

ESTRATIGRAFIA ISOTÓPICA DE SEQUÊNCIAS CARBONÁTICAS CENOZOICAS DA COSTA NORTE DO BRASIL

ISOTOPE STRATIGRAPHY OF CENOZOIC CARBONATE SEQUENCES OF
BRAZILIAN NORTHERN COAST

René Rodrigues e Tkae Takaki^(*)

RESUMO — Um dos mais importantes, e provavelmente mais difíceis, problemas em geologia consiste em estabelecer o sincronismo de eventos em escala global. Muitas das oscilações isotópicas constatadas em seqüências carbonáticas são, freqüentemente, abruptas e facilmente correlacionáveis a grandes distâncias, refletindo grandes variações paleoceanográficas e paleoclimatológicas. Tais variações têm sido utilizadas cada vez com mais freqüência como marcos cronoestratigráficos. O estudo dos isótopos de carbono e oxigênio de seqüências carbonáticas da costa norte do Brasil possibilitou a identificação de marcos estratigráficos no topo do Paleoceno, na passagem Eoceno Superior-Oligoceno Inferior, no limite Oligoceno Inferior-Oligoceno Superior e no Mioceno Médio. Apresenta-se a correlação destes marcos com os mesmos eventos constatados em seqüências carbonáticas do Atlântico Norte e Sul (*Deep Sea Drilling Project*).

(Originais recebidos em 03-IX-87.)

1 — INTRODUÇÃO

A evolução oceanográfica e climática do Cenozóico constitui um registro de progressivos resfriamentos e glaciações das regiões polares e, talvez, de algum aquecimento nas regiões tropicais (SAVIN *et alii*, 1975; SHACKLETON & KENNETT, 1975; LOUITIT *et alii*, 1983). O registro do volume de gelo acumulado, potencialmente avaliável a partir de estudos da relação isotópica do oxigênio, é de especial interesse, em virtude de poder estar relacionado a significativos eventos globais de variação do nível do mar. Do ponto de vista analítico, uma mudança do volume de gelo equivalente a 5-10 metros de mudança do nível do mar estaria no limite de detecção (SHACKLETON, 1986).

Esses eventos globais que provocariam mudanças na geometria e na circulação das bacias oceânicas poderiam afetar sensivelmente a vida orgânica destas e, por conseqüência, a composição isotópica do carbono disponível para a formação de carbonatos.

Assim, a utilização das variações isotópicas do carbono e do oxigênio como ferramenta de correlação estratigráfica

pode constituir um precioso apoio a outras metodologias tradicionalmente empregadas para esse fim. Como algumas dessas variações são relativamente abruptas, elas também poderiam constituir bons marcos estratigráficos.

Este estudo se propõe mostrar as variações isotópicas observadas e sua possível aplicação nas correlações estratigráficas, considerando tratar-se de uma seqüência carbonática de plataforma rasa. Os dados obtidos são comparados com aqueles apresentados por outros autores em amostras de mesma idade do Atlântico Norte (LÉTOLLE & RENARD, 1980) e Sul (SHACKLETON, 1986) (fig. 1).

2 — METODOLOGIA

As análises isotópicas do carbono e do oxigênio foram efetuadas segundo as técnicas padrão estabelecidas por CRAIG (1957), sempre sobre rocha total.

Os resultados, tanto para o carbono como para o oxigênio, são registrados em desvios por mil em relação ao padrão internacional PDB:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ ou } \delta^{18}\text{O} = \frac{\text{RA} - \text{RP}}{\text{RP}} \times 1000,$$

1 - Setor de Geoquímica, Divisão de Exploração, Centro de Pesquisas.

(*) Trabalho apresentado no X Congresso Brasileiro de Paleontologia, 19-25 de julho de 1987, Rio de Janeiro.

