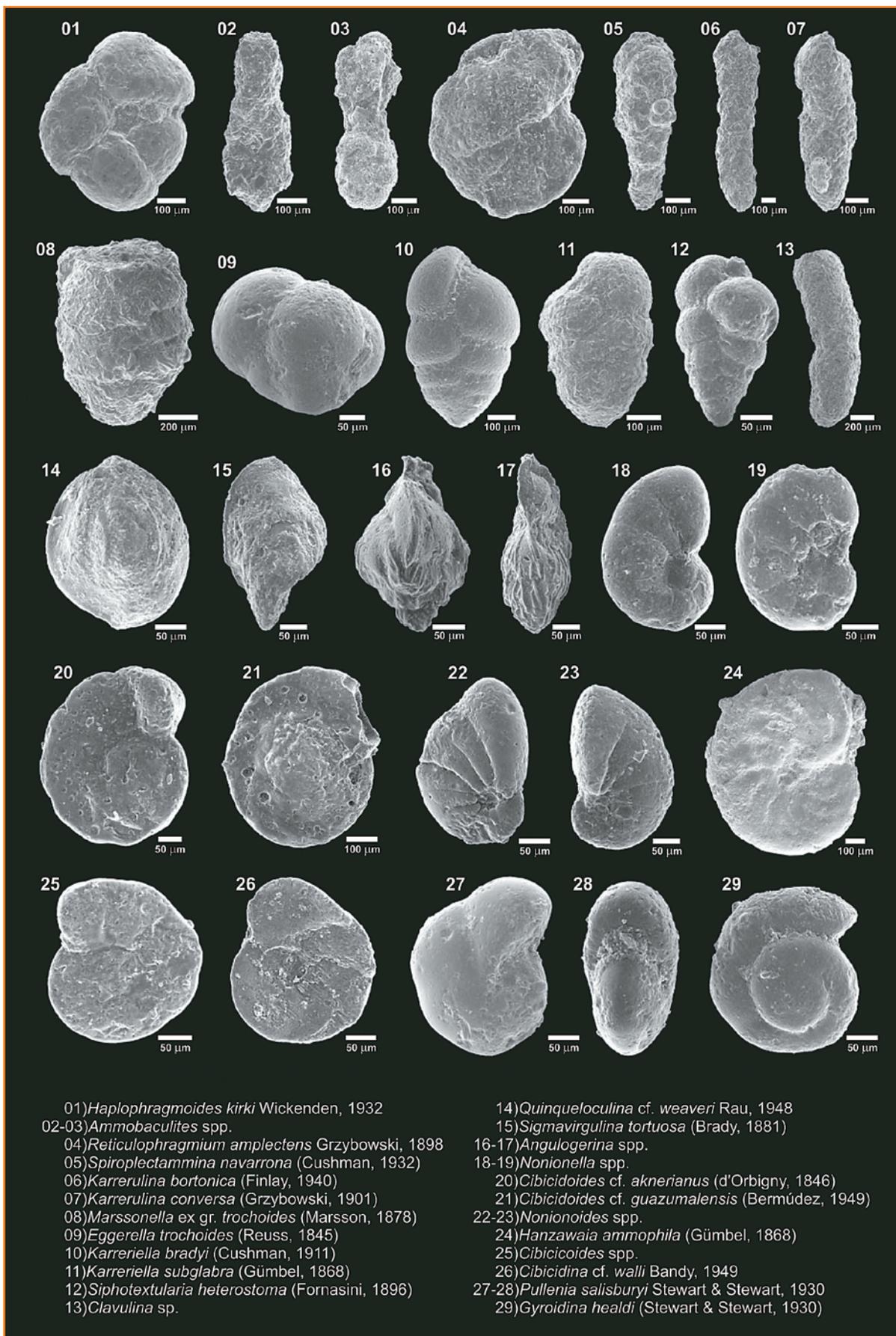






Estampa 4
Biofácies 2.

Plate 4
Biofácies 2.



