

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Wanessa Sousa Marques

**GEOQUÍMICA DE CARBONATOS SEDIMENTARES DA PLATAFORMA
CONTINENTAL DO ESTADO DO CEARÁ E IMPLICAÇÕES OCEANOGRÁFICAS**

Dissertação de Mestrado
Setembro/2004

APRESENTAÇÃO

Esta Dissertação de Mestrado apresenta dois manuscritos e um apêndice sobre estudos da Geoquímica de carbonatos biogênicos da margem continental nordeste brasileira, e, principalmente do Estado do Ceará. Também mostra interpretações sobre a Geoquímica Sedimentar de carbonatos dos Estados do Ceará e Pernambuco, a partir de um tratamento estatístico realizado em análises químicas de carbonatos biogênicos destas áreas. Os trabalhos são mostrados na íntegra, nesta dissertação, de acordo com a ordem de edição dos mesmos.

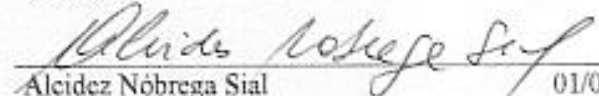
GEOQUÍMICA DE CARBONATOS SEDIMENTARES DA PLATAFORMA CONTINENTAL
DO ESTADO DO CEARÁ E IMPLICAÇÕES OCEANOGRÁFICAS

WANESSA SOUSA MARQUES

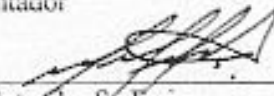
Aprovada:



Eldemar de Albuquerque Menor 01/09/04
orientador



Alcidez Nóbrega Sial 01/09/04
co-orientador



George Sander Sa Freire 01/09/04
UFC

AGRADECIMENTOS

Eu, Wanessa, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao professor Valdir do Amaral V. Manso, por seu apoio, desde o primeiro dia de minha passagem aqui em Recife, até hoje. Sem seu apoio, eu não teria terminado o curso de Mestrado com tanto êxito. Também gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos professores Eldemar de A. Menor e Alcidez Nóbrega Sial, pelo constante apoio no aprendizado, durante estes dois anos que se passaram. *Em especial, eu, Wanessa Sousa Marques, quero agradecer a Juan Carlos Silva, meu noivo e amigo sincero, pelo apoio e doce companhia que me ofereceu durante estes dois anos, e sei que oferecerá em todos os momentos de minha vida...*

RESUMO

Oito amostras de sedimentos ricos em foraminíferos da margem continental brasileira, entre os Estados do Ceará e Pernambuco e, adicionalmente, espécies individualizadas de foraminíferos (*Amphistegina radiata*, *Peneroplis planatus* e *Globigerinoide ruber*), provenientes de cinquenta amostras de sedimentos da margem continental do Ceará, foram analisadas para isótopos estáveis de C e O. Os objetivos foram: investigar a mistura entre águas oceânicas e continentais; determinar o possível valor de $\delta^{18}\text{O}$ da água do mar na costa cearense; verificar as mudanças de temperatura da água do mar em função da profundidade; e identificar os possíveis níveis de utilização aparente de Oxigênio na plataforma continental do Ceará. Em escala regional, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos sedimentos variaram entre $-1,3$ e $-0,6\text{‰}_{\text{PDB}}$ em amostras de 31 e 490m de profundidade, respectivamente, na costa cearense. Na costa do Rio Grande do Norte, entre $-1,3$ e $-0,7\text{‰}_{\text{PDB}}$ para sedimentos a 13m e 610m, respectivamente. E entre $-0,7$ e $-0,4\text{‰}_{\text{PDB}}$ em 610m e 1145m, respectivamente, ao largo das costas do Rio Grande do Norte e Pernambuco. Essas variações nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos sedimentos podem refletir diferentes temperaturas calculadas para as massas d'água oceânicas, passando de 21 a 20°C nas amostras de 31m e 490m, respectivamente, de 22 a 19°C nas amostras de 13m e 610m, e passando de 19 a 18°C nas amostras de 610m e 1145m. O fato de pequenas diferenças de temperaturas calculadas corresponderem a grandes diferenças de profundidade (exemplo: apenas 1°C entre 31m e 490m, na costa do Ceará), pode resultar do fato que as variações de temperatura da água do mar, na costa cearense, podem ser influenciadas pela interação de correntes com temperaturas calculadas variando de 20 a 28°C, independentemente da batimetria. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ de exoesqueletos das espécies individualizadas de foraminíferos da costa do Ceará podem exibir diferenças marcantes, mesmo quando coletados em profundidades mais ou menos equivalentes, com pequenas distâncias entre os pontos de amostragem (ex. $-0,8$ a $-1,7\text{‰}_{\text{PDB}}$ em 14 e 16m, respectivamente, no setor costeiro de Acaraú). Essa circunstância pode ser resultado de misturas de águas continentais fluviais, nos setores litorâneos da plataforma continental cearense. Com relação ao cálculo de $\delta^{18}\text{O}$ da água do mar na plataforma continental do Ceará, foi sugerido um valor de $0,2\text{‰}_{\text{SMOW}}$, assumindo-se uma salinidade de 35‰. Em escala regional, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ dos sedimentos analisados são geralmente mais altos em águas superficiais que nas águas de maior profundidade (ex. $2,5\text{‰}_{\text{PDB}}$ na amostra de 610m, no Rio G. do Norte, para $1,5\text{‰}_{\text{PDB}}$ na amostra a 10m de profundidade, na costa cearense. Isto se verifica pelo fato que a amostra de 610m contém muito mais espécies planctônicas (relação planctônico/bentônico: 24) do que a amostra de 10m (relação planctônico/bentônico: 0,11). Isto pode refletir o enriquecimento do ambiente superficial marinho em ^{13}C , como resultado da fixação de ^{12}C no tecido orgânico das espécies, num ambiente de alta produtividade orgânica; e o ^{13}C sendo

fixado no exoesqueleto das espécies. Por outro lado, em escala local, observou-se uma relação empírica entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e a utilização aparente de Oxigênio (AOU), e com o número de espécimes existentes em cada amostra na margem continental do Ceará. Aparentemente, existiria uma relação entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$, a decomposição da matéria orgânica no fundo oceânico (liberando ^{12}C para o ambiente) e a respiração das espécies (lançando $^{13}\text{CO}_2$ para o ambiente). Uma comparação entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e a profundidade da amostragem reflete níveis alternados de AOU na plataforma continental cearense, ao longo da profundidade. Finalmente, considerando-se a composição química dos sedimentos carbonáticos (sedimento total) da plataforma interna de Pernambuco, foi inferida a geoquímica da substituição diadócica de Ca^{++} por Mg^{++} na estrutura cristalográfica dos carbonatos. Foi possível destacar uma nítida repartição na relação CaO/MgO aproximadamente em torno da isóbata de 15 metros, com valores maiores predominando em águas mais profundas. Esse padrão sugere que a substituição do Ca por Mg seja mais efetiva em águas rasas e possivelmente mais aeradas, ou que haja um fracionamento na biota, nesse caso com predomínio de exoesqueletos de Mg-calcitas de espécies bentônicas em águas mais rasas. Nesta mesma plataforma, observa-se que os teores de Mn diminuem grosso modo com a profundidade, sugerindo que seu aporte seja sobretudo de origem continental pedogênica, e que a dispersão mecânica de seus particulados, introduzidos por descargas fluviais, cause uma diluição em sedimentos mais distais. Na plataforma cearense, apesar de não ter sido verificada uma diferença marcante entre espécies produtoras de carbonato, em relação à profundidade, constatou-se que em condições de águas mais aquecidas (acima dos 23°C , calculados) as calcitas são mais magnesianas, que em águas mais profundas, onde as temperaturas, calculadas a partir dos valores de $\delta^{18}\text{O}$, oscilaram entre 20 e 23°C .

ABSTRACT

Eight foraminífera-rich sediment samples of the continental margin of Brazil, between the states of Ceará and Pernambuco and single foraminifera specimens (*Amphistegina radiata*, *Peneropolis planatus* and *Globigenrinoides rubbe*) of fifty sediment samples collected in the continental margin of the Ceara State were analysed for C and O- isotope. The objective were: investigate the mixtures of continental water in ocean; investigate and determining the possible $\delta^{18}\text{O}$ of the seawater in the Ceara coast; to verify variations in the seawater temperature with depth and possible levels of apparent Oxygen consumption in the continental shelf of Ceará. In a regional scale, sediment samples yield $\delta^{18}\text{O}$ values between -1.3 and -0.6‰_{PDB} in samples of 31 and 490m of depth, respectively in coast of Ceará. In coast of Rio Grande do Norte, between -1.3 and -0.7‰_{PDB} to sediments of 13 and 610m respectively. And between -0.7 and -0.4‰_{PDB} in 610 and 1145m of depth, respectively along the coast of Rio Grande do Norte and Pernambuco. These variations in $\delta^{18}\text{O}$ values of sediments may reflect fluctuating seawater mass temperatures, reaching 21 to 20°C in samples with 31 and 490m respectively; 22 to 19°C in samples with 13 and 610m, and 19 to 18°C in samples of 610 and 1145m. Small differences in calculate temperatures correspond to great differences in depth (e.g. 1°C between 31 and 490m of depth at the Ceará) may result of fact that variations in the temperature of the water masses along the Ceara area reflect the interaction of water currents with different calculated temperatures, reaching 20 to 28°C independent of depth.

$\delta^{18}\text{O}$ values in the foraminifera shells (singular species) in coast of Ceará may exhibits important differences between samples collected very close one to each other (e.g. from -0.8 to -1.7‰_{PDB} at 14 and 16 m of depth respectively, in the Aracaú sector). These differences maybe the result of the interaction between continental waters and sea water in coastal sectors in continental shelf. A $\delta^{18}\text{O}$ value of ~ 0.2‰_{SMOW} was estimated for the seawater of the continental platform in the Ceara State, and this value was obtained assuming the salinity of 35‰. Regional variations in the $\delta^{13}\text{C}$ values are higher in surface water than in deep waters (e.g. 2.5‰_{PDB} at 610m in the Rio Grande do Norte and 1.5‰_{PDB} at 10m of depth in the coast of Ceara. This may reflect that the sample of 610m depth (planktonic/bentonic: 24) contain more planktonic species than the sample of 10m depth (planktonic/bentonic: 0,11). This may reflect the enrichment in ^{13}C of surface waters as the result of the ^{12}C fixation in the living organism tissues, a process which turn the seawater more depleted in that isotope. A empiric relationship between the $\delta^{13}\text{C}$ values and the apparent consumption of oxygen (AOU), the number of species in samples was also observed in continental margin of Ceará state. suggesting a close relationship between the $\delta^{13}\text{C}$ and the organic matter decomposition in the bottom ocean (release of ^{12}C to environment) and the respiratory function of the specimens (release of $^{13}\text{CO}_2$ to environment). Different AUO levels were identified at different depths when

contrasting the $\delta^{13}\text{C}$ values with depth. Finally, considering the composition of carbonate sediments (total sediment) of continental shelf of Pernambuco, were suggested the geochemistry of diadoxyc substitution of Ca^{++} for Mg^{++} in structure of carbonates. It were possible to detail a division in CaO/MgO rate around 15m depth, with greater values prevails in deep waters. This trend suggests that the substitution of Ca by Mg is more effective in shallow waters, or there is a differentiation of biota with predominance of Mg-calcite shells of bentonic species. In this continental shelf, observe that the Mn tenor decreases with depth, suggesting that input is continental pedogenetic and the mechanic dispersion to cause dilution in distal sediments. In Ceará shelf, despite is no great differences in species with depth, to notice that in hot waters (on to 23°C calculated) the calcites have more Mg than in deep waters, where the temperature calculates reach 20 to 23°C .