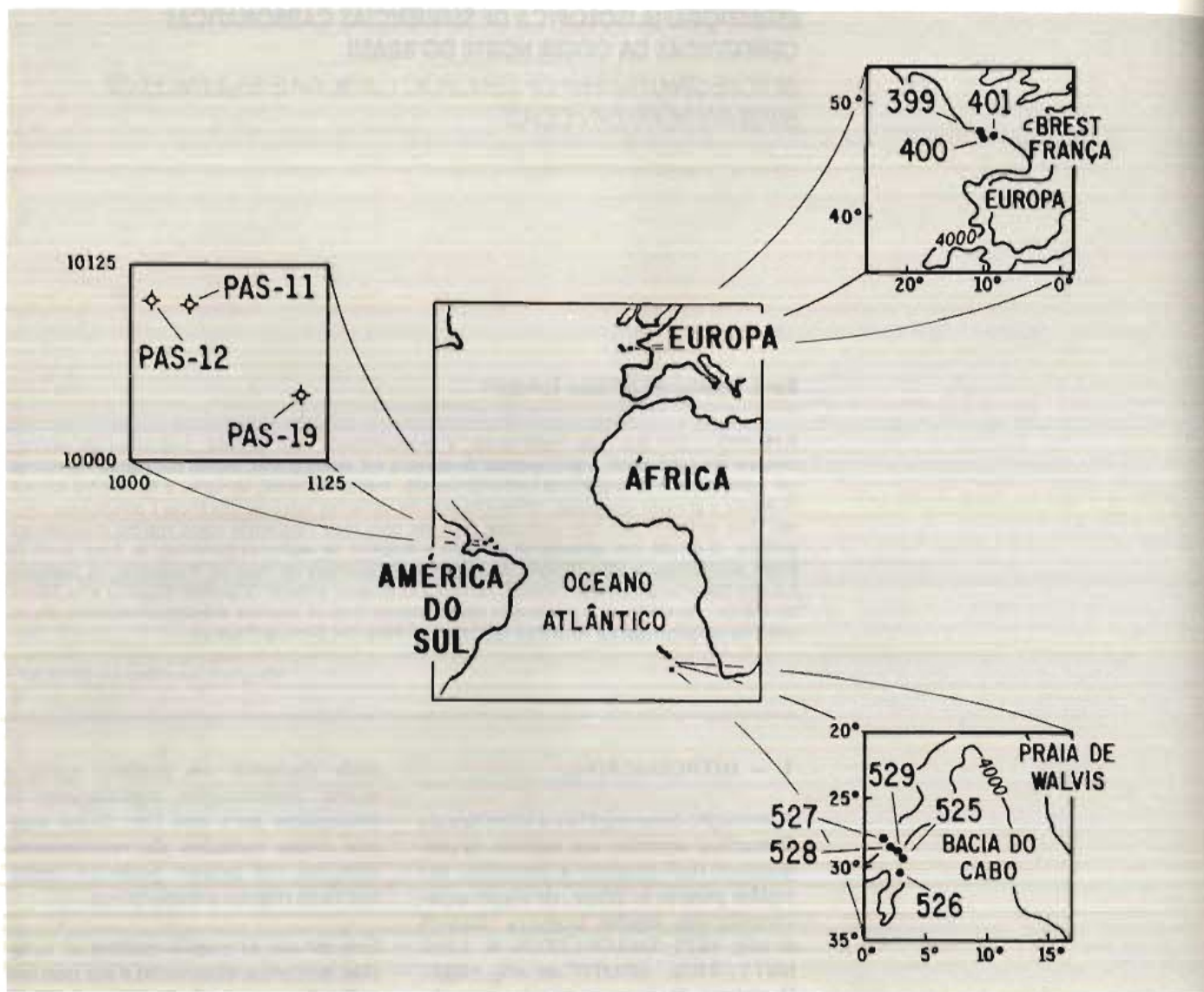


Fig. 1 - Mapa de localização das amostras estudadas.

onde RA e RP referem-se, respectivamente, às relações isotópicas do elemento considerado na amostra (RA) e no padrão (RP).

A fim de determinar as possíveis influências da matriz não-carbonática e da matéria orgânica presente, procedeu-se à determinação dos teores de carbono orgânico total e do resíduo insolúvel de todas as amostras analisadas.