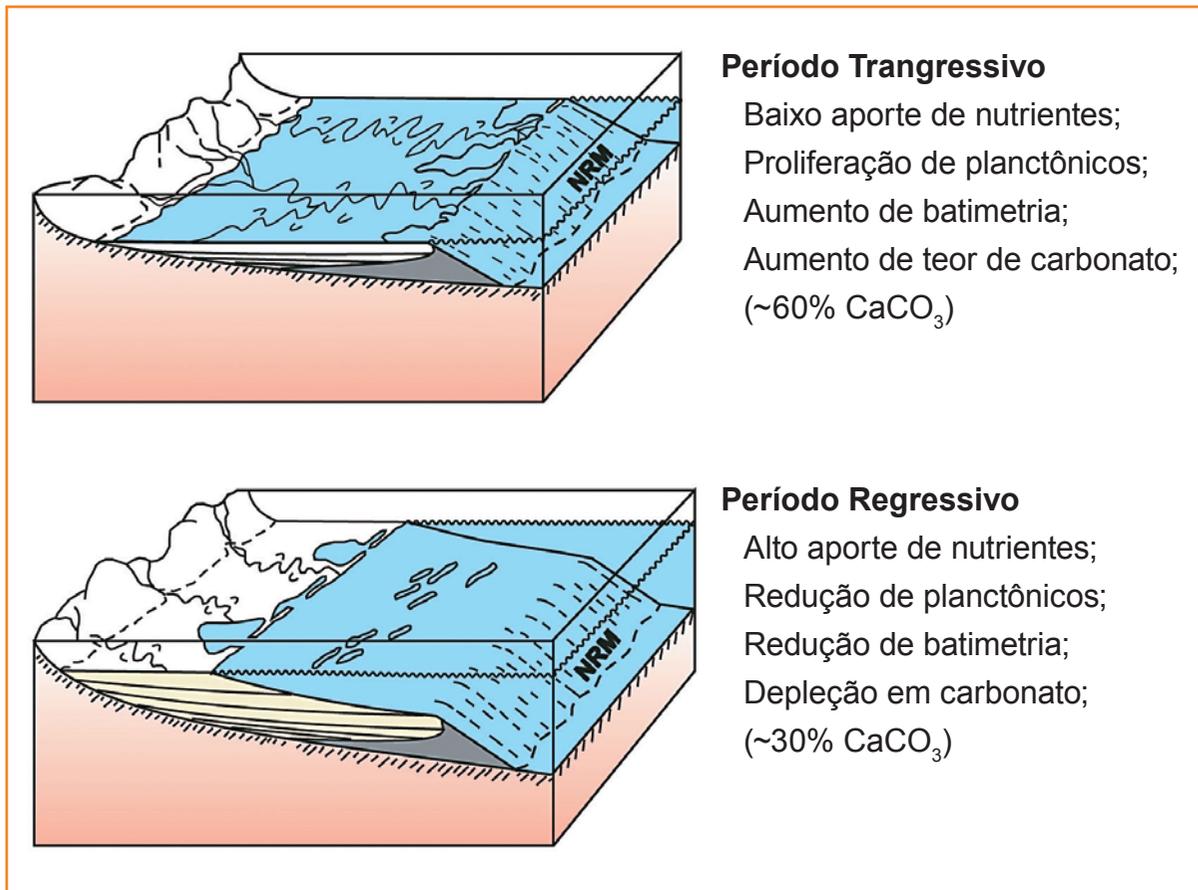


Figura 8
 Modelo esquemático da sedimentação dos pares marga-carbonato da Bacia de Campos.

Figura 8
 Schematic depositional model of the sedimentation of marl-limestone couplets from the Campos Basin.

A e B associam-se às variações glacio-eustáticas do nível relativo do mar, induzidos pela alternância de períodos glaciais e interglaciais no continente Antártico e processos sedimentares locais. O influxo de argila, a produção e o transporte de carbonato variaram nitidamente de forma oscilatória, segundo um padrão cíclico. Nesse contexto, depósitos hemipelágicos com teores variáveis de carbonato e argila podem ser explicados por flutuações na produção e transporte de carbonatos finos, provenientes de foraminíferos e nanofósseis calcários e pelo influxo de argila proveniente do continente, ambos controlados por ciclos transgressivo-regressivos. As camadas claras, mais ricas em carbonato de cálcio, resultam da redução de argila e aumento da produtividade de organismos calcários planctônicos durante períodos transgressivos. Quando a linha de costa se afasta em direção ao continente, dificultando o aporte de argila, a área de plataforma (região de maior produtividade de carbonato de cálcio) é ampliada. Em contrapartida, as camadas escuras mais pobres em carbonato resultam da redução na produção de carbonato e efeito de diluição, induzidos

pelo aporte mais elevado de argila durante períodos regressivos (fig. 8).