SUMÁRIO

Introdução	8
Carta de aceitação do manuscrito “ANÁLISES DE $\delta^{13}\text{C}$ E $\delta^{18}\text{O}$ EM SEDIMENTOS RICOS EM FORAMINÍFEROS DA MARGEM CONTINENTAL DO NORDESTE BRASILEIRO, ENTRE OS ESTADOS DO CEARÁ E PERNAMBUCO”	10
Cópia do manuscrito “ANÁLISES DE $\delta^{13}\text{C}$ E $\delta^{18}\text{O}$ EM SEDIMENTOS RICOS EM FORAMINÍFEROS DA MARGEM CONTINENTAL DO NORDESTE BRASILEIRO, ENTRE OS ESTADOS DO CEARÁ E PERNAMBUCO”	11
Carta de submissão do manuscrito “ OCEANOGRAPHIC PARAMETERS IN CONTINENTAL MARGIN OF THE STATE OF CEARÁ (NORTHEASTERN BRAZIL) DEDUCED FROM C- AND O- ISOTOPES IN FORAMINIFERS”	24
Cópia do manuscrito “ OCEANOGRAPHIC PARAMETERS IN CONTINENTAL MARGIN OF THE STATE OF CEARÁ (NORTHEASTERN BRAZIL) DEDUCED FROM C- AND O- ISOTOPES IN FORAMINIFERS”	25
Apêndice	51
Conclusões	55
Referências	57

INTRODUÇÃO

A composição química de carbonatos marinhos é grandemente influenciada pela presença de elementos químicos ou íons dissolvidos na água do mar. Estes elementos entram na estrutura cristalina dos carbonatos, fazendo parte de uma solução sólida, ou são adsorvidos na superfície carbonática. Os diversos organismos produtores de carbonato de cálcio podem englobar de várias maneiras esses íons ou elementos em suas carapaças. Isso dependerá do metabolismo de cada um, e dos efeitos vitais que cada espécie exerce sobre a escolha do elemento químico ou íon a ser incorporado em sua concha. O fator primordial que afeta a composição química dos carbonatos é a própria composição água do mar. Outros fatores são temperatura, salinidade, pH, disponibilidade de nutrientes, e Oxigênio dissolvido (Morse e Mackenzie 1990). Da mesma forma ocorre com a composição isotópica dos carbonatos biogênicos. Apesar de estar sujeita aos efeitos vitais das espécies, a composição isotópica do carbonato biogênico é de grande importância para o estudo da físico-química do ambiente no qual as espécies se desenvolveram. Isótopos de Carbono estão associados com a produtividade das espécies e a decomposição da matéria orgânica, que refletem diretamente os teores de isótopos leves ou pesados no ambiente. Isótopos de Oxigênio estão associados com a temperatura e salinidade do ambiente, e por meio de equações como a de (Epstein et al. 1953) , refletem diretamente a temperatura e a salinidade do ambiente, durante a calcificação das espécies.

Segundo (Coutinho 1992), a plataforma continental nordeste/leste brasileira se destaca pela quase total ausência de carbonatos inorgânicos. Nesse contexto, são importantes os estudos detalhados sobre as características físico-químicas da água do mar que causaram a precipitação de um carbonato biogênico com determinada composição química, e são importantes também as correlações entre a composição química do carbonato com a composição química da água do mar, durante a calcificação das espécies.

Assim, a Geoquímica de sedimentação dos carbonatos da costa nordeste brasileira é promissora, e oferece boas oportunidades para estudos geoquímicos para fins de publicações. Neste trabalho, foram feitas análises de isótopos estáveis de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ em carbonatos biogênicos (conchas de foraminíferos), primeiramente em amostras distribuídas, em escala regional, ao longo da margem continental nordeste brasileira, e posteriormente em amostras distribuídas na margem continental do Estado do Ceará. Análises de difratometria de raios X foram feitas em carbonato total (sem separação de espécies) nas amostras da margem continental do Estado do Ceará, para verificar o comportamento do elemento Mg com a profundidade nesses carbonatos. Adicionalmente, análises estatísticas foram feitas com análises químicas de carbonatos da plataforma continental de Pernambuco, realizadas por (Mont'alverne 1982), para verificar o

comportamento dos elementos químicos com a profundidade, nesta plataforma continental. O objetivo desta pesquisa foi investigar mudanças nas características da água do mar no ambiente de calcificação das espécies, e mudanças na composição química dos carbonatos com a profundidade. Esta pesquisa, desenvolvida no decorrer de dois anos, é formada por dois trabalhos, submetidos para publicação, que estão incluídos na íntegra nesta dissertação de Mestrado.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
REVISTA DE GEOLOGIA
www.revistadegeologia.ufc.br



CARTA DE ACEITAÇÃO

Fortaleza, 23 de abril de 2004

Prezada Geóloga Wanessa S. Marques,

Comunicamos que o artigo científico intitulado *Análises De $\delta^{13}C$ e $\delta^{18}O$ em Sedimentos Ricos em Foraminíferos da Margem Continental do Nordeste Brasileiro, entre Os Estados do Ceará e Pernambuco*, foi aceito para a publicação no próximo volume de 2004 da Revista de Geologia da UFC. E que o presente encontra-se no processo de editoração final

Agradecemos a submissão do referido trabalho a nossa Revista e esperamos contar com futuras contribuições de V.Sa., bem como sua divulgação nos meios científicos que lhe são comuns.

Atenciosamente,

Dr. David Lopes de Castro

Editor – Chefe

ANÁLISES DE $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ EM SEDIMENTOS RICOS EM FORAMINÍFEROS DA MARGEM CONTINENTAL DO NORDESTE BRASILEIRO ENTRE OS ESTADOS DO CEARÁ E PERNAMBUCO

Marques W. S.¹; Menor E. A.²; Sial A. N.³; Silva J. C.⁴ Manso V.A.V.⁵

PALAVRAS-CHAVE: Isótopos de carbono e oxigênio, foraminíferos, margem continental, temperatura da água do mar.

RESUMO

Análises de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de oito amostras de sedimentos carbonáticos ricos em foraminíferos da margem continental do Nordeste brasileiro, entre Ceará e Pernambuco foram feitas, para investigar uma possível estratificação isotópica de C e O no oceano, e mudanças na temperatura da água do mar com a profundidade. Os resultados mostram que existe uma relação entre a composição isotópica dos sedimentos e a profundidade. Existe uma tendência de aumento dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ de 1.5‰_{PDB} a 3.4‰_{PDB}, entre 10m e 31m, e um aumento dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ de -0,9‰_{PDB} a -0.6‰_{PDB}, entre profundidades de 10 a 980m na margem continental do Estado do Ceará, onde predominam as espécies bentônicas (*Miliolidae*, *Miliolina coilling*, *Anphistegina* e *Lamarckina*); e a partir dos 65m, as espécies planctônicas (*Globigerina praebuloides* e *Orbulina universa*). As temperaturas calculadas para a água do mar nesta área diminuem de 21 para 19°C com o aumento da profundidade. Na margem continental dos estados do Rio Grande do Norte e Pernambuco, há um aumento de $\delta^{13}\text{C}$ (1.7‰_{PDB} a 2.5‰_{PDB}) entre as profundidades de 13 e 610m; e uma diminuição para 1.6‰_{PDB} até os 1145m. Por outro lado, observou-se um aumento dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ (-1.3‰_{PDB} a -0.7‰_{PDB}), chegando até -0.4‰_{PDB} aos 1145m, onde predominam as espécies planctônicas *Globigerina praebuloides*, *Orbulina universa* e em menor proporção as espécies bentônicas *Lamarckina*, *Robulus*, *Anphistegina*. As temperaturas nesta área variam de 22 a 18°C com o aumento da profundidade. Pode-se concluir que, em termos gerais, com o aumento da profundidade, e da razão P/B (porcentagem de planctônicos sobre bentônicos), há um aumento dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e um aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, além de uma diminuição na temperatura da água do mar.

ABSTRACT

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ analyses were performed in eight marine carbonatic rich foraminifera sediment samples collected in the continental margin between the states of Ceara and Pernambuco, Northeastern Brazil. The results show a clear dependence of the sediments $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values with depth, indicating a C- and O- isotopic ocean water stratification. The results also show a

dependence of the seawater temperature, calculated from sediments $\delta^{18}\text{O}$, with depth; accounting for the hypothesis of a stratified ocean. In the Ceara state continental platform; increasing tendencies for both, the $\delta^{13}\text{C}$ (from 1.5‰ to 3.4‰_{PDB}) and $\delta^{18}\text{O}$ (-1.03‰ to -0.6‰_{PDB}), were identified for depths between 10 and 980m. For the same depth interval, a predominance of benthonic foraminifera (*Miliolidae*, *Miliolina coilling*, *Anphistegina* e *Lamarckina*) was identified, as well as clear increase in the Planctonic foraminifera (*Globigerina praebuloides* e *Orbulina universa*) after the 65m of depth. Calculated seawater temperatures decrease from 21 to 19°C with increasing depth. In the Rio Grande do Norte – Pernambuco continental margin, an increase in the $\delta^{13}\text{C}$, from 1.7‰ to 2.5‰_{PDB}, occurs between the 13 - 630m depth interval. This increase is interrupted by a sharp $\delta^{13}\text{C}$ shift, towards more a negative values (1.6‰_{PDB}) at a depth of 1145m. On the other hand, $\delta^{18}\text{O}$ values increase, from -1.3‰ to 0.7‰_{PDB}, between the 13 – 160m of depth; and then, shift towards more negative values (0.4‰_{PDB}) at a depth of 1145m. As in the Ceara state continental platform, benthonic foraminifera species dominate the shallow marine waters, as plantonic (*Globigerina praebuloides*, *Orbulina universa*) and benthonic species (*Lamarckina*, *Robulus*, *Anphistegina*) dominate deeper environments. Calculated seawater temperatures decrease from. 22 to 19°C with increasing depth. It can be concluded, that in general, there is an increasing and posterior decreasing tendency in the sediments $\delta^{13}\text{C}$ and an increasing in the $\delta^{18}\text{O}$ values with depth. These tendencies correlate with a increasing tendency in the P/B (plantonic foraminifera/benthonic foraminifera) ratios and decreases of calculated ocean water temperatures

1. Introdução

Foraminíferos são usados como ferramentas para observações oceanográficas e interpretações ambientais e paleoambientais por causa de sua extensiva ocorrência geográfica e geológica, pelo fato de habitarem, em média, entre os 5 e os 5000m de profundidade nas margens continentais, pela sua relativa abundância e diversidade, e pela sua sensibilidade às condições ambientais, em especial à temperatura. Adicionalmente, tem sido identificado que foraminíferos reagem sensivelmente a fatores como trocas em níveis de oxigenação, luminosidade, disponibilidade de nutrientes, e a processos oceanográficos e climáticos tais como correntes de ascensão (upwelling), mudanças na profundidade da termoclina, glaciações, entre outros (Hemleben and Bijma, 1994, Mackensen et al., 1992, Hale e Pflaumann, 1999).

Neste contexto, sedimentos ricos em foraminíferos da margem continental do Nordeste brasileiro foram analisados quanto à composição isotópica do carbono e oxigênio, com a finalidade de obter-se informações sobre a estratificação isotópica das águas oceânicas nesse trecho da margem continental, possíveis alterações na produtividade primária e mudanças na temperatura da água do mar com a profundidade. As amostras de sedimentos marinhos carbonáticos estudadas

fazem parte de um conjunto de amostragem realizado entre 1990 e 1991, como parte do programa de cooperação de pesquisas marinhas entre Brasil e Alemanha, com o navio de pesquisa Vitor Hensen. A amostragem distribui-se entre 10 e 1145m de profundidade, indo desde a margem continental do estado do Ceará, até a margem continental do Estado de Pernambuco (Fig. 1). Amostras pertencentes à margem continental do estado do Ceará, com profundidades de 10, 31, 65, 490 e 980m, estão localizadas numa área onde há influência direta da corrente oceânica norte Brasileira, com direção NW. As duas amostras da margem continental do estado do Rio G. do Norte foram coletadas a 13 e 610m de profundidade e a amostra da margem continental do estado de Pernambuco foi coletada a 1145m de profundidade. Estas duas últimas áreas têm a influência da corrente Atlântica Sul Equatorial, com direção Oeste.

2. Generalidades sobre a margem continental do Nordeste brasileiro.

A margem continental do Nordeste brasileiro é caracterizada por ter uma plataforma estreita e comumente rasa, variando de 40 a 80m de profundidade e largura variando entre 60 a 80m em média. O regime de marés (mesomaré) e os ventos fortes característicos da região Nordeste tornam sua frente plataformal um ambiente de alta energia; onde altas temperaturas e salinidade (35 a 37‰) (Mont'alverne 1982; Freire 1985; Testa & Bosence 1998) tornam essa parte da margem continental do Brasil um lugar especial para estudos da biota marinha. A propriedade da plataforma continental do nordeste de ser estreita tem sido atribuída, entre outras causas, à própria configuração estrutural desta faixa do bloco sul-americano, ao caráter tropical das bacias de drenagens da faixa continental adjacente, e das reduzidas taxas de erosão terrestre. A linha de quebra (o termo quebra da plataforma foi originalmente proposto por Dietz & Menard, 1958 - França Proj. REMAC) passa em geral nas isóbatas de 60 a 80m. Os sedimentos nessa feição da margem continental são compostos principalmente por fragmentos carbonáticos biodetríticos, com o tamanho variando de acordo com o tipo de organismo e energia do ambiente e variando em composição, podendo ocorrer puros ou misturados com sedimentos terrígenos. Neste trabalho, três pontos de amostragens situam-se na plataforma continental, nas profundidades de 10, 13 e 31m, e um ponto, na linha de quebra, a 65m de profundidade.