3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 - Carbono Orgânico e Resíduo Insolúvel

As amostras analisadas apresentaram, normalmente, teores de carbono orgânico e resíduo insolúvel inferiores, respectivamente, a 0,2% e a 10% (fig. 2). Assim, com os baixos valores encontra-

dos, é pouco provável que esses dois fatores exerçam uma influência acentuada nos resultados isotópicos.

3.2 - Isótopos de Carbono

3.2.1 - Paleoceno

Estudos isotópicos efetuados com cocólitos e foraminíferos planctônicos revelaram, na base do Paleoceno, valores isotopicamente mais leves em aproximadamente 1 ‰ em relação aos observados no Cretáceo Superior, enquanto nenhuma variação foi observada nas carapaças de foraminíferos bentônicos (HE *et alii*, 1984; SHACKLETON *et alii*, 1984; ZACHOS *et alii*, 1985). Essas diferenças de comportamento são mais bem explicadas em termos de um aumento da proporção de ^{12}C nas águas superficiais, em função de uma diminuição da razão de fotossíntese sobre a superfície do

oceano. Considera-se que esse evento tenha ocorrido sincronicamente em todo o oceano (SHACKLETON, 1986).

Embora não ocorram carbonatos no Cretáceo Superior dos poços estudados da plataforma norte do Brasil, verifica-se que os calcários da base do Paleoceno são isotopicamente mais leves (menos positivos) em relação ao restante do Paleoceno e Eoceno (fig. 2, A). Esse evento, provavelmente correlacionável ao anteriormente citado, corresponde, na curva de VAIL *et alii* (1977), a um período de nível do mar relativamente baixo. A diminuição da área da plataforma, mais suscetível à ação de organismos fotossintéticos, talvez pudesse explicar o relativo enriquecimento em ^{12}C observado nos carbonatos analisados. Para explicar esse evento, THIERSTEIN & BERGER (1978) postularam uma injeção de água doce vinda do Ártico, pela aber-

tura tectônica da passagem do Labrador, que isolava o Oceano Ártico do Atlântico durante o Cretáceo. Devido a esse fato, a salinidade das águas superficiais teria diminuído acentuadamente, produzindo uma extinção em massa da vida planctônica nesse tempo, o que explicaria uma queda abrupta da ação fotossintética e, conseqüentemente, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos constatados.

O topo do Paleoceno, ao contrário do que ocorre em sua base, é caracterizado por valores de $\delta^{13}\text{C}$ muito positivos, com um retorno a valores menos positivos na base do Eoceno. Esse evento isotopicamente positivo foi observado nas carapaças de foraminíferos planctônicos, bentônicos e sobre rocha total de amostras do Atlântico Sul e em rocha total na Plataforma do Pará-Maranhão (fig. 2, respectivamente B1 e B). Isto significa que todo o reservatório de CO_2 do oceano foi afetado, constituindo, portanto, um bom marco para correlações estratigráficas. Esse evento global é atribuído a diferentes causas: redução da proporção do oxigênio dissolvido em

águas profundas (evento anóxico?; SHACKLETON *et alii*, 1985) e mudanças do nível do mar (WOODRUFF & SAVIN, 1985; MILLER & FAIRBANKS, 1985), do clima (BERNER *et alii*, 1983) ou da composição da atmosfera (SHACKLETON, 1985).

3.2.2 - Eoceno

Durante esse intervalo de tempo, embora tenham sido observadas algumas variações isotópicas, não foi possível estabelecer um adequado sincronismo desses eventos em relação aos dados disponíveis do Atlântico Sul e Norte (fig. 2).

Apesar da fragilidade das datações dessa seqüência carbonática, na costa norte do Brasil, nota-se uma razoável modificação isotópica, que poderia demarcar a passagem do Eoceno Médio para o Eoceno Superior (fig. 2, C). Tal demarcação, caso verdadeira, corresponderia a uma variação do nível do mar, conforme observado na curva de VAIL *et alii* (1977).