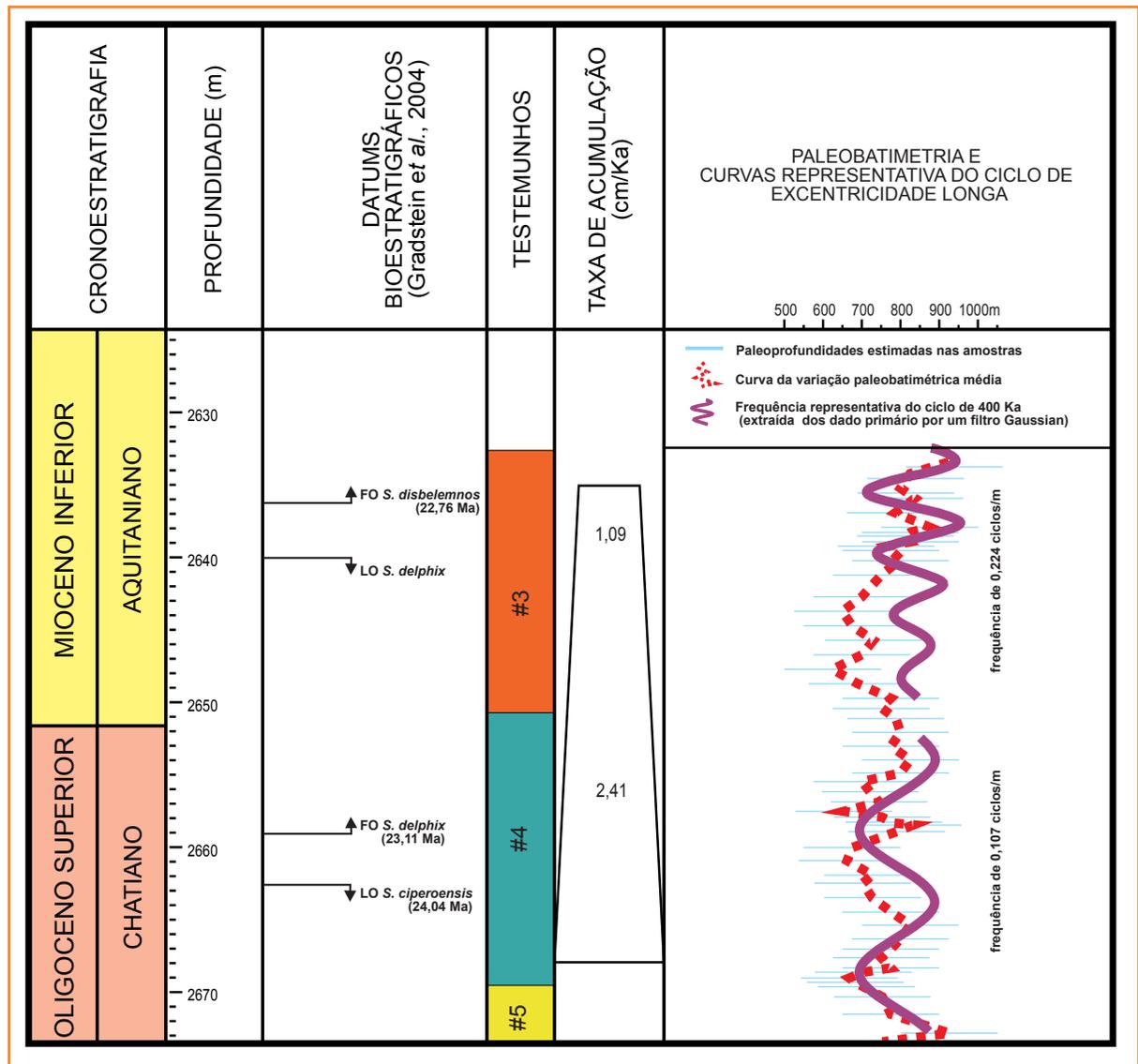
Os dados bioestratigráficos e a análise espectral permitiram o reconhecimento de ciclos sedimentares de frequência similar aos ciclos orbitais climáticos. A curva paleobatimétrica, gerada a partir do estudo detalhado das biofácies de foraminíferos bentônicos, sugere uma oscilação cíclica muito similar em frequência e fase, interpretando-se o ciclo como de excentricidade longa (fig. 9), o que pode sustentar uma origem glacio-eustática comum a ambos os processos. No que diz respeito ao uso da paleobatimetria como indicador indireto de variações do nível relativo do mar, a principal limitação é determinar se a taxa de acumulação e o espaço deposicional se mantiveram constantes durante o intervalo de tempo registrado na seção estudada (cerca de 3,0 Ma). Nesse sentido, dados sísmicos na área dos poços A e B sugerem que essa assertiva pode estar correta (informação verbal de Gamboa, 2009), pois embora pequenas oscilações na taxa de subsidência e na taxa de acumulação sejam esperadas, estas não foram tão significativas. Além disso, tais variações certamente não seguem padrões