O talude continental possui largura média entre 85 e 105km. Essa feição morfológica é recortada em toda sua extensão por canhões submarinos, com profundidades de até 1210m, e que, no geral, não se relacionam com os sistemas de drenagem costeiros atuais. Todos os outros pontos de amostragem localizam-se no talude continental.

Com base em análise em lupa binocular, os sedimentos são mais terrígenos na parte interna da margem continental, apresentando pouco material biogênico. Já na parte externa, são ricos em bioclastos. Em termos gerais, até a profundidade de 65 metros, predominam foraminíferos bentônicos. A partir daí, as espécies planctônicas passam a predominar, inclusive no estado de

Pernambuco, dado que se conta com apenas uma amostra na profundidade de 1145m. A grande maioria das espécies de foraminíferos identificados nas amostras são calcíticas, e apenas uma espécie identificada (*Lamarckina*) é aragonítica.

Na figura 1, observa-se a disposição dos pontos de amostragem e das linhas transversais e linha paralela consideradas para interpretação dos resultados.

3. Métodos

As amostras de sedimentos carbonáticos foram analisadas em lupa binocular para uma separação da biota marinha, separando-se os moluscos, briozoários, ostracodes, algas, etc., e escolhendo-se os foraminíferos. Assim, as amostras foram pulverizados em Moinho de Disco Orbital e o pó, separado e guardado em recipiente de vidro para análise posterior. As análises de isótopos estáveis de carbono e oxigênio foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis (LABISE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Cada amostra em pó foi colocada para reagir com ácido ortofosfórico a 100%, a 25°C de temperatura, durante 12 horas. O CO₂ liberado durante a reação foi extraído em uma linha de alto vacuum empregando purificação criogênica, seguindo o método proposto por Craig (1957).

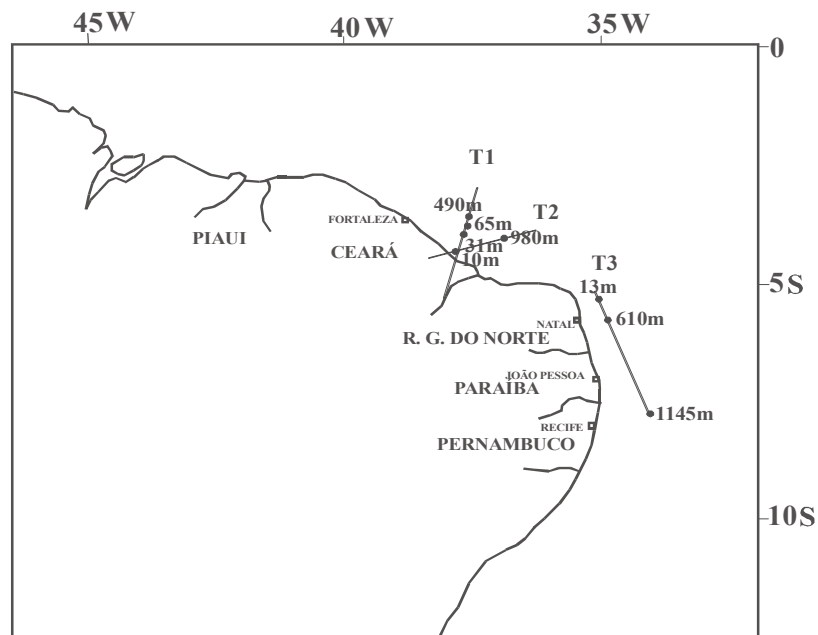


Figura 1- Localização dos pontos estudados e profundidades (em metros) nas linhas transversais e paralela à costa. Escala aproximada: 1: 35.000.000

Para a determinação de isótopos de carbono e oxigênio, o CO₂ extraído de cada amostra foi analisado em um espectrômetro de massa de fonte gasosa (SIRA II), o qual possui dupla admissão para comparação de razões isotópicas de amostras-gás de referência; além de estar

equipado com um colector triplo. Para as análises empregou-se o gás de referência “Borborema skarn calcite” BSC, o qual foi calibrado com relação aos padrões NBS-18, NBS-19 e NBS-20 que têm $\delta^{18}\text{O} = -1.28 \pm 0.004\text{‰}_{\text{PDB}}$ e $\delta^{13}\text{C} = -8.58 \pm 0.02\text{‰}_{\text{PDB}}$. Os resultados obtidos para as amostras são reportados em notação internacional $\delta\text{‰}$ (*permil*) em relação à escala PDB.

4. Resultados

Para facilitar a interpretação dos resultados, as amostras foram distribuídas em três linhas, duas dispostas de maneira perpendicular e uma paralela à costa (Fig. 1). Encontrou-se que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ variam de acordo com a profundidade, observando-se uma maior variabilidade nas linhas transversais da margem continental do Ceará (T1 e T2) do que aquela dos estados do Rio Grande do Norte e Pernambuco (T3).

A tabela 1 mostra cada região estudada de acordo com cada linha transversal e seus respectivos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$.

Transecto	Região	Prof (m)	$\delta^{13}\text{C}$ ‰ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ (PDB)
T1	Ceará	10	1.5	-0.9
	Ceará	31	3.4	-1.03
	Ceará	65	2.9	-0.6
	Ceará	490	1.8	-0.8
T2	Ceará	10	1.5	-0.9
	Ceará	980	2.4	-0.6
T3	R. G. do Norte	13	1.7	-1.3
	R. G. do Norte	610	2.5	-0.7
	Pernambuco	1145	1.6	-0.4

Tabela 1- Resultados de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas amostras de acordo com as seções transversais estudadas em cada região.

4.1 Margem continental do estado do Ceará

Na margem continental do estado do Ceará (T1), o valor de $\delta^{13}\text{C}$ para 10m de profundidade é de $1,5\text{‰}_{\text{PDB}}$. Com o aumento da profundidade, esse valor aumenta para $3,3\text{‰}_{\text{PDB}}$ a 31m, e daí para $2,9\text{‰}_{\text{PDB}}$ a 65m de profundidade, para depois diminuir até $1,8\text{‰}$ na profundidade de 490m (Fig. 2A). Essa diminuição também é visualizada na seção transversal T2, na qual os valores vão de $1,5\text{‰}$ a uma profundidade de 10m a $2,4\text{‰}_{\text{PDB}}$ a 980m de profundidade (Fig. 2C).

Quanto ao $\delta^{18}\text{O}$, em T1, valores mais altos são observados no ponto de amostragem com

10m de profundidade (-0.9‰ PDB). Este diminui para valores de -1.03‰ PDB aos 31m de profundidade. A partir daí, os valores aumentam até $-0,6\text{‰}$ aos 65m e finalmente diminuem até (-0.8) aos 490m (Fig. 2B). Essa lenta diminuição é vista ainda aos 980m ($-0,6\text{‰ PDB}$), na seção transversal T2.

4.2 Margem continental do Rio Grande do Norte-Pernambuco

No estado do Rio Grande do Norte (T3), o valor de $\delta^{13}\text{C}$ de $1,7\text{‰ PDB}$ é encontrado a uma profundidade de 13m. A partir daí, o valor aumenta para $2,5\text{‰}$ na profundidade de 610m, para depois, tornar a cair para $1,6\text{‰ PDB}$ na profundidade de 1145m (Fig. 3A). Quanto ao valor de $\delta^{18}\text{O}$, um valor de $-1,3\text{‰ PDB}$ foi obtido para a profundidade de 13m. A partir daí, seus valores aumentam para $-0,7\text{‰ PDB}$ aos 610m, e até $-0,4\text{‰ PDB}$ a uma profundidade de 1145m. (Fig. 3B).

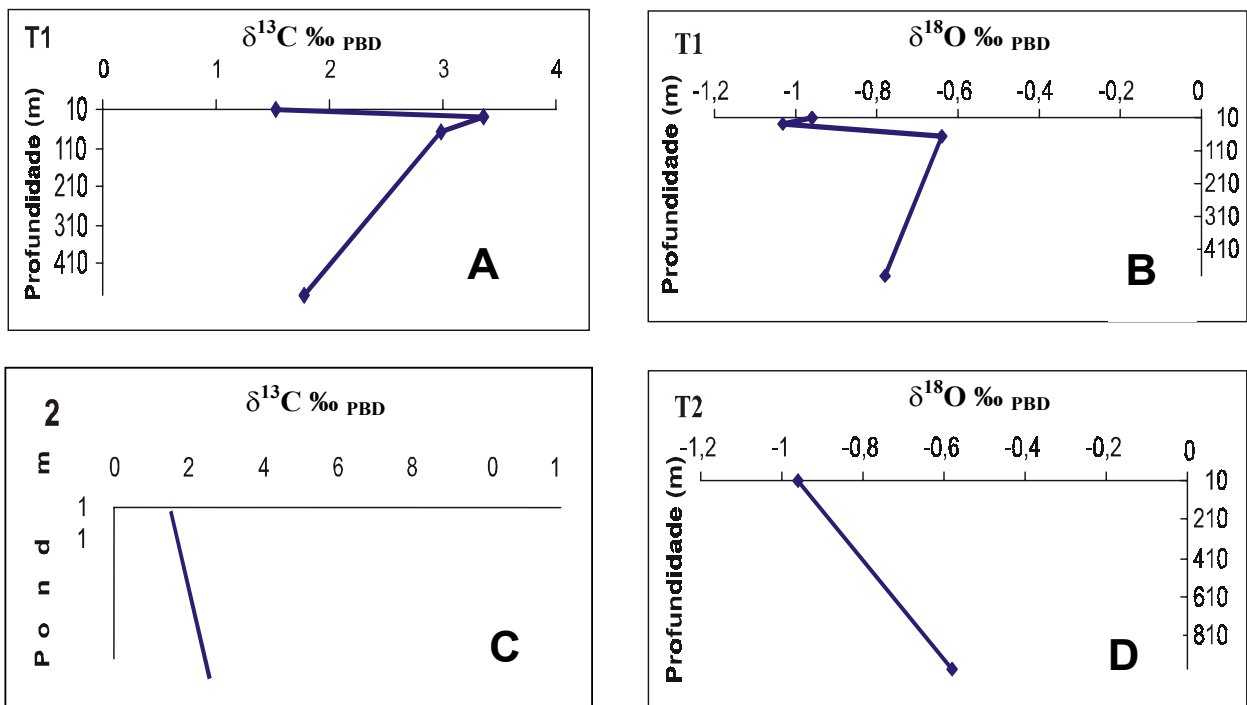


Figura 2- Comportamento de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas transversais T1 T2

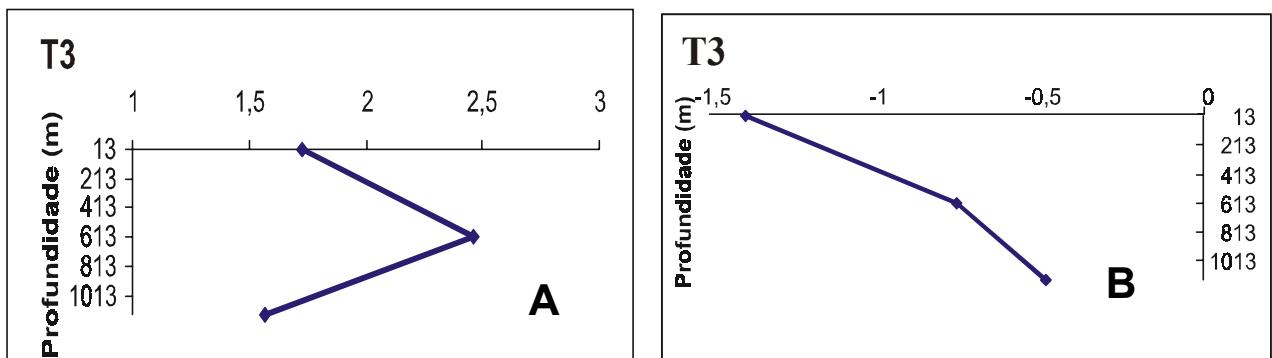


Figura 3- Comportamento $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ na linha paralela à costa T3

5. Implicações Ambientais

Como mencionado anteriormente, o uso de isótopos de oxigênio e carbono em amostras de foraminíferos tem servido para determinar características ambientais como produtividade primária, trocas no ciclo do carbono, mudanças climáticas locais e globais, determinação de ressurgência oceânica, temperatura da água do mar, entre outros. (Kroopnick, 1985, Heinze, 1994).