3.2.3 - Oligoceno

A explicação dos eventos que caracterizam o intervalo entre o topo do Eoceno Superior e a base do Oligoceno Inferior ainda é muito discutida. Aparentemente, um bom número de pesquisadores acredita numa rápida diminuição da temperatura das águas de fundo do Oceano. Essa mudança climática, provavelmente global e sincrônica, também corresponde a uma variação no nível do mar segundo a curva de VAIL *et alii* (1977). Essas modificações poderiam causar, respectivamente, um decréscimo de organismos que realizam a fotossíntese e a diminuição da zona fótica. Ambos os fatos levariam a um enriquecimento de ^{12}C no CO_2 dissolvido na água do mar, e conseqüentemente, à formação de carbonatos isotopicamente mais negativos do que o restante da seção eocênica. Essa brusca mudança isotópica na passagem Eoceno-Oligoceno (fig. 2, D) poderia constituir o segundo bom marco estratigráfico da seqüência cenozóica da costa norte do Brasil, embora, nas amostras do Atlântico Sul e Norte, essa variação seja bem menos evidente (fig. 2, D1).

No Oligoceno Médio, um novo e acentuado episódio isotopicamente negativo foi constatado nos isótopos tanto de carbono como de oxigênio (fig. 2, E). Poderia talvez representar, por seu posicionamento estratigráfico, o aumento da calota polar Antártica (KEIGWIN & KELLER, 1984; MILLER *et alii*, 1985) e o grande rebaixamento do nível do mar segundo a curva de VAIL *et alii* (1977). Esses eventos globais explicariam o episódio isotopicamente negativo do carbono, da mesma forma como o ocorrido na passagem do Eoceno ao Oligoceno. No entanto, os valores muito negativos de oxigênio, ao contrário do que seria esperado com o aumento da calota polar, e a variação de aproximadamente 3,0 ‰ nos isótopos de carbono poderiam sugerir a superposição de um efeito diagenético em ambiente vadoso. Isto teria acentuado os valores isotopicamente negativos nos carbonatos pela formação de calcita a partir de água meteórica mais rica em ^{16}O e enriquecida em ^{12}C pelo aumento de CO_2 derivado da oxidação da matéria orgânica nas áreas expostas. Estudos petrográficos efetuados por Monteiro (1986, comunicação oral) também indicam, para essa mesma seqüência, a ocorrência de ambiente vadoso.