Figura 9

Interpretação da ciclicidade no poço A utilizando a curva de excentricidade longa e as mudanças paleobatimétricas. As flutuações da paleopropriedade refletem os ciclos de excentricidade longa (400 Ka).

Figura 9

Interpretation of well A cyclicity using the long eccentricity curve and the paleobathymetry changes. Paleodepth fluctuations reflect the long eccentricity cycles (400 Ka).



oscilatórios cíclicos, segundo uma escala de tempo compatível com o ciclo de excentricidade longa. Porém, por terem um caráter aleatório e frequência mais alta, poderiam causar alguma interferência no registro dos ciclos de obliquidade e precessão. Adicionalmente, observa-se uma discrepância entre a curva que representa o ciclo de 400 Ka e a curva paleobatimétrica em algumas profundidades (e.g. 2.659m), as quais, possivelmente, ilustram momentos de variação na razão taxa de subsidência/aporte sedimentar (fig. 9). Desta forma, interpreta-se que o ciclo de excentricidade longa modulou a curva de paleobatimetria e que esse parâmetro representa, de um modo geral, as variações do nível relativo do mar (na área estudada e para o intervalo de tempo avaliado).

considerações finais

A alternância de episódios glaciais e interglaciais no continente Antártico em consonância com os ciclos orbitais, principalmente com aqueles de maior amplitude temporal, pode sustentar uma origem glacio-eustática para os ritmos margas-folhelhos depositados no Oligo-Mioceno da Bacia de Campos. Possivelmente, o degelo da calota polar durante momentos de excentricidade máxima foi responsável por episódios transgressivos na bacia que, por sua vez, favoreceram a formação de rochas carbonáticas em função do aumento de produtividade dos organismos pelágicos carbonáticos e da simultânea redução no aporte de argila proveniente

do continente. Contrariamente, momentos de excentricidade mínima favoreceram a expansão da calota polar e períodos regressivos na bacia, favorecendo a deposição de rochas pobres em carbonato devido ao aumento de argila e à redução na produção de carbonato pelágico. Observa-se que há um sincronismo entre as variações de alta frequência do nível relativo do mar e a deposição dos pares marga-carbonato, aparentemente associados aos ciclos orbitais que, por sua vez, apresentam sincronismo com as oscilações identificadas na curva paleobatimétrica, especialmente no que se refere aos ciclos de excentricidade longa. Com base nesses resultados, sugere-se uma origem glacio-eustática induzida por ciclos orbitais-climáticos para os processos sedimentares, que resultaram na formação dos ritmitos e nas variações periódicas da paleobatimetria durante o intervalo geológico compreendido entre 22 Ma e 25 Ma.

agradecimentos

Agradecemos à Petrobras pela autorização para a publicação deste trabalho. Os autores gostariam também de expressar agradecimentos aos revisores pelas correções dos manuscritos e sugestões que contribuíram para o amadurecimento deste trabalho.