Na costa do estado do Ceará (T1,T2), a uma profundidade de 10 metros, a espécie identificada mais representativa é *Peneroplis* (bentônica). Nessa profundidade, $\delta^{13}\text{C}$ tem valor de 1,53‰_{PDB} e $\delta^{18}\text{O}$ tem valor de -0,96‰_{PDB}. Nas profundidades de 31 e 65 metros, a quase totalidade dos foraminíferos são bentônicos, onde *Quinqueloculina*, *Lamarckina*, *Anphistegina*, *Miliolina coiling*, *Miliolids*, *Ammonia* são as principais espécies e os valores de $\delta^{13}\text{C}$ diminuem de 3,4 a 2,9‰_{PDB} enquanto que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ aumentam de -1,03‰_{PDB} a -0,6‰_{PDB}. Na profundidade de 490m, onde 80% das espécies identificadas são planctônicas, onde *Globigerina praebuloides*, *Orbulina universa* são os principais, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ caem para 1,78‰, e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ continuam no mesmo nível (-0,8‰_{PDB}). Para a profundidade de 980 metros, as razões de $\delta^{13}\text{C}$ voltam a aumentar para 2,4‰_{PDB}, e $\delta^{18}\text{O}$ aumenta consideravelmente para -0,6‰_{PDB}. Nesta profundidade, predominam as espécies planctônicas *Globigerina pachiderma* e *Globigerina praebuloides*.

A figura 4 mostra a relação entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ com a porcentagem de espécies planctônicas e bentônicas e a profundidade, mostrando que onde existem mais espécies planctônicas, há uma tendência de aumento dos valores de $\delta^{13}\text{C}$, talvez por causa da alta produtividade das espécies no meio, fazendo com que o ambiente se torne empobrecido em ^{12}C , pois este é consumido pelas espécies durante seu desenvolvimento. Adicionalmente, nos pontos de maior razão P/B, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ tendem a aumentar.

No estado do Rio Grande do Norte (T3), aos 13 metros de profundidade, observa-se mais espécies de foraminíferos bentônicos em comparação com a profundidade de 10m na costa do estado do Ceará, dentre as quais destacam-se *Anphistegina* e *Miliolids*. As razões de $\delta^{13}\text{C}$ (1,7‰_{PDB}), continuam parecidas com as razões de $\delta^{13}\text{C}$ em T1 e T2, e $\delta^{18}\text{O}$ possui razões um pouco menores (-1,3‰), que aqueles aos dez metros de profundidade em T2. Na profundidade de 610 metros, onde predomina a espécie *Globigerina praebuloides*, o valor de $\delta^{13}\text{C}$ volta a subir (2,5‰_{PDB}). Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ tornam-se mais altos (-0,7‰_{PDB}). Na costa do estado de Pernambuco (1145m – T3), a grande maioria das espécies são planctônicas, predominando *Globigerina praebuloides* e *Globigerina pachiderma*. Em menor porcentagem, encontram-se as espécies bentônicas (*Lamarckina* e *Robulus*). Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ continuam diminuindo para 1,6‰

$\delta^{18}\text{O}$ alcança o máximo de -0.4‰ PDB (Fig 5 A,B).

A figura 6 mostra a comparação entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ entre todos os pontos de amostragem, observando-se o comportamento entre as razões isotópicas do Carbono e do Oxigênio de acordo com a profundidade. Para amostras ricas em foraminíferos bentônicos (profundidade entre 10 e 65m), observa-se duas tendências nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e valores similares de $\delta^{18}\text{O}$. Para as

espécies planctônicas, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ são mais altos em comparação com as espécies bentônicas e $\delta^{13}\text{C}$ apresenta aumento com a profundidade da amostra coletada. A amostra mais profunda, coletada na região de Pernambuco, não segue nenhum padrão específico talvez por ter sido coletada em uma área geográfica mais distante.

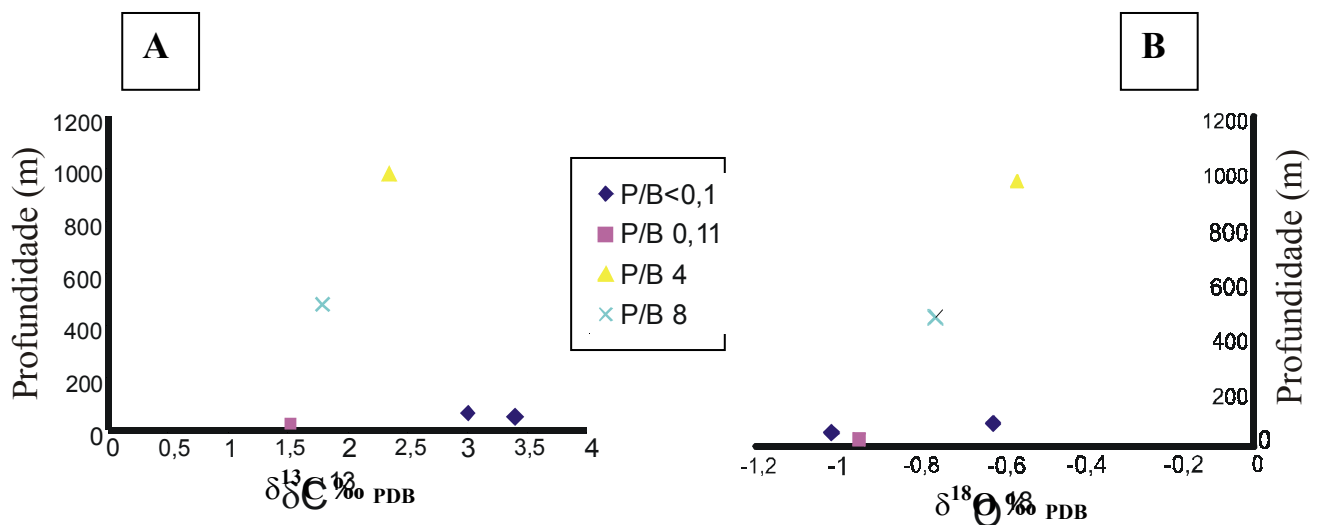


Figura 4- Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ com a profundidade e na margem continental do estado do Ceará (P/B a razão de planctônicos sobre bentônicos).

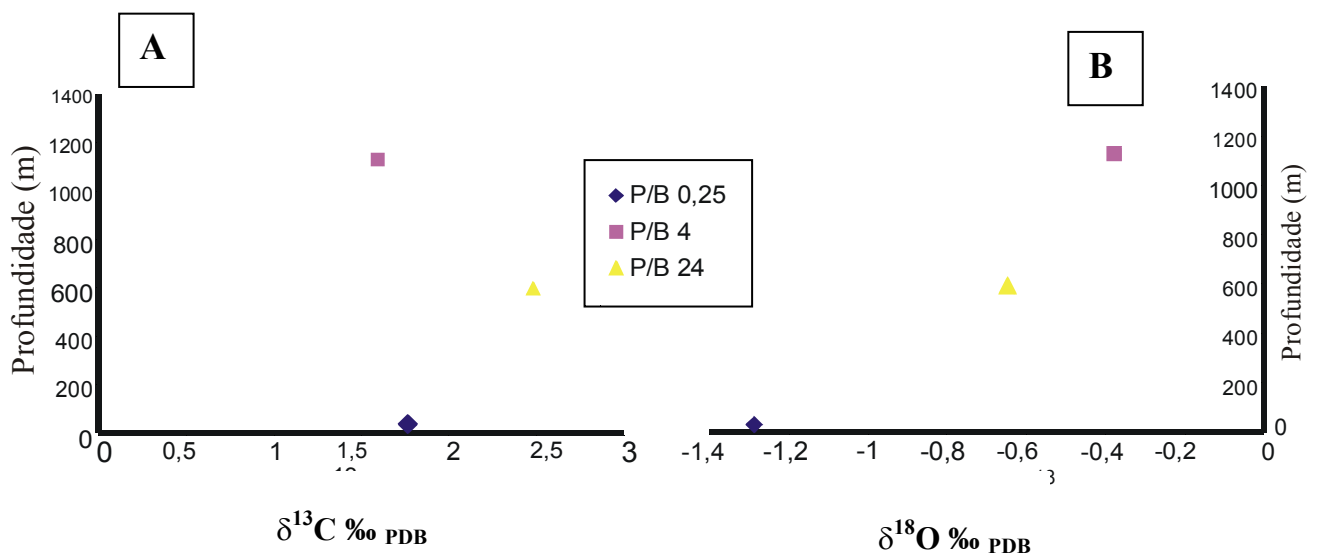


Figura 5- Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ com a profundidade e razão planctônicos/bentônicos na margem continental entre os estados de Rio Grande do Norte e Pernambuco.

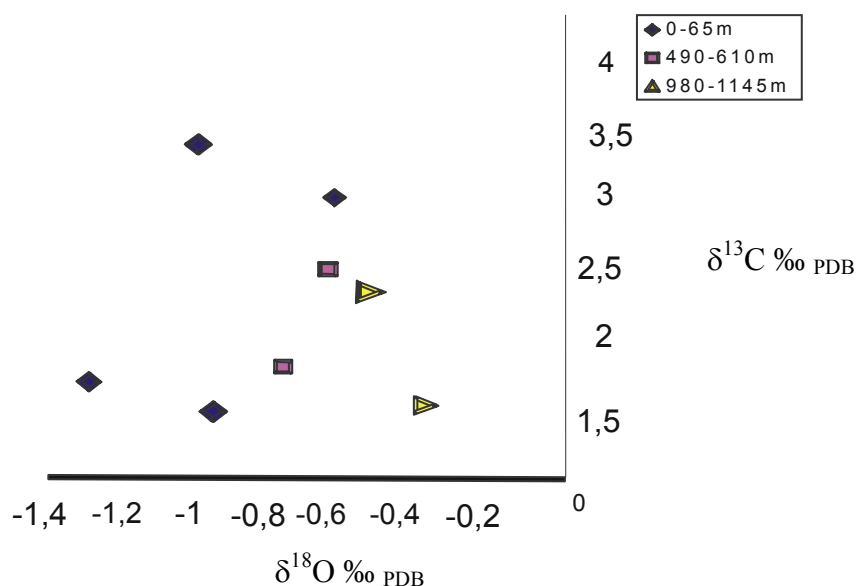


Figura 6-Comparação entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ entre todos os pontos de amostragem.

6. Cálculo de temperaturas

Segundo (Faure 1986) a determinação da temperatura a partir de isótopos de oxigênio é baseada no fato em que a composição isotópica do oxigênio no carbonato de cálcio ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)_C (calcita ou aragonita) difere da água do mar ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)_W a partir da qual precipitou, sob condições de equilíbrio. Isto resulta numa troca isotópica entre o carbonato e a água do mar, onde a composição isotópica do carbonato ($\delta^{18}\text{O}$)_C é dependente da temperatura de formação do mesmo. O mesmo autor afirma que a dependência do $\delta^{18}\text{O}$ com a temperatura foi determinada experimentalmente por Epstein *et al* (1953). O cálculo pode ser feito através da equação de Craig (1965): $T^{\circ}\text{C} = 16,9 - 4,2 (\delta_c - \delta_w) + (\delta_c - \delta_w)^2$, para materiais calcínicos. Ainda segundo (Faure 1986), nos oceanos atuais, o valor médio de $\delta^{18}\text{O}$ da água é de $-0,08\text{‰}$.

O cálculo das temperaturas da água do mar a partir da composição isotópica do oxigênio das carapaças de foraminíferos, especificadas na tabela 2, foi feito com base na equação de Craig (1965). Para a costa do estado do Ceará, nas profundidades entre 10 e 980m, onde se verificou a presença das espécies *Penepolis*, *Miliolina coiling*, *Anphistegina*, *Ammonia*, *Miliolids*, *Lamarckina*, *Globigerina praebulloides*, *Hoegludina*, *Orbulina universa*, *Triloculinella* a temperatura variou de 21 a 19°C, sendo menores as temperaturas calculadas para amostras coletadas em maior profundidade. Na área do estado do Rio Grande do Norte, para as

profundidades entre 13 e 610 metros, onde as espécies identificadas foram *Anphistegina*, *Globigerina praebulloides*, *Robulus*, a temperatura variou entre 22 a 19°C, observando-se a mesma diminuição com o aumento da profundidade. Para a amostra coletada no estado de Pernambuco, na profundidade de 1145 metros, onde as espécies identificadas foram *Globigerina praebulloides*, *Globigerina pachiderma*, *Gaudryina*, *Subbotina frondosa*, *Lamarckina*, *Robulus*, a temperatura calculada foi de 18°C.