Aparentemente, esse evento isotopica-

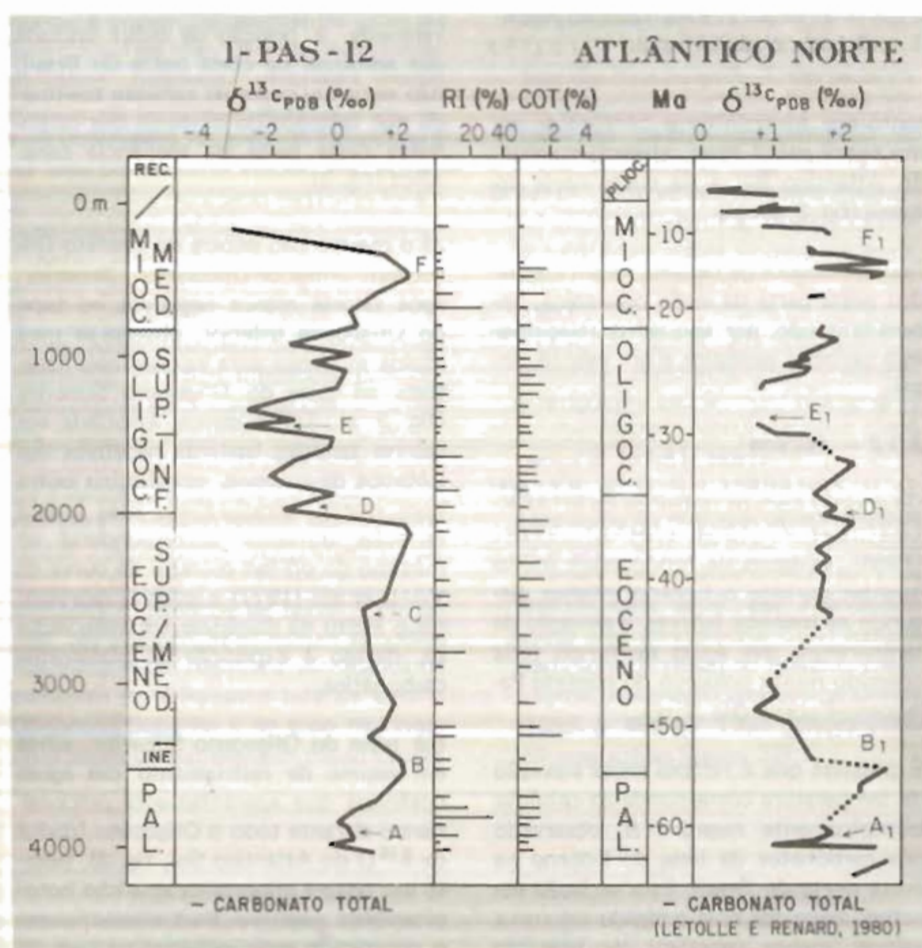


Fig. 2 - Valores de $\delta^{13}\text{C}$ de amostras da costa norte do Brasil (1-PAS-12) e do Atlântico Norte. RI = resíduo insolúvel; COT = carbono orgânico total.

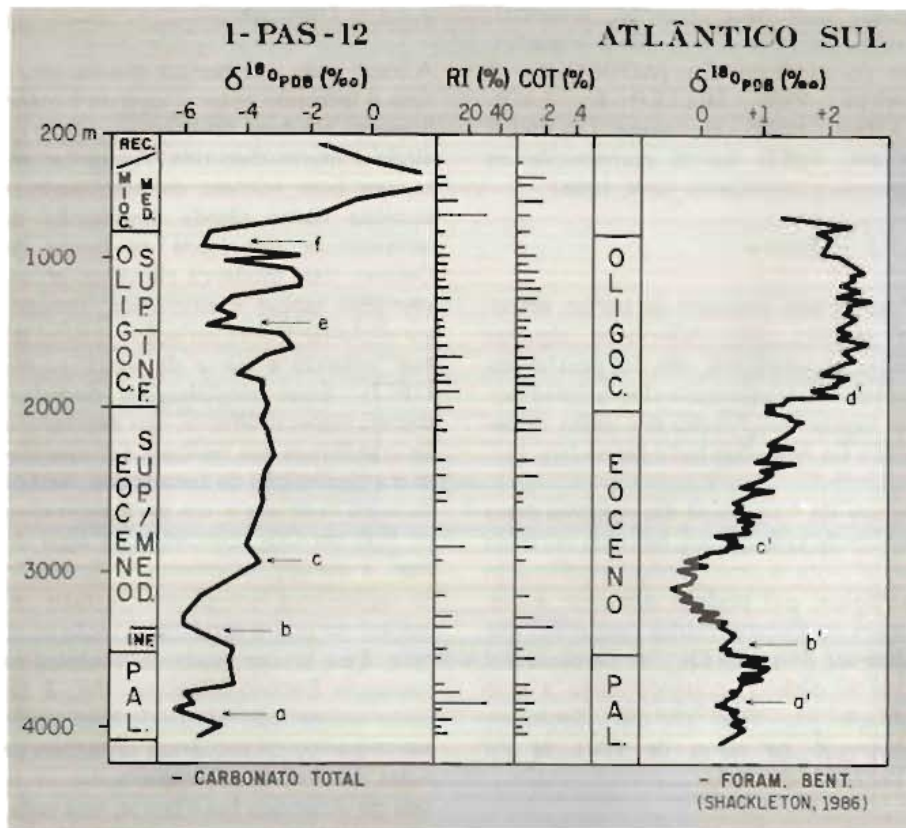


Fig. 3 - Valores de $\delta^{18}O$ de amostras da costa norte do Brasil (1-PAS-12) e do Atlântico Sul. RI = resíduo insolúvel; COT = carbono orgânico total.

mente negativo seria um dos melhores marcos estratigráficos do Terciário. A variação isotópica do carbono é muito grande, inclusive nas amostras do Atlântico Sul e Norte (fig. 2, E e E1).