referências bibliográficas

- ANTUNES, R. L. **Introdução ao estudo dos nanofósseis calcários**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. (Série Didática, v. 1).
- AZAMBUJA, N. C. **The Oligo-Miocene turbidites and associated facies of the Campos Basin, Offshore Brazil**. 1990. 456 f. Tese (Doutorado) – Imperial College of London, London, 1990.
- BANDY, O. L. General correlation of foraminiferal structure with environment. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 21., Norden, Copenhagen, 1960. (Rep. Session.) **Anais...** Norden, Copenhagen, 1960. Part. 22. p. 7-19.
- BOWN, P. R.; YOUNG, J. R. Techniques. In: BOWN, P.R. (Ed.). **Calcareous Nannofossil Biostratigraphy**. London: Chapman and Hall. 1998. p. 17-28. (British Micropalaeontological Society Series.)
- BELANGER, P. E.; BERGGREN, W. A. Neogene benthic foraminifera of the Hatton-Rockall Basin. **Micropaleontology**, v. 32, p. 324-356, 1986.
- BOERSMA, A. **Handbook of Common Tertiary Uvigerina**. New York: Microclimates Press, Stony Point, 1984. 207 p., 12 charts, 81 plates.
- BOLLI, H. M.; BECKMANN, J-P.; SAUNDERS, J. B. **Benthic foraminiferal biostratigraphy of the south Caribbean region**. Cambridge: Cambridge University Press, 408 p. 1994.
- BOLTOVSKOY, E. On the benthonic bathyal-zone foraminifera as stratigraphic guide fossils. **Journal of Foraminiferal Research**, v. 10, p. 163-172. 1980.
- BOLTOVSKOY, E.; WATANABE, S., TOTAH, V. I.; OCAMPO, J. V. Cenozoic benthic bathyal foraminifera of DSDP Site 548 (North Atlantic). **Micropaleontology**, v. 38, p. 183-207, 1992.
- BORNMALM, L. Taxonomy and paleoecology of late Neogene benthic foraminifera from the Caribbean Sea and eastern equatorial Pacific Ocean. Oslo. **Fossil and Strata**, v. 41, p.1-96. 1997.
- CHARNOCK, M. A.; JONES, R. W. Agglutinated foraminifera from the Paleogene of the North Sea. In: HEMLEBEN, C.; KAMINSKI, M. A.; KUHN, W.; SCOTT, D. B. (Eds.). **Paleoecology, Biostratigraphy, Paleoceanography and Taxonomy of Agglutinated Foraminifera**. 1990. p. 433-505. Kluwer Academic Publishers. NATO Scientific Affairs Division (Series C: Mathematical and Physical Sciences, v. 327).
- CRAMER, B. S.; WRIGHT, J.; KENT, D.V.; AUBRY, M-P. Orbital climate forcing of $\delta^{13}C$ excursions in the late Paleocene-early Eocene (chrons C24n-C25n). **Paleoceanography**, v. 18, p. 1097, 2003.
- CULVER, S. J. New foraminiferal depth zonation of the Northwestern Gulf of Mexico. **Palaios**, v. 3, p. 69-85, 1988.

- CULVER, S. J.; BUZAS, M. A. Foraminifera: distribution of provinces in the Gulf of Mexico. **Nature**, v. 290, p. 328-329, 1981.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 1. Astrorhizidae. **Bulletin United States National Museum**, v.104, p. 1-111, 1918.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 2. Lituolidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 2, p. 1-111, 1920.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 3. Textulariidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 3, p. 1-149, 1922.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 4. Lagenidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 4, p. 1-228, 1923.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 5. Chilostomellidae and Globigerinidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 5, p. 1-55, 1924.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 7. Nonionidae, Camerinidae, Peneroplidae and Alveolinidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 7, p. 1-79, 1930.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 8. Rotaliidae, Amphisteginidae, Calcarinidae, Cymbaloporettidae, Globorotaliidae, Anomalinidae, Planorbulinidae, Rupertiidae and Homotremidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 8, p. 1-179, 1931.
- CUSHMAN, J. A. A monograph of the foraminiferal family Verneulinidae. **Special Publications Cushman Laboratory for Foraminiferal Research**, n. 7, p. 1-157, 1937a.
- CUSHMAN, J. A. A monograph of the foraminiferal family Valvulinidae. **Special Publications Cushman Laboratory for Foraminiferal Research**, n. 8, p. 1-210, 1937b.
- CUSHMAN, J. A. A monograph of the subfamily Virguliniinae of the foraminiferal family Buliminidae. **Special Publications Cushman Laboratory for Foraminiferal Research**, n. 9, p. 1-228, 1937c.
- CUSHMAN, J. A. The foraminifera of the Atlantic Ocean. Part 7. Nonionidae, Camerinidae, Peneroplidae and Alveolinidae. **Bulletin United States National Museum**, v. 104, n. 7, p. 1-79, 1939.
- GRADSTEIN, F. M.; OGG, J. G.; SMITH, A. G. **A Geologic Time Scale**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 589 p.
- INGLE, Jr., J. C. Cenozoic paleobathymetry and depositional history of selected sequences within the southern California continental borderland. **Special Publication of Cushman Foundation**, n. 19, p. 163-195, 1980.
- JONES, R. W. **The Challenger Foraminifera**. Oxford: Oxford University Press, 1994, 149 p.
- KAMINSKI, M. A.; GRADSTEIN, F. M. Atlas of Paleocene Cosmopolitan Deep-Water Agglutinated Foraminifera. **Grzybowski Foundation**, n. 10, 2005. 547 p. (Special Publication).
- KATZ, M. E.; MILLER, K. G. Neogene benthic foraminiferal biofacies of the New Jersey transect. In: POAG, C. W.; WATTS, A. B. *et al.* **Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project**, Washington, v. 95, p. 299-311, 1987.
- KATZ, M. E.; TJALSMA, R. C. ; MILLER, K. G. Oligocene bathyal to abyssal benthic foraminifera of the Atlantic Ocean. **Micropaleontology**, v. 49, p. 1-44, supplement 2, 2003.
- KOHL, B. Early Pliocene Benthic Foraminifers from the Salina Basin, southeastern Mexico. **Bulletins of American Paleontology**, v. 88, n. 12, p. 1-173, 1985.
- KOUTSOUKOS, E. A. M. Distribuição paleobatimétrica de Foraminíferos bentônicos do Cenozóico: margem Continental Atlântica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 8., 1983, Brasília. **Anais...** Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1985. p. 355-370. (Coletânea de trabalhos paleontológicos.)
- KUHNT, W.; KAMINSKI, M. A. Paleoecology of Late Cretaceous to Paleocene deep-water agglutinated foraminifera from the North Atlantic and Western Tethys. In: HEMLEBEN, C.; KAMINSKI, M. A.; KUHNT, W.;