Observa-se então que com o aumento da profundidade da amostra coletada, as temperaturas calculadas tendem a ser mais baixas.

Área	Transecto	Prof.(m)	Planct/Bent	δO^{18}	T°C
Ceará	T1	10	0,11	-0,9	21
Ceará		31	0,034	-1,03	21
Ceará		65	0,029	-0,7	19
Ceará		490	8	-0,8	20
Ceará	T2	10	0,11	-0,9	21
Ceará		980	4	-0,6	19
Rio Grande do Norte	T3	13	0,25	-1,3	22
Rio Grande do Norte		610	24	-0,7	19
Pernambuco		1145	4	-0,4	18

Tabela 2- Temperaturas calculadas a partir da composição isotópica do oxigênio em T1, T2 e T3.

7. Conclusões

As análises de isótopos estáveis de C e O em foraminíferos da margem continental do Nordeste brasileiro mostram que os valores de $\delta^{13}C$, obtidos das amostras, sofrem um aumento progressivo de 10m até 31m de profundidade, com seus valores passando de 1.6 a 3.4‰ PDB, podendo haver uma grande produtividade das espécies bentônicas nesta área. A partir daí, os valores de $\delta^{13}C$ sofrem uma progressiva diminuição, com pequenos aumentos nas profundidades de 610 e 980m no estado do Ceará, voltando a diminuir até a profundidade de 1145m, na costa do estado de Pernambuco.

Os valores de $\delta^{18}O$ se comportam de maneira inversa aos valores de $\delta^{13}C$, onde na profundidade de 10 a 31m os valores de $\delta^{18}O$ diminuem de -0.9 para -1.03‰PDB depois aumentando progressivamente, com pequenas variações nas profundidades de 490 e 610m, mas voltando a aumentar para -0.4‰PDB na profundidade de 1145m na costa do estado de Pernambuco.

O aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ até a profundidade de 65m (1,5 a 2,9) coincide com a diminuição na relação P/B. Isto pode indicar uma alta produtividade primária de espécies bentônicas neste intervalo. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ diminuem até os 31m (-0,9 a $-1,03\text{‰}_{\text{PDB}}$), para depois aumentarem até os 65m ($-0,6\text{‰}_{\text{PDB}}$). Isso coincide com uma diminuição regular na temperatura calculada a partir do isótopo de oxigênio (21 a 19°C).

Para as profundidades entre 490 e 980m, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ aumentam (1,8 a $2,4\text{‰}_{\text{PDB}}$) isto coincide com um aumento nas razões de P/B de 4 para 24, podendo caracterizar alta produtividade primária de espécies planctônicas. A partir daí, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ aumentam para $-0,6\text{‰}_{\text{PDB}}$, que coincide com uma diminuição na temperatura de 20 para 19°C . Para a profundidade de 1145m, o valor de $\delta^{13}\text{C}$ $1,6\text{‰}_{\text{PDB}}$, a razão P/B é igual a 4, o valor de $\delta^{18}\text{O}$ é $-0,4\text{‰}_{\text{PDB}}$ e a temperatura é igual a 18°C . Pode-se concluir que em termos gerais, com o aumento da profundidade, e da razão P/B, há um aumento dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e um aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, mas que para profundidades acerca de 65m, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ são mais altos, coincidindo com uma zona de baixo P/B.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao pessoal técnico do LABISE (Gilsa M. Santos e Wilma S. Bezerra) pelas análises de isótopos. Wanessa S. Marques gostaria de agradecer ao professor Valdir Manso, por ceder as amostras para análise, e à CAPES pelo apoio em forma de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- BILAU, U. H. & BOERSMA A. 1998. Introduction to Marine Micropaleontology. Elsevier. Netherlands. 376p.
- FAURE, G. 1986. Principles of isotope geology. Second edition. John Wiley & Sons. Canadá. 562p.
- FREIRE, G. S. S. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do estado do Ceará. Recife. 132 p. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco).
- FRANÇA, A. M. C. 1979. Geomorfologia da margem continental leste brasileira da bacia oceânica adjacente. In: PROJETO REMAC. Vol 7. 1979. Rio de Janeiro. Petrobrás/Cenpes/Dintep. 177p.
- HUANG, B.; JIAN, Z.; CHENG, X.; WANG, P. 2002. Foraminiferal responses to upwelling variations in the South China Sea over the last 220.000 years. MARINE MICROPALAEONTOLOGY. n° 47. 2002. pp 1-15.

- HEIZE, C. 1994. Glacial ocean carbon cycle modeling. In: CARBON CYCLING IN THE GLACIAL OCEAN: CONSTRAINTS ON THE OCEAN'S ROLE IN GLOBAL CHANGE. Edited by Rainer Zahn et al. Springer Verlag. 580p.
- HALE, W.; PFLAUMANN U. 1999. Sea-surface temperature estimations using a modern analog technique with foraminiferal assemblages from Western Atlantic quaternary sediments. In USE OF PROXIES IN PALEOCEANOGRAPHY, examples from the South Atlantic. Gerhard Fisher; Gerold Wefer. Editors. 1999. Springer-Verlag. Berlin. pp 69-90.
- HEMLEBEN, C. AND BIJMA, J. 1994. Foraminiferal population dynamics and stable carbon isotopes. In: CARBON CYCLING IN THE GLACIAL OCEAN: CONSTRAINTS ON THE OCEAN'S ROLE IN GLOBAL CHANGE. Edited by Rainer Zahn et al. Springer Verlag. 580 p.
- KROOPNICK, P. M. 1985. The distribution of ^{13}C of ΣCO_2 in the world oceans. DEEP SEA RESEARCH, Great Britain. 1985. Pergamon Press. Vol. 32. n^o 1. pp 57-84.
- MONT'ALVERNE, A. A. F. Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco. 1982. Recife. 196 p. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco).
- MACKENSEN, A.; HUBBERTEN H.; KUHN G. 1994. Benthic foraminiferal assemblages and the δC^{13} - signal in the Atlantic sector of the Southern Ocean: glacial-to-interglacial contrasts. In: CARBON CYCLING IN THE GLACIAL OCEAN: CONSTRAINTS ON THE OCEAN'S ROLE IN GLOBAL CHANGE. Edited by Rainer Zahn et al. Springer Verlag. 580 p.
- TESTA, V. & BOSENCE, D. W. J. Carbonate siliciclastic sedimentation on a high-energy, ocean-facing, tropical ramp, NE Brazil. 1998. In: CARBONATE RAMPS. Edited by V. P. Wright and T. P. Burchette. 1988. The Geological Society n^o 149. London. pp 55-72.

Editorial Office,
Academia Brasileira de Ciências
Rua Anfilóbio de Carvalho, 29, 3º andar (centro)
Rio de Janeiro, RJ, 20030-060

Recife, August 21th, 2004

Dear Prof. Lucia Previato,

Enclosed, please, find four printed copies of the manuscript “OCEANOGRAPHIC PARAMETERS IN CONTINENTAL MARGIN OF THE STATE OF CEARÁ (NORTHEASTERN BRAZIL) DEDUCED FROM C AND O ISOTOPES IN FORAMINIFERS” that is submitted for publication in the Annals of Academia Brasileira de Ciências. Electronic copy of the manuscript (Microsoft Word format) and Figures (Corel Draw version 11) are also enclosed.

Manuscript: Marques et al 2004 Academia Brasileira de Ciências

Figures: 1 through 6

We would like to suggest the following names for reviewers: Farid Chemale (Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS), Roberto Ventura Santos (Inst. de Geociências, UnB, Brasília, D.F.), René Rodrigues (Instituto de Geociências, UERJ, Rio de Janeiro, RJ), Cláudio Riccomini (Inst. de Geociências, USP, São Paulo, SP).

We hope that this manuscript matches with the high standards required by this Journal and that it can be accepted for publication in the Annals of this Academy.

Best regards

Wanessa Sousa Marques

Wanessa Sousa Marques
NEG-LABISE, Dept. de Geologia, UFPE
C.P. 7852
Recife, Pe, 50670-000

**OCEANOGRAPHIC PARAMETERS IN CONTINENTAL MARGIN OF THE STATE OF
CEARÁ (NORTHEASTERN BRAZIL) DEDUCED FROM C AND O ISOTOPES IN
FORAMINIFERS**

Marques, Wanessa S.¹, Menor, Eldemar de A.¹, Sial, Alcides N.¹, Manso, Valdir A.V.¹ and Freire, Satander S.²

¹ NEG-LABISE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, C.P. 7852, Recife, PE, Brazil, 50670-000.

² DEGEO, Department of Geology, Federal University of Ceará, C.P.6011, Fortaleza, Ceará, 60455-970, Brazil

Keywords: foraminifer, carbon and oxygen isotopes, continental margin, Ceará, Brazil

Running title: Oceanographic parameters in continental margin of Ceará

Academy section: Earth Sciences

Corresponding autor: e-mail: wsmarq@yahoo.com.br, NEG-LABISE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, C.P. 7852, 50670-000, Recife, Pe, Brazil. Phone (55-81) 2126-8242/8243

ABSTRACT

Specimens of Recent foraminifera of *Amphistegina radiata*, *Peneroplis planatus* and *Globigerinoides ruber*, from fifty samples of surface sediments of the continental margin of the state of Ceará, Brazil, have been analyzed for carbon and oxygen isotopes to investigate oceanographic parameters and determine the oceanic water $\delta^{18}\text{O}$. From a comparison between $\delta^{18}\text{O}$ values obtained for ocean water using the linear equations by Craig and Gordon (1965) and the one by Wolff et al. (1998), it became evident that the former yielded a value (0.2‰_{SMOW}) more reliable than the latter. Lower $\delta^{18}\text{O}$ values obtained for the ocean water in this continental margin resulted from continental water influence. $\delta^{18}\text{O}$ values of -0.3‰ to -1.5‰_{PDB} (benthic foraminifera) and -0.6‰ to -2.4‰_{PDB} (planktic foraminifera), attest to a variation of temperatures of oceanic water masses, in average, between 20 to 22°C in deep water and 24 to 27 °C, in surface water. $\delta^{13}\text{C}$ values from +3.2‰ to -0.2‰_{PDB} (benthic foraminifera) reflect a variation in the apparent oxygen utilization (AOU) in the continental margin and indicate that the environments of bacteriological decomposition of organic matter are not continuous along the investigated area.

INTRODUCTION

For more than four decades, isotope composition of foraminifer tests, as well as quantitative distribution of species have been regarded as a proxy for some oceanographic parameters. In addition, isotope composition of foraminifer tests has been largely used in estimating environmental parameters and in qualitative interpretation of the chemical composition of water masses as they reflect the isotopic composition and temperature in which species have developed (Niebler et al., 1999).

To examine temperature conditions, nutrients, apparent oxygen utilization (AOU), continental and seawater mixing in the continental margin of the state of Ceará, Brazil (Fig. 1) and $\delta^{18}\text{O}$ variation of seawater in the coast of the state of Ceará, C- and O-isotope of planktic

(*Globigerinoides ruber*) and benthic (*Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus*) foraminifer tests from fifty samples of surface sediments were analyzed. These samples were collected from sectors of the continental margin of this state (Fig. 2) at depths from 14 to 1250m, in the inner continental shelf to the continental slope.

Foraminifer tests of *Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus* are often observed in large amounts in sediments of the investigated area, except in the continental slope at depths greater than 70m and, therefore, are of fundamental importance for C and O-isotope analyses along with planktic foraminifera. Figure 2 shows sites of sampling organized in six sectors along the continental margin of the state of Ceará.

FIGURE 1

FIGURE 2

METHODS

Foraminifer tests were handpicked from fifty samples of superficial marine carbonate sediments collected during the Geomar XVIII and XXI operations (1981 and 1983) along the northeastern coast of Brazil, by the Almirante Câmara oceanographic ship of the Brazilian Navy. These samples were genteelly granted us by the Marine Geology Laboratory (LGMA) of the Federal University of Ceará (UFC).

Due to the high abundance of foraminifer tests in the samples investigated (occasionally, foraminifer tests occupied 90% per volume of sample) they have been easily handpicked under an optical microscope. Carbon and oxygen-isotope analyses were performed on specimens of the species *Globigerinoides ruber*, *Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus* that predominate over the other species.

Foraminifer tests were reacted with 100% orthophosphoric acid during 12 hours at 25°C. CO₂ released from this reaction was extracted in a high vacuum extraction line and cryogenically

cleaned, after the Craig's method (1957). CO₂ was analyzed for C and O isotopes in a dual inlet, multiple-collector SIRA II mass spectrometer, at the stable isotope Laboratory (LABISE) of the Department of Geology of the Federal University of Pernambuco, in Recife, Brazil.