3.2.4 - Mioceno

O evento isotopicamente positivo centrado em torno de 15 milhões de anos (base do Mioceno Médio) nas amostras do Atlântico Norte, provavelmente, corresponde ao constatado nos carbonatos do Mioceno Médio da costa norte do Brasil (fig. 2, F e F1).

Esse evento, também reconhecido em outras bacias oceânicas, é atribuído ao *onlap* costeiro da curva de VAIL *et alii* (1977), com o máximo em torno de 14 milhões de anos (LOUTIT *et alii*, 1983; WOODRUFF & SAVIN, 1985).

3.3 - Isótopos de Oxigênio

3.3.1 - Paleoceno

Segundo os dados isotópicos, a temperatura da água do oceano teria sido mais quente na base do que no topo do Paleoceno, conforme indicado pelos valores isotópicos mais negativos observados

tanto nos foraminíferos bentônicos como sobre rocha total, respectivamente, do Atlântico Sul e da costa norte do Brasil (fig. 3, a e a').

Poucos estudos de detalhe foram efetuados nessa parte da seção cenozóica, impossibilitando, por enquanto, relacionar essa variação isotópica a um evento global.

3.3.2 - Eoceno

De acordo com os trabalhos de SHACKLETON *et alii* (1984) e SHACKLETON (1986), as águas de fundo eram muito quentes durante o Eoceno Inferior. Segundo os mesmos autores, a elevação da temperatura das águas de fundo teria ocorrido muito próximo do contato Paleoceno-Eoceno (fig. 3, b').

É possível que o reflexo dessa elevação de temperatura corresponda ao episódio isotopicamente negativo *b*, observado nos carbonatos da base do Eoceno na costa norte do Brasil. Essa variação negativa, associada com o rápido retorno a valores menos negativos da base do Eoceno Médio, pode representar um bom marco estratigráfico de correlação (fig. 3, c e c'). Essa última modificação

isotópica, centrada em torno de 49,5 milhões de anos (SHACKLETON, 1986), corresponderia a um importante resfriamento das águas do oceano. Segundo esse mesmo autor, esse acontecimento seria mais recente do que o *off-lap* costeiro mostrado na curva de VAIL *et alii* (1977).

Durante o restante do Eoceno, não se constatou, nos carbonatos da costa norte do Brasil, qualquer variação brusca nos valores isotópicos do oxigênio. Nota-se, apenas, uma leve tendência dos valores a se tornarem gradativamente menos negativos, sugerindo um lento resfriamento da água de superfície.

3.3.3 - Oligoceno

A passagem do Eoceno Superior ao Oligoceno é, normalmente, marcada por um aumento nos valores de $\delta^{18}O$ dos foraminíferos planctônicos e bentônicos de alta latitude (fig. 3, d'). Por sua vez, nenhuma variação isotópica foi observada em organismos planctônicos de baixa latitude (KEIGWIN, 1980), sugerindo apenas uma brusca redução da temperatura das águas de fundo. Devido, provavelmente, à posição de baixa latitude das amostras da costa norte do Brasil, não se notou qualquer variação acentuada nos isótopos do oxigênio dos carbonatos dessa parte da seqüência cenozóica (fig. 3).

Já o mesmo não ocorre no contato Oligoceno Inferior-Oligoceno Superior: após valores menos negativos no topo do Oligoceno Inferior, observa-se uma rápida mudança para valores mais negativos na base do Oligoceno Superior (fig. 3, e). Tal mudança, associada aos valores também bastante negativos dos isótopos de carbono, constituiria outro bom marco estratigráfico. Essa brusca variação isotópica corresponderia ao máximo do *off-lap* costeiro da curva de VAIL *et alii* (1977) e poderia representar o efeito da diagênese em meio vadoso, devido à exposição da plataforma carbonática.