- SCOTT, D. B. (Eds.). **Paleoecology, Biostratigraphy, Paleoceanography and Taxonomy of Agglutinated Foraminifera**. Dordrecht, 1990. p. 433-505. (NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, v. 327).
- KUHNT, W.; HESS, S.; JIAN, Z. Quantitative composition of benthic foraminiferal assemblages as a proxy indicator for organic carbon flux rates in the South China Sea. **Marine Geology**, v. 156, p. 123-157, 1999.
- LASKAR, J.; ROBUTEL, P.; JOUTEL, F.; GASTINEAU, M.; CORREIA, A. C. M.; LEVRARD, B. A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. **Astronomy and Astrophysics**, v. 428, p. 261-285, 2004.
- LOEBLICH, A. R. JR.; TAPPAN, H. **Foraminiferal genera and their classification**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1988, 970 p., 2v.
- LOEBLICH, A. R. JR.; TAPPAN, H. Foraminifera of the Sahul Shelf and Timor Sea. **Special Publication Cushman Foundation for Foraminiferal Research**, n. 31, 661 p, 393 plates, 1994.
- LOURENS, L.; SLUJS, A.; KROON, D.; ZACHOS, J. C.; THOMAS, E.; RÖHL, U.; BOWLES, J.; RAFFI, I. Astronomical pacing of late Paleocene to early Eocene global warming events. **Nature**, v. 435, p. 1083-1087, 2005.
- MILLER, K. G.; KATZ, M. E. Eocene benthic foraminiferal biofacies of the New Jersey transect. In: POAG, C. W.; WATTS, A. B.; *et al.* **Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project**, v. 95, Washington, p. 267-298, 1987.
- MURRAY, J. W. **Ecology and paleoecology of benthic foraminifera**. London: Longman Scientific and Technical, 1991. 397 p.
- NATLAND, M. L. Paleocology of West coast Tertiary sediments, In: LADD, H. (Ed.). Treatise on marine ecology and paleoecology. **Geological Society of America**, Memoir, 57, v. 2, p. 543-571, 1957.
- PALIKE, H.; NORRIS, R. D.; HERRLE, J. O.; WILSON, A. P.; COXALL, H. K.; LEAR, C. H.; SHACKLETON, J. N.; TRIPATI, A. K.; WADE, S. B. The heartbeat of the Oligocene climate system. **Science**, v. 314, p. 1894-1898, 2006.
- PAILLARD D.; LABEYRIE, L.; YIOU, P. Macintosh program performs time-series analysis. **EOS Transactions**, p. 379, 1996. American Geophysical Union, 77.
- POAG, C. W. **Ecologic Atlas of Benthic Foraminifera of the Gulf of Mexico**. Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 174 p., 64 plates, 1981.
- ROBERTSON, B. E. Systematics and Paleocology of the benthic Foraminifera from the Buff Bay section, Miocene of Jamaica. **Micropaleontology**, v. 44, supplement 2, p. 1-266, 1998.
- SAGEMAN, B. B.; RICH, J.; ARTHUR, M. A.; BIRCHFIELD, G. E.; DEAN, W. E. Evidence for Milankovitch Periodicities in Cenomanian-Turonian lithologic and Geochemical Cycles, Western Interior U.S.A. **Journal of Sedimentary Research**, v. 67, p. 286-302, 1997.
- SLITER, W. V.; BAKER, R. A.. Cretaceous bathymetric distribution of benthic foraminifera. **Journal of Foraminiferal Research**, v. 2, p. 167-183, 1972.
- TJALSMA, R. C.; LOHMANN, G. P., Paleocene-Eocene bathyal and abyssal benthic foraminifera from the Atlantic Ocean. **Micropaleontology, Special Publication**, n. 4, 90p., 1983.
- VAN HINSBERGEN, D. J. J.; KOUWENHOVEN, T. J.; VAN DER ZWAAN, G. J. Paleobathymetry in the backstripping procedure: Correction for oxygenation effects on depth estimates. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 221, p. 245-265, 2005.
- VAN MORKHOVEN, F. P. C. M.; BERGGREN, W. A.; EDWARDS, A. S. Cenozoic cosmopolitan deep-water benthic foraminifera. **Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine**, Memoir 11, 421 p. 1986.
- WADE, B. S.; PALIKE, H. Oligocene climate dynamics. **Paleoceanography**, v. 19, 2004. PA4019.