The isotopic compositions were contrasted against the in-house Borborema skarn calcite (BSC) standard. The precision of analysis was better than 0.1‰, based on multiple analyses of this internal standard. Results are reported in the international δ‰ (delta permil) notation with respect to the PDB scale.

RESULTS AND DISCUSSION

Planktic foraminifers

Globigerinoides ruber lives at depths from 0 to 50m in seawater and compared to other planktic species, carbonate tests of this species form in oxygen isotope disequilibrium of 0.0‰ to -1.0‰ compared to seawater (Niebler et al., 1999).

Costa et al. (2003) evaluated oxygen isotopic disequilibrium in foraminifer tests from the equatorial Atlantic and for that they used Kim and O'Neil (1997) equation to calculate δ¹⁸O values of calcite precipitated in equilibrium with seawater.

$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB calcite equil.}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{W SMOW}}) - 0.27 + 3.25 - (0.2 \times T)$ (A) Kim and O'Neil (1997).

Apparent temperatures of seawater (without vital-effect correction) in this study were calculated using Epstein et al. (1953) equation. In plugging the obtained temperature values in equation (A), assuming a value of δ¹⁸O of 0.92‰_{SMOW} for the seawater of the northeastern coast of Brazil (in Wolff et al., 1998), a decrease of about -0.5 to -0.6‰_{PDB} for δ¹⁸O values was observed for all samples of *Globigerinoides ruber*.

From then on, all samples which contained *Globigerinoides ruber* were regarded as in oxygen-isotope disequilibrium of -0.6‰ and their δ¹⁸O values, after correction, were used to

calculate temperatures for surface waters. In this study, Epstein et al. (1953) equation modified by Craig (1965) was used: $T^{\circ}\text{C} = 16.9 - 4.2 (\delta\text{c} - \delta\text{w}) + 0.13 (\delta\text{c} - \delta\text{w})^2$

Benthic foraminifera

Foraminifer tests of the *Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus* species were selected among the benthic foraminifers because they are present in the majority of the studied samples, even in those from the continental slope, although in small amount (except in the site 5, at 1000m depth), assuring co-existence between them in same conditions of temperature and salinity.

Saraswati et al. (2004) studied, among other species, *Peneroplis planatus*, Akajima Sea, Japan, that lives in conditions similar to those of tropical environments and they found an enrichment of 0.8‰ for $\delta^{18}\text{O}$ values in foraminifer tests of this species. The same authors argued that the genus *Amphistegina* calcify their tests in close isotope equilibrium to the seawater and some species reach a maximum enrichment of 0.3‰ of their $\delta^{18}\text{O}$ values.

Applying the same procedure used for the planktic species to verify the vital effect in the *Peneroplis planatus* species, an isotopic enrichment of $\delta^{18}\text{O}$ from 0.3 to 2.1‰ was observed and an average correction of 0.95‰ was applied to all $\delta^{18}\text{O}$ values of this species before calculating the final temperatures for bottom water in the studied region. For the species *Amphistegina radiata*, the same procedure point to small enrichment reaching 0.1 to 0.2‰. This variation not strongly influenced the temperature calculation, giving differences in decimal. Therefore, vital effect was not considered for *Amphistegina radiata*.

Carbon and Oxygen isotopes

To investigate possible changes of oceanographic parameters with depth and to facilitate the interpretation of experiments, we chose adjacent sectors containing the samples along the coast of Ceará (Fig. 2), extending from the inner shelf to the continental slope. Carbon and oxygen-isotope values, a list of the analyzed foraminifer samples and temperatures for water of the continental margin of the state of Ceará are found in Tables 1 through 3.

The Jericoacoara sector displays $\delta^{18}\text{O}$ values of foraminifer tests from -1.1‰ to $-0.3\text{‰}_{\text{PDB}}$ (Table 1) while the Acaraú sector exhibits values from -0.4 to $-1.2\text{‰}_{\text{PDB}}$ in sample 2-27a collected from 25m depth, being this sector the one which receives more influence from continental waters. In the Camocim sector, $\delta^{18}\text{O}$ varies from -0.3 to $-1.4\text{‰}_{\text{PDB}}$. The intermediate sector has $\delta^{18}\text{O}$ values from -0.5‰ to -1.1‰ while the deep-water sectors display $\delta^{18}\text{O}$ values from -0.4 to $-1.0\text{‰}_{\text{PDB}}$.

A significant variation of $\delta^{18}\text{O}$ is observed in shallow-water sectors (continental shelf) where values almost double from one sample to another in one same sector. This variation could be associated to the large influence of continental waters since along this area, there are rivers with variable size and fluvial discharge such as the Jaguaribe, Acaraú, Curu and Coreaú rivers. In deep-water sectors, variations are accounted by the influence of oceanic streams.

TABLE 1

TABLE 2

TABLE 3

The Acaraú sector shows lower $\delta^{18}\text{O}$ values in the environment of calcification of species compared to other shallow-water sectors in the continental shelf. This sector is the one which receives more influence of continental waters and, based on $\delta^{18}\text{O}$ values around -1.5‰ (at 2, 21 and 25m depth) and -1.2‰ (at 2.27 and 25m depth), we suggest that continental-water influence reaches at least 25m depth, regarding that oceanic water along the coast of the state of Ceará has high-wave energy allowing an intense mixing of continental and oceanic waters. This does not imply, however, that other sectors share the same features since the influence they receive is exerted by smaller rivers and also there is no sample from near larger rivers. Besides, it is difficult to estimate how much continental waters influence the ocean surface due to the fact that cores with planktic foraminifers were collected far from the coast.

$\delta^{18}\text{O}$ for the water of along the coast of Ceará

It has been kept that $\delta^{18}\text{O}$ and δD of the ocean water are close to zero or show narrow interval of variation around zero and that oxygen fractionation during evaporation of the ocean water not only affects its isotopic composition but also affects its salinity (e.g. Faure, 1986).

Craig (1966) showed that the salinity of surface, intermediate and deep waters of the Red Sea vary from 36 to 41‰ while seawater $\delta^{18}\text{O}$ varies from 0.6 to 0.9‰_{SMOW}. Craig and Gordon (1965) studied $\delta^{18}\text{O}$ values and salinity of the North Atlantic waters and proposed a linear equation showing the co-variation of $\delta^{18}\text{O}$ and water salinity: $\delta^{18}\text{O}_w = -21.2 + 0.61S$; where S is the salinity in permil units.

Wolff et al. (1998) analyzed *Globigerinoides sacculifer* in samples of sediments of the Ceará Rise, in the northeastern coast of Brazil, and proposed that temperature, salinity and $\delta^{18}\text{O}$ are mainly controlled by the inflow of continental water and local rains and adopted the equation: $\delta^{18}\text{O}_w = 0.182*S - 5.6$ to calculate $\delta^{18}\text{O}$ of the seawater and found a value of +0.92‰_{SMOW} for $\delta^{18}\text{O}$ of the surface seawater. To calculate the $\delta^{18}\text{O}$ for the seawater, they used the salinity value of 35.8‰ of Levitus et al. (1994).

The Ceará Rise, located relatively far from the coast of Ceará in the northeastern coast of Brazil, is a seamount that rises from the abyssal plane to 4300m. Freire (1985) measured a water salinity of 35‰ for the ocean water along this coast, next to Fortaleza town, a value which has to do with the influence of continental waters.

There is a co-variation between salinity and seawater $\delta^{18}\text{O}$ as depicted from Wolff et al.(1998) and Craig and Gordon (1965) equations. In the attempt to verify which of these two equations would yield salinity values closer to the 35‰ value reported by Freire (1985) for the continental shelf of the state of Ceará (Table 4) we have used the planktic foraminifer $\delta^{18}\text{O}$ data from this study, with vital effect correction.

TABLE 4

As shown in Table 4, values for salinity calculated by Craig and Gordon (1965) equation are closer to 35‰. Thus, it seems that seawater $\delta^{18}\text{O}$ in a shallow and narrow tropical continental shelf, influenced by continental waters like the Ceará coast, Craig and Gordon (1965) equation seems to be the most appropriate. From then on, this equation ($\delta^{18}\text{O}_w = -21.2 + 0.61S$) has been used assuming the salinity of 35‰ to calculate the $\delta^{18}\text{O}$ of the seawater in the continental shelf of the state of Ceará, and a value of 0.2‰_{SMOW} was obtained.

A $\delta^{18}\text{O}$ value of 0.9‰_{SMOW} for the seawater calculated by Wolff et al. (1998) probably reflects a more saline ambient of the Ceará Rise, while the value of 0.2‰_{SMOW} determined here, portrays a large continental-water influence. Perhaps the ambient studied by Wolff et al. (1998) does not receive a large influence of continental water as anticipated, but it is mainly influenced by oceanic currents and by the precipitation/evaporation rate.

$\delta^{13}\text{C}$ and apparent oxygen utilization (AOU)

The $\delta^{13}\text{C}$ of foraminifer shells is usually not influenced by the temperature but is largely influenced by photosynthesis in the oceanic surface and by bacteriological decomposition of organic matter in the oceanic floor. During the photosynthesis of sea weeds, carbon dioxide-fixing enzymes have strong affinity for the lighter CO_2 molecule. As a result, the photic zone of the oceanic water that is characterized by a high primary productivity is ^{13}C enriched since ^{12}C remains tied to the organic-matter structure. Simultaneously, carbon fixed by the organic matter is released during bacteriological decomposition of the organic matter in deep waters, resulting in a ^{13}C -depleted environment.

Considering the oxygen behavior in the water of the oceans, Hemleben and Bijma (1994) suggested an empirical relationship between $\delta^{13}\text{C}_{(\Sigma\text{CO}_2)}$ and AOU in this environment. They explained that the oceanic surface is enriched in oxygen produced during the photosynthesis and enriched in ^{13}C as a result of ^{12}C fixation by the organic matter produced. In deep water, oxygen is consumed by the bacteriological decomposition of organic matter and the ^{13}C level is lowered by

the release of ^{12}C to the environment. This implies a direct relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and dissolved oxygen in the marine environment.

In the present study, one established empirical relationships between $\delta^{13}\text{C}$ of benthic foraminifer tests and AOU for each sector of the studied area, determining possible sites of maximum and minimum AOU and release of ^{12}C to the environment (Figs. 3 and 4).

A large variation of $\delta^{13}\text{C}$ has been observed in the environment of each sector: values vary from 0.7 to 3.2‰ in the Jericoacoara sector, 0.9 to 2.9‰ in the Acaraú sector, 0.6 to 3.3‰ in the Camocim sector, 0.8 to 2.0‰ in deep waters A, -0.2 to 1.4‰ in deep waters B. If it is taken into account that nutrients are used in the photic zone for the animal metabolism and released during the bacteriological decomposition of the organic matter, a strong negative relationship is seen between $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{CO}_2}$ and the amount of nutrients of the environment.

In the Jericoacoara sector, from 20 to 30m deep there is a decrease in the $\delta^{13}\text{C}$ values from 3.2‰ to 0.5‰ (Fig. 3). In this depth range, probably more ^{12}C is released to the environment; there is a larger nutrient concentration and decomposition of organic matter, and more AOU. From 20 to 40m deep, the AOU decreases as well as $\delta^{13}\text{C}$ values. At depths greater than 40m there is little variation.

The Acaraú sector shows two zones of AOU: (1) a narrow one between depths of 14 to 15m with progressively lower $\delta^{13}\text{C}$. Between 15 and 22m deep there is an intermediate section with increase of $\delta^{13}\text{C}$ values from 1.7 to 3.0‰; (2) a second zone of maximum AOU between depths of 22 to 25m with a large decrease of the $\delta^{13}\text{C}$ values (3.0 to 1.0‰).

The Camocim sector has three different zones of AOU: (1) the first one between 15 and 26m depths, with small variations of $\delta^{13}\text{C}$ and slight increase in AOU; (2) a second zone between 26 to 42m depths, characterized by a large decrease in the $\delta^{13}\text{C}$ values (3.4 to 0.6‰) and consequently increase in AOU; and (3) a third zone at depths between 45 to 75m, characterized by strong variations in $\delta^{13}\text{C}$, but smaller than in the second zone.

One important factor that influences the $\delta^{13}\text{C}$ values, among several ones available in the environment to construction of foraminifer test, is the species respiration. In a given environment, in surface or in deep water, the larger the quantity of nutrients available, the larger the productivity of species that inhabit this site and, consequently, the larger the amount of CO_2 released to the environment due to species respiration.