No topo do Oligoceno Superior, ainda em regime de resfriamento das águas oceânicas que aparentemente predominaram durante todo o Oligoceno (dados de $\delta^{18}O$ do Atlântico Sul, fig. 3), nota-se um novo e importante episódio isotopicamente negativo. Esse evento, como o constatado anteriormente na base do Oligoceno Superior, é acompanhado por valores mais negativos de $\delta^{13}C$ e também poderia representar um efeito da

diagênese em meio vadoso, relacionada a nível de mar baixo (fig. 3, f).

4 - CONCLUSÕES

Os resultados das análises isotópicas do carbono e do oxigênio da seqüência carbonática cenozóica da costa norte do Brasil possibilitaram não apenas identificar variações regionalmente, mas também correlacioná-los com modificações observadas em seqüências ou em carapaças de foraminíferos de amostras de mesma idade do Atlântico Sul e Norte.

Essas variações são representadas por episódios isotopicamente positivos ou negativos, refletem eventos paleoceanográficos e/ou paleoclimatológicos globais e podem ser utilizadas como bons marcos de correlação estratigráfica.

Os eventos positivos nos isótopos de carbono geralmente representam períodos de maior produtividade orgânica nos oceanos e podem estar relacionados a transgressões marinhas. Por outro lado, os eventos isotopicamente negativos normalmente refletem menor produtividade orgânica, às vezes extinção em massa, e podem representar períodos de baixo nível do mar. Os mais importantes episódios positivos, utilizáveis como marcos de correlação estratigráfica, foram observados no topo do Paleoceno e na base do Mioceno Médio; já as principais variações isotópicas negativas foram constatadas próximo ou nos limites do Eoceno Superior-Oligoceno Inferior e entre o Oligoceno Inferior e o Superior.

As variações isotópicas do oxigênio normalmente refletem mudanças paleoclimatológicas e/ou diagenéticas. Os eventos negativos seguidos de outros positivos, como ocorrem da base para o topo do Paleoceno e da base do Eoceno Inferior para o Eoceno Médio, devem representar importante resfriamento das águas oceânicas e poderiam estar relacionados a períodos de baixo nível do mar. No entanto, os principais episódios isotopicamente negativos verificados na passagem do Oligoceno Inferior para o Oligoceno Superior e no topo do Oligoceno Superior representam modificações

diagenéticas ocorridas em ambiente vadoso, que geralmente também ocorrem em períodos de nível de mar baixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNER, R. A. *et alii*. The carbonate — silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *Am. J. Sci.*, 285: 641-83, 1985.

GRAIG, H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12: 133-49, 1957.

HE, Q. *et alii*. Stable isotope and percentage of carbonate data for Upper Cretaceous/Lower Tertiary sediments from Deep Sea Drilling Project Site 524, Cape Basin, South Atlantic. *Initial Rep. DSDP*, 73: 749-54, 1984.

KEIGWIN, L. D. Palaeoceanographic change in the Pacific at the Eocene — Oligocene boundary. *Nature*, 287: 722-5, 1980.

KEIGWIN, L. D. & KELLER, G. Middle Oligocene cooling from equatorial Pacific DSDP site 77B. *Geology*, 12: 16-9, 1984.

LÉTOLLE, R. & RENARD, M. Évolution des teneurs en $\delta_{13}C$ des carbonates pélagiques aux limites crétacé/tertiaire et paléocène/éocène. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 290: 827-30, 1980.

LOUTIT, T. S. *et alii*. Miocene equatorial and southwest Pacific paleoceanography from stable isotope evidence. *Mar. Micropaleontol.*, 8: 215-33, 1983.

MILLER, K. G. *et alii*. Oligocene — Miocene biostratigraphy, magnetostratigraphy and isotopic stratigraphy of the Western North Atlantic. *Geology*, 13: 257-61, 1985.