expanded abstract

Cyclicity in deep-water (pelagic and hemipelagic sedimentary deposits) is one of the commonest and most prominent features within the Campos Basin Oligocene-Miocene section, southeastern Brazilian margin. The cores 3, 4 and 5 of well A show bathyal facies with rhythmic intercalations of limestone and marlstones deposited between 22 and 25 Ma. This sequence was deposited in response to glacial-eustatic high-frequency oscillations established after the final structural breakup of South America and Antarctica. These facies with periodic or quasi-periodic patterns have been associated with climatic cycles. A spectral analysis of time series composed of numerical data that represent a proxy indicator of calcium carbonate content combined with a detailed biostratigraphic study show that the limestone/marlstone couplets were deposited in the periodicity of Milankovitch cycles. Additionally, a periodical pattern to the benthic foraminifera assemblages was recognized, these oscillations consistently match the long eccentricity cycle recognized in the spectral analysis.

*Samples were collected from the selected well A for calcareous nannofossil and benthic foraminifer analyses. The biostratigraphic analyses were based on qualitative data of calcareous nannofossils. Herein the first occurrence of *Sphenolithus disbelemnos* (22.76 Ma) and the last occurrences of *Sphenolithus delphix* (23.11 Ma) and *Sphenolithus ciperoensis* (24.04 Ma) were used as biostratigraphic markers. The ratio between the interval thickness limited by the biostratigraphic markers and its duration indicates accumulation rates ranging from 1.09 to 2.41 cm/Ka. The accumulation rate was used to calibrate the cyclostratigraphy analysis and determine the time span of the cycles.*

Benthic foraminifera provide a useful means for estimating paleobathymetry. Patterns of foraminiferal assemblages are generally more significant in determining paleobathymetry than the patterns of key species to which is attributed isobathyal significance. In this study, data collecting and the processing strategies were selected to categorize samples on the basis of their proportional contents, and to identify clearly defined groupings or biofacies. The species counting was standardized in percentages for all samples, the data compiled were plotted on a distribution

chart and the distribution and frequency patterns evaluated to define which assemblages were clearly controlled by bathymetry. Most of the benthic foraminifera species used to define the biofacies are indicative of a certain maximum or minimum depositional paleodepth. Therefore, the median point of the bathymetric ranges for each sample establishes a relative paleobathymetry curve for the section. Generally the depth was restricted to the Middle Bathyal zone, but it is strongly affected by numerous and expressive falling and rising events, which subdivided the Middle Bathyal zone in two subzones: Lower Middle Bathyal and Upper Middle Bathyal. The benthic foraminiferal assemblages are similar throughout the studied section, but the frequency patterns show expressive variations suggesting different bathymetric domains.

To perform the time series analyses of well A, the data-set was divided in two matrixes. The first represents core 3, and the second was obtained by adding the values related to cores 4 and 5. This procedure aimed to isolate intervals with very different accumulation rates. The spectral analysis was performed using the software Analyseries 2.0 by applying the Blackman-Tukey method. The frequency curve of the long eccentricity cycle was extracted using a Gaussian filter and then compared with the paleobathymetry curve.