FIGURE 3

FIGURE 4

In this case, the CO_2 is ^{13}C enriched since organisms have the preference for the ^{12}C for their metabolism. This way, one can observe an empirical relationship between the $\delta^{13}\text{C}$ values and the quantities of living species.

Species observed under an optical microscope have been counted (Table 5) and compared with the $\delta^{13}\text{C}$ values in each sample (Fig.5). It was verified that in deep water A and B, Acaraú and Jericoacoara sectors the $\delta^{13}\text{C}$ does not seem to be influenced by the species respiration and, therefore, there are other important factors in the environment playing this role. However, in the Camocim and Intermediate sectors, the influence of the respiration over the $\delta^{13}\text{C}$ is remarkable.

TABLE 6

FIGURE 5

Temperature

Temperatures obtained in this study (Figs. 4 and 5) show that in the Jericoacoara sector, at depths between 20 and 30m, there is an increase from 21 to 25 °C. At depths between 20 and 40m, there is a decrease in temperature from 25 to 22.5 °C and beyond the depth of 40m, variations are little. The Acaraú sector shows, at depths between 14 and 15m, a relatively large decrease of temperature and a small increase at depths from 15 to 22m.

The Camocim sector is characterized, at depths between 15 to 26m, by small variation in temperature (23 to 24°C), and between 26 to 42m there is an increase from 21 to 25 °C. The deep currents that come cross the sectors Jericoacoara and Acaraú, at depths between 15 to 20, have a minimum and maximum of 20 and 22 °C respectively (cores 1-34, 1-36, 2-108, and 2-95; Fig. 6). Water with similar temperature is found in the Intermediate sector, at depths between 40 to 50m (cores 11 and 12). In shallower areas (14m deep or less), the temperature of deep currents are from 24 to 25°C (core 1-38, Acaraú sector). Similar temperature was observed in the core 7 in surface water of the Camocim sector.

The estimated temperatures for surface water represent values from the surface down to 50m depth due to the habitat of the species *Globigerinoides ruber*. The surface currents, generally warmer than deep waters, show temperature of 26°C in cores 13, 90 and 91 (Table 3). Surface temperatures of 28°C occurs in core 9.

The Figure 6 shows water mass distribution with different temperatures, along the coast of Ceará. Therefore, examining this figure, one verifies the behavior of water masses in continental shelf of the state of Ceará varying between currents with different temperatures along the coast. This behavior could extend beyond the continental shelf, since in figure 6, cores with depths greater than 80m show the interaction of waters with different temperatures (depths are shown in tables 1, 2).

FIGURE 6

CONCLUSIONS

From the comparison between Craig and Gordon (1965) and Wolff et al. (1998) linear equations, one suggests that to calculate the $\delta^{18}\text{O}$ of the seawater in a continental margin like that

of the state of Ceará, narrow, shallow and influenced by continental waters, the Craig and Gordon (1965) equation seems to be more appropriate.

It is proposed here that $0.2\text{‰}_{\text{SMOW}}$ is the $\delta^{18}\text{O}$ value for the water of the continental shelf of Ceará, a value relatively lower when contrasted with $0.92\text{‰}_{\text{SMOW}}$ obtained by Wolff et al. (1998), reflecting a major influence of continental water to the environment. Therefore, perhaps the environment of Ceará Rise does not receive much continental influence as assumed. Perhaps it is being more influenced by oceanic currents and by the precipitation/evaporation rate.

From the estimated temperatures, one assumes that the behavior of the water masses in the continental shelf of the state of Ceará result from the interaction of a variety of currents along the coast, with different temperatures, and that this behavior can extend beyond the continental shelf.

The cores with lower $\delta^{18}\text{O}$ values of foraminifer test is associated with the proximity of the mouth of rivers being the cores of the Acaraú sector the most affected, next to the Acaraú river mouth, regarded as an important river in the coast of Ceará. Based on $\delta^{18}\text{O}$ values of $-1.5\text{‰}_{\text{PDB}}$ (core 2-21, 25m depth) and $-1.2\text{‰}_{\text{PDB}}$ (core 2-27a, 25m depth), both in the Acaraú sector, it is supposed that the influence of the continental waters reaches at least a depth of 25m, considering the wave energy, and not implying, however, that other sectors display same characteristics, due to the influence of smaller rivers. Regarding distribution of apparent oxygen utilization (AOU) in deep waters of the continental shelf of the state of Ceará obeys the following pattern: (a) in the western portion of the continental shelf (Camocim sector), the maximum AOU zone is between depths of 30 to 45m, while the minimum AOU zone is between 15 to 30m; (b) in the eastern portion (Jericoacoara sector), the maximum AOU zone is situated between the depths of 18 to 30m and the minimum AOU zone is between 30 and 40m. In the Acaraú sector, west of Fortaleza, a small maximum AOU zone is between 13 and 15m. Between depths of 15 to 22m, there is an intermediate zone and other maximum AOU zone between 22 and 25m. Apparently, the AOU zones are not continuous along the inner and outer continental shelves of the state of Ceará.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Vilma S. Bezerra and Gilsa M. Santana (NEG-LABISE) for the assistance with stable isotope analyses. WSM also wants to express her gratitude to the CAPES Agency for a scholarship granted to her during her Master degree work at the Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil. This is the NEG-LABISE contribution n 240.

RESUMO

Amphistegina radiata, *Peneroplis planatus* e *Globigerinoides ruber*, presentes em cinquenta amostras de sedimentos superficiais da margem continental do Estado do Ceará, Brasil, foram analisados quanto à composição isotópica do Oxigênio e Carbono para investigar parâmetros oceanográficos, e um possível valor de $\delta^{18}\text{O}$ do oceano.

Foi feita uma comparação entre as equações lineares de (Craig e Gordon, 1965 em Faure, 1986), e de Wolff et al., (1998), e verificou-se que a primeira equação foi mais apropriada para o cálculo de $\delta^{18}\text{O}$ do oceano, na área estudada, encontrando-se um valor de 0,2‰_{SMOW}.

Os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ estão associados à desembocadura dos rios, refletindo a influência continental. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ de -0,3‰ a -1,5‰_{PDB} (bentônicos) e -0,6‰ a -2,4‰_{PDB} (planctônicos), em toda a área, indicam variação na temperatura das massas de água entre 20 a 22°C, nas águas de fundo, e entre 24 a 27 °C nas águas de superfície em média. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ de +3,2‰ a -0,2‰_{PDB} (bentônicos), em toda a área, indicam variação na distribuição da Utilização Aparente do Oxigênio (AOU) na margem continental, e indicam que os ambientes de decomposição bacteriológica da matéria orgânica não são contínuos ao longo da área de estudo.

REFERENCES

- Bilal UH and Boersma A. 1998 (Ed.). Introduction to marine micropaleontology. Elsevier, Netherlands. 376p.
- Costa KB, Toledo FAL, Chemale Jr F, Moura CAV. 2003. Oxygen isotopic composition of benthic foraminifera: Core-top calibration. In: IV South American Symposium on Isotope Geology. Salvador, Short papers: 334-336.
- Chaves HAF. 1979 (Ed.). Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Projeto Remac. Petrobrás/Cenpes/Dinep. Rio de Janeiro. 177p
- Craig H. 1966. Isotopic Composition and origin of the red sea and salton sea geothermal brines. Science. 154: 1544-1548.
- Craig H, Gordon LI. 1965. Deuterium and Oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Stable Isotopes in Oceanographic studies and paleotemperatures. Spoleto, July 26-27, 1965. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, 1-22.
- Epstein S. and Mayeda TK. 1953. Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. Geochim Cosmochim Acta. 4: 213-224
- Faure G. 1986. Principles of isotope geology. Second edition. John Wiley & Sons, 562 p.
- Freire GSS. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do estado do Ceará. Recife. Universidade Federal de Pernambuco. Master's degree thesis, 132 p.
- França AMC, Coutinho PN, Summerhayes CP. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental brasileira. Rev Bras Geoc. 6: 71-88
- Hemleben Ch, Bijma J. 1994. Foraminiferal population dynamics and stable carbon isotopes. In: Zahn R., Pedersen T F, Kaminski M A, Labeyre L (Ed), Carbon cycling in the glacial ocean: Constraints on the ocean's role in global change. Springer Verlag, Germany. p. 145-165.
- Hale W, Pflaumann U. 1999. Sea surface temperature estimations using a modern analog technique with foraminiferal assemblages from Western Atlantic quaternary sediments. In: Fischer G,

- Wefer G. (Ed), Use of proxies in paleoceanography. Springer Verlag, Germany. p. 69-90.
- Johnson HL, Marshall DP. 2002. Localization of abrupt change in the North Atlantic thermohaline circulation. *Geophysical Research letters*. 29 (6):
- Levitus S, Burgett R, and Boyer TP. 1994. *World Ocean Atlas 1994. V3: salinity*. Washington, D.C. NOAA, U.S. Department of Commerce. 99p.
- Mucke S.K, Obershansli H. 1999. The distribution of living planktic foraminifera in relation to Southeast Atlantic oceanography. In: Fischer G, Wefer G. (Ed), Use of proxies in paleoceanography. Springer Verlag, Germany. p. 91-115.
- Mackensen A, Grobe H, Hubberten HW, Kuhn G. 1994. Benthic foraminiferal assemblages and the $\delta^{13}\text{C}$ signal in the Atlantic sector of the southern ocean: Glacial to interglacial contrasts In: Rainer Z, Thomas FP, Michael AK, Laurent L. (Ed.). *Carbon cycling in the glacial ocean: Constraints on the ocean's role in global change*. Springer Verlag, Germany. p. 105-135.
- Mackensen A and Bickert T. 1999. Stable Carbon isotopes in benthic foraminifera: Proxies for deep and bottom water circulation and new production. In: Fisher G and Wefer G. (Ed.). *Use of proxies in paleoceanography*. Springer-Verlag, Germany. p. 229-254.
- Mulitza S, Boltovskoy D, Donner B, Meggers H. 2003. Temperature: $\delta^{18}\text{O}$ relationships of planktonic foraminifera collected from surface waters. *Paleo Paleo Paleo*. 202: 143-152.
- Mulitza S, Arz H, Mucke K, Moos C, Niebler HS, Patzold J. and Segl M. 1999. The South Atlantic carbon isotope record of planktic foraminifera. In: Fischer G and Wefer G. 1999 (Ed.), *Use of proxies in paleoceanography*, Germany, Springer Verlag. p. 427-445.
- Mulitza S, Dürkoop A, Hale W, Wefer G. 1997. Planktonic foraminifera as recorders of past surface-water stratification. *Geology*. 25 (4): 335-338.
- Niebler H-S, Hubberten H-W, Gersonde R. 1999. Oxygen isotopes values of planktic foraminifera: A tool for the reconstruction of surface water stratification. In: Fischer G and Wefer G. 1999 (Ed.), *Use of proxies in paleoceanography*, Germany, Springer Verlag: 165-189.

- Saraswati KP, Seto K, Nomura R. 2003. Oxygen and carbon isotopic variation in co-existing larger foraminifera from a reef flat at Akajima, Okinawa, Japan. *Marine Micropalontology* 50: 339-349.
- Stieglitz J L, Curry W B, Slowley N. 1999. A geostrophic transport estimate for the Florida Current from the Oxygen isotope composition of benthic foraminifera. *Paleoceanography* 14 (3): 360-373.
- Seidov D, Haupt J B. 2003. Freshwater teleconnections and ocean thermohaline circulation. *Geophysical Research letters* 30 (6):
- Testa V & Bosence DWJ. 1998. Carbonate siliciclastic sedimentation on a high-energy, ocean-facing, tropical ramp, NE Brazil. In: Wright et al (Ed). *Carbonate Ramps*. The Geological Society, n. 149. London. p. 55-72.
- Wolff T, Mulitza S, Arz H, Patzold J, Wefer G. 1998. Oxygen isotopes versus CLIMAP (18ka) temperatures: A comparison from the Tropical Atlantic. *Geology* 26 (8): 675-678.
- Wolf T, Grieger W, Hale W, Durkoop A, Mulitza S, Patzold J, Wefer G. 1999. On the reconstruction of paleosalinities. In: Fischer G and Wefer G. (Ed.), *Use of proxies in paleoceanography*, Germany, Springer Verlag. p. 207-228.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Localization of studing area

Figure 2. Cores and sectors along the coast of Ceará.

Figure 3. Temperature and isotopic values in shallow waters sectors.

Figure 4. Temperature and isotopic values in deep waters and intermediate sectors.

Figure 5- Number of observed species and $\delta^{13}\text{C}$ values with depth.

Figure 6- Temperatures and possible behavior of water currents along of coast of Ceará.