MILLER, K. G. & FAIRBANKS, R. G. Oligocene to Miocene carbon isotope changes and abyssal circulation changes: *In: SUNDQUEST, E. T. & BROECKER, W. S.*, eds. *The carbon cycle and atmospheric CO₂; natural variations Archean to Present*. Washington, American Geophysical Union, 1985. p. 469-86, 1985. (Geophysical Monographies Series, 32).

SAVIN, S. M. *et alii*. Tertiary marine paleotemperatures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86: 1499-510, 1975.

SHACKLETON, N. J. Carbon isotope constraints on oxygen and carbon dioxide in the cenozoic atmosphere. *In: SUNDQUEST, E. T. & BROECKER, W. S.*, eds. *The carbon cycle and atmospheric CO₂; natural variations Archean to present*. Washington, American Geophysical Union, 1985. p. 412-7. (Geophysical Monographies Series, 32).

SHACKLETON, N. J. Paleogene stable isotope events. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 57: 91-102, 1986.

SHACKLETON, N. J. *et alii*. Stable isotope data and the ontogeny of Paleocene planktonic foraminifera. *Foraminiferal Res.*, 15: 321-36, 1985.

SHACKLETON, N. J. *et alii*. Oxygen and carbon isotope data from Leg 74 foraminifera. *Initial Rep. DSDP*, 74: 599-612, 1984.

SHACKLETON, N. J. & KENNETT, J. P. Paleotemperature history of the cenozoic and the initiation of Antarctic glacial; oxygen and carbon isotope analyses in DSDP Sites 277, 279 and 281. *Initial Rep. DSDP*, 29: 743-55, 1975.

THIERSTEIN, H. R. & BERGER, W. H. Injection events in ocean history. *Nature*, 276: 461-6, 1978.

VAIL, P. K. *et alii*. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: global cycles of relative changes of sea level. *In: PAYTON, C. E.*, ed. *Seismic stratigraphy; application to hydrocarbon exploration*. Tulsa. American Association Petroleum Geologists, 1977. p. 83-97. (Special Paper, 26).

WOODRUFF, F. & SAVIN, S. M. $\delta^{13}C$ values of Miocene Pacific benthic foraminifera: correlations with sea level and biological productivity. *Geology*, 13: 119-22, 1985.

ZACHOS, J. C. Stable isotope and trace element geochemistry of carbonate sediments across the Cretaceous — Tertiary boundary at DSDP Hole 577, Leg 86. *Initial Rep. DSDP*, 86: 513-32, 1985.

ABSTRACT

One of the most important and probably most difficult problems in geology is the establishment of a synchronism of events on a global scale.

Most of the isotope oscillations found out in carbonate sequences are commonly abrupt, one being easily correlated with the other at long distances and reflecting great paleoceanographic and paleoclimatic variations. This fact has led to an increase in their use as chronostratigraphic markers.

The study of Carbon and Oxygen isotopes of Brazilian northern coast carbonate sections allowed the identification of stratigraphic markers that were correlated

with the same events found out in carbonate sections of North and South Atlantic (Deep Sea Drilling Project).

The Carbon isotope positive events commonly represent periods of major organic productivity in the oceans and are possibly related to marine transgressions. They were observed at the top of the Paleocene and at the base of Middle-Miocene. On the other hand, the isotope negative events, which were found out close to the Upper Eocene-Lower Oligocene and Lower Oligocene-Upper Oligocene limits, probably reflect periods of minor organic productivity, being related to a decrease in the temperature of oceanic waters.

Oxygen isotope variations commonly indicate paleoclimatic changes. The passage from more negative values (Lower Eocene) to less negative ones (Middle Eocene) would represent an important cooling of the oceanic waters and could indicate a period during which the sea level was relatively low. On the other hand, the isotope negative events, observed in the passage from the Lower Oligocene to the Upper Oligocene and at the top of the latter, would not properly be related to paleoclimatic variations. They would be representative of diagenetic modifications that occurred in a vadose environment.