Based on the limit values of frequency bands and applying the accumulation rate of 1.09 cm/ka to core 3 and 2.41 cm/ka to cores 4 and 5, the time span of the orbital cycles related to long and short eccentricity, obliquity and precession were determinate. The accumulation rate was computed as the ratio between the interval thickness (3.8m for core 3 and 22.45m for cores 4 and 5) and their time span (0.35 and 0.93 Ma) established from the biostratigraphic data.

Regarding the use of the paleobathymetry curve as a proxy indicator of the sea level change, the main constraints include a most likely non-uniform accumulation rate and poor accommodation rate control. Previous seismic stratigraphic studies (not included herein) suggest that apparently the ratio between the accommodation and thermal subsidence remains almost constant during most of the studied section deposition-time. Even though such assumptions can be considered, fluctuations in both accommodation rate and thermal subsidence is theoretically expected. However, long term paleobathymetry changes were considered as an

eustatic sea-level proxy. Hence only the long eccentricity cycle was correlated with the paleobathymetry curve (assuming that benthic foraminiferal assemblages are indicative of the paleobathymetry).

In conclusion, glacial-interglacial alternate episodes in the Antarctica Continent paced by the orbital cycles, mainly for long range orbital cycles, can support the glacio-eustatic origin of the rhythmic intercalations of limestone and marlstones recorded in the Campos Basin Oligocene-Miocene section. Melting ice sheets in Antarctica, during eccentricity maxima may have favored flooding and the limestone deposition by the increase of pelagic carbonate productivity and decreasing of clay content. Conversely, eccentricity

minima may have been responsible for regressive phases during glacial events, favoring the deposition of the marlstones by the increase of continental runoff and a carbonate productivity reduction. There is unequivocal evidence of synchronicity between high-frequency sea-level fluctuations and the limestone-marlstone couplet deposition. Also the sea-level oscillation appears to be linked to the long range orbital cycles and benthic foraminiferal oscillations. The study results indicate that in the Campos Basin the long eccentricity cycle (400 Ka) has played an essential role in modulating the relative sea level changes and the limestone-marlstone couplet deposition during the Oligocene-Miocene.

autores



Valquíria Porfírio Barbosa
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Geociências

e-mail: valquiriapb@yahoo.com.br

Valquíria Porfírio Barbosa graduada em Geologia pela Universidade Federal do Amazonas em 1995, mestra em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 1998 e doutora em Geociências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2002. Atuou como geóloga especialista em Bioestratigrafia e Paleoecologia na Petrobras, no Cenpes de 2003 a 2011. Está vinculada ao Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas como Professora Visitante, responsável pelas áreas de Paleontologia e Geologia Histórica.



Armando Antonio Scarparo Cunha
Unidade de Operações de Exploração e Produção da Amazônia
Exploração
Gerência de Sedimentologia e Estratigrafia

e-mail: scarparo@petrobras.com.br

Armando Antonio Scarparo Cunha graduado em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 1985, Mestre em Geociências pela UFRGS em 1991 e Doutor em Geociências pela UFRGS em 2001. Atuou como consultor técnico na Petrobras, no Cenpes por 23 anos. Atualmente exerce atividade gerencial junto ao grupo de Estratigrafia e Sedimentologia da Unidade de Operações de Exploração e Produção do Amazonas (UO-AM).



Seirin Shimabukuro
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)
P&D em Geociências
Gerência de Bio-Estratigrafia e Paleoecologia

e-mail: seirin@petrobras.com.br

Seirin Shimabukuro graduado em Geologia pela Universidade Federal de São Paulo, mestre em Geociências pela UFRGS. Atua como consultor técnico na Petrobras, no Cenpes, onde trabalha por mais de 30 anos. Especialista na área de estratigrafia, com ênfase em bioestratigrafia com nanofósseis calcários, paleoclimatologia e paleoceanografia.



Luiz Antônio Pierantoni Gamboa
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Centro de Estudos Gerais
Instituto de Geociências

e-mail: luizgamboa@gmail.com

Luiz Antônio Pierantoni Gamboa graduado em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1972), mestrado em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1975) e doutorado em Geologia e Geofísica Marinha - Columbia University (1981). Atuou como geólogo sênior e consultor técnico da Petrobras até o ano de 2010. Atualmente é professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense, lecionando as disciplinas de Estratigrafia Sísmica e Oceanografia.