Sample	depth (m)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰PDB}}$	species	temp. °C
Jericoacoara					
2- 93	16	3,2	-0,3	<i>Peneroplis planatus</i>	23
2- 94	17	2,7	-0,5	<i>Peneroplis planatus</i>	23
2- 96	17	3,1	-0,4	<i>Peneroplis planatus</i>	23
1- 35	18	3,1	-0,4	<i>Peneroplis planatus</i>	23
1- 36	18	2,7	-0,6	<i>Peneroplis planatus</i>	22
1- 34	19	2,4	-0,5	<i>Peneroplis planatus</i>	21
2- 105	30	0,7	-1,5	<i>Amphistegina radiata</i>	25
2- 104	40	1,4	-1,1	<i>Amphistegina radiata</i>	23
2- 102	75	1,2	-0,8	<i>Amphistegina radiata</i>	22
Acaraú					
1- 38	14	2,6	-0,8	<i>Peneroplis planatus</i>	25
1- 39	15	1,8	-0,9	<i>Amphistegina radiata</i>	22
2- 108	15	2,0	-0,8	<i>Amphistegina radiata</i>	22
1- 40	18	2,3	-0,7	<i>Peneroplis planatus</i>	24
2- 109	16	2,1	-1,7	<i>Amphistegina radiata</i>	22
2- 20	21	2,6	-0,6	<i>Peneroplis planatus</i>	24
2- 27b	22	2,9	-0,4	<i>Peneroplis planatus</i>	23
2- 27 ^a	25	1,9	-1,2	<i>Peneroplis planatus</i>	26
2- 21	25	0,9	-1,5	<i>Amphistegina radiata</i>	25
Camocim					
2- 71	18	2,1	-0,3	<i>Peneroplis planatus</i>	23
2- 68	17	2,5	-0,7	<i>Peneroplis planatus</i>	23
2- 70	17	3,1	-0,4	<i>Peneroplis planatus</i>	24
1- 25	28	2,8	-0,5	<i>Peneroplis planatus</i>	23
1- 33	28	3,3	-0,3	<i>Peneroplis planatus</i>	23
93	45	0,6	-1,4	<i>Amphistegina radiata</i>	22
1- 32	45	3	-0,5	<i>Peneroplis planatus</i>	24
1- 31	50	2,3	-0,5	<i>Peneroplis planatus</i>	23
1- 29	70	1,6	-0,9	<i>Amphistegina radiata</i>	23

Table 1. Values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{‰PDB}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$, temperature and species in Jericoacoara, Acaraú and Camocim sectors.

Sample	depth (m)	$\delta^{13}\text{C} \text{‰}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}_{\text{PDB}}$	species	temp. °C
Deep water A					
13	1150	2,0	-0,6	<i>Amphistegina radiata</i>	21
105	1160	1,0	-1,0	<i>Amphistegina radiata</i>	22
104	1170	1,1	-1,0	<i>Amphistegina radiata</i>	22
17	1200	0,8	-1,0	<i>Amphistegina radiata</i>	22
108	1230	1,2	-1,0	<i>Amphistegina radiata</i>	23
05	1240	1,1	-1,1	<i>Amphistegina radiata</i>	23
106	1240	1,8	-0,8	<i>Amphistegina radiata</i>	22
71	1250	2,0	-0,4	<i>Amphistegina radiata</i>	20
Deep water B					
91	800	0,7	-1,2	<i>Amphistegina radiata</i>	23
92	800	1,3	-0,9	<i>Amphistegina radiata</i>	22
06	900	1,0	-1,0	<i>Amphistegina radiata</i>	23
94	1000	-0,2	-1,1	<i>Amphistegina radiata</i>	23
07	1040	1,5	-0,6	<i>Amphistegina radiata</i>	25
09	1050	1,4	-0,9	<i>Amphistegina radiata</i>	22
72	1050	1,4	-1,0	<i>Amphistegina radiata</i>	23
2- 95	1060	3,0	-0,4	<i>Peneroplis planatus</i>	20
90	1070	1,7	-0,7	<i>Amphistegina radiata</i>	18
Intermediary					
12	40	3,0	-0,5	<i>Peneroplis planatus</i>	20
11	45	1,3	-0,9	<i>Amphistegina radiata</i>	22
89	50	1,0	-1,1	<i>Amphistegina radiata</i>	23

Table 2. Values of $\delta^{18}\text{O} \text{‰}_{\text{PDB}}$, $\delta^{13}\text{C} \text{‰}_{\text{PDB}}$, temperature and species in deep A, B and intermediate sectors.

Sample	depth (m)	$\delta^{13}\text{C} \text{‰ PDB}$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰ PDB}$	species	temp. °C
11	45	2,4	-1,2	<i>Globigerinoide ruber</i>	27
2- 102	75	2,4	-0,6	<i>Globigerinoide ruber</i>	24
05	1000	2,3	-1,1	<i>Globigerinoide ruber</i>	27
92	800	2,3	-0,6	<i>Globigerinoide ruber</i>	24
06	900	2,3	-1,2	<i>Globigerinoide ruber</i>	27
107	1250	2,3	+2,4	<i>Globigerinoide ruber</i>	28
91	800	2,3	-1,01	<i>Globigerinoide ruber</i>	26
13	1150	1,6	-1,0	<i>Globigerinoide ruber</i>	26
09	1050	2,6	-1,4	<i>Globigerinoide ruber</i>	28
90	1070	2,4	-0,9	<i>Globigerinoide ruber</i>	26

Table 3. Results of $\delta^{18}\text{O} \text{‰ PDB}$, $\delta^{13}\text{C} \text{‰ PDB}$ and temperature in planktic foraminifer in samples along studing area.

Sample	$\delta^{18}\text{O} \text{‰ PDB}$	Sal Epstein (‰)	Sal Levitus (‰)
w 11	-0,6	33	27
w2 102	0	34	31
w 05	-0,5	33	28
w 92	0	34	31
w 06	-0,6	33	27
w 107	1,80	37	41
w 91	-0,4	34	29
w 13	-0,5	33	28
w 09	-0,8	33	26
w 90	-0,4	34	29

Table 4. Salinity calculation by equations of (Epstain and Mayeda, 1953) and (Levitus et al. 1994) and values of $\delta^{18}\text{O} \text{‰ PDB}$ correct of vital effect.

Jericoacoara		Acaraú		Camocim	
sample	n species	sample	n species	sample	n species
2- 93	12	1- 38	13	2 -71	15
2- 94	14	1- 39	20	2 -68	11
2- 96	13	2 -108	14	2 -70	16
1- 35	11	1- 40	18	1 -25	10
1- 36	11	2 -109	17	1 -33	14
1- 34	12	2- 20	20	93	7
2 -105	10	2 -27b	11	1 -32	15
2 -104	20	2 -27 ^a	8	1 -31	13
2 -102	11	2- 21	11	1 -29	18
deep water A		deep water B		Intermediary	
sample	n species	sample	n species	sample	n species
13	20	91	15	12	10
105	15	92	20	11	35
104	10	06	20	89	6
17	15	94	5		
108	10	07	20		
05	20	09	11		
106	10	72	10		
71	20	2- 95 ^a	10		
107	20	90	25		

Table 05- Number of observed species in samples.

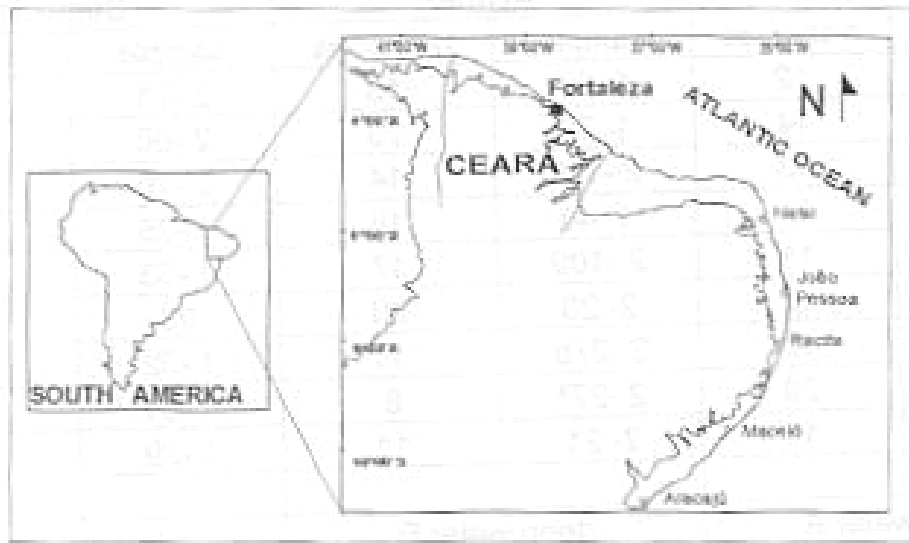


FIGURE 1

attribution of copyright to the author(s) and the publisher(s).

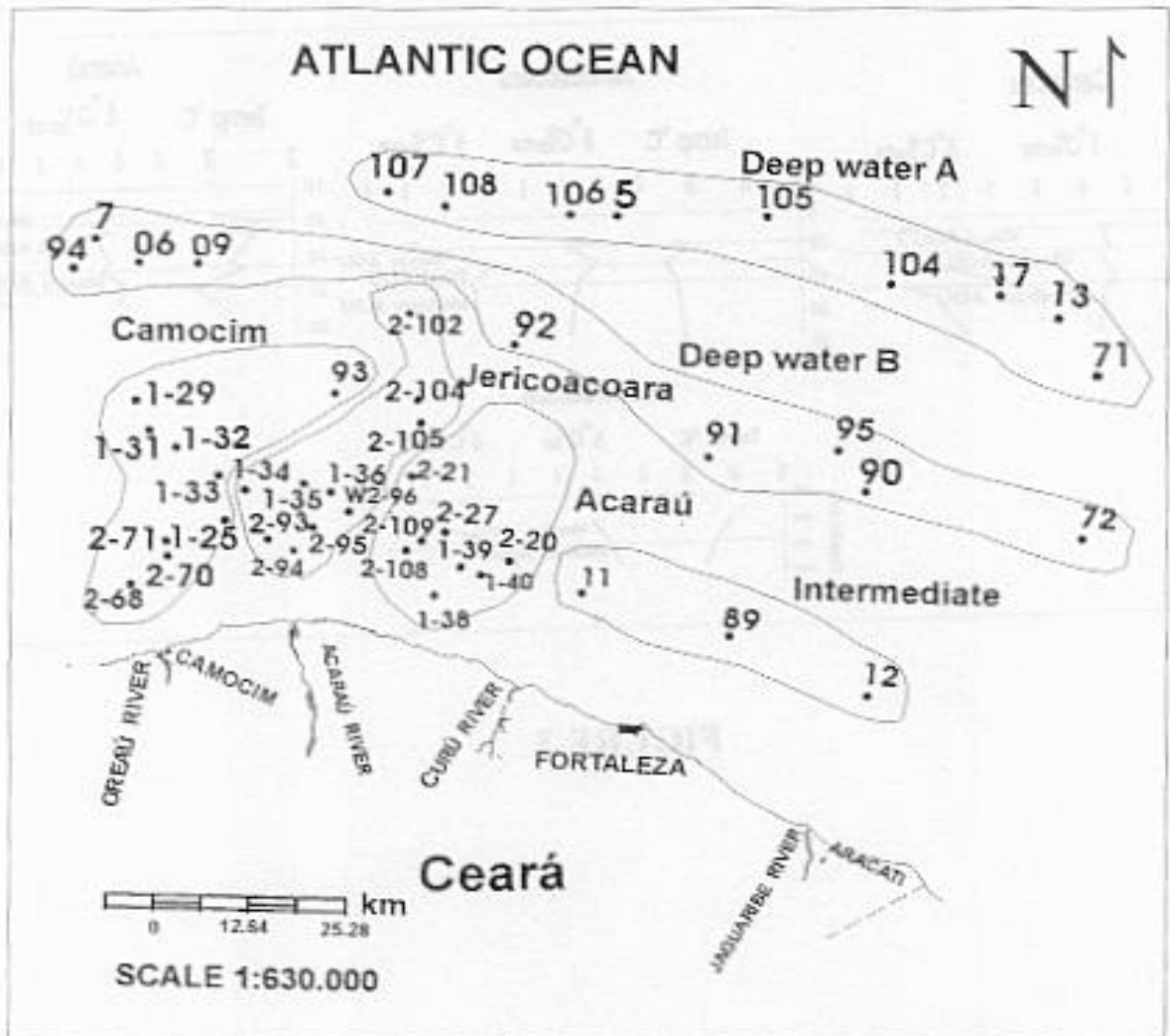


FIGURE 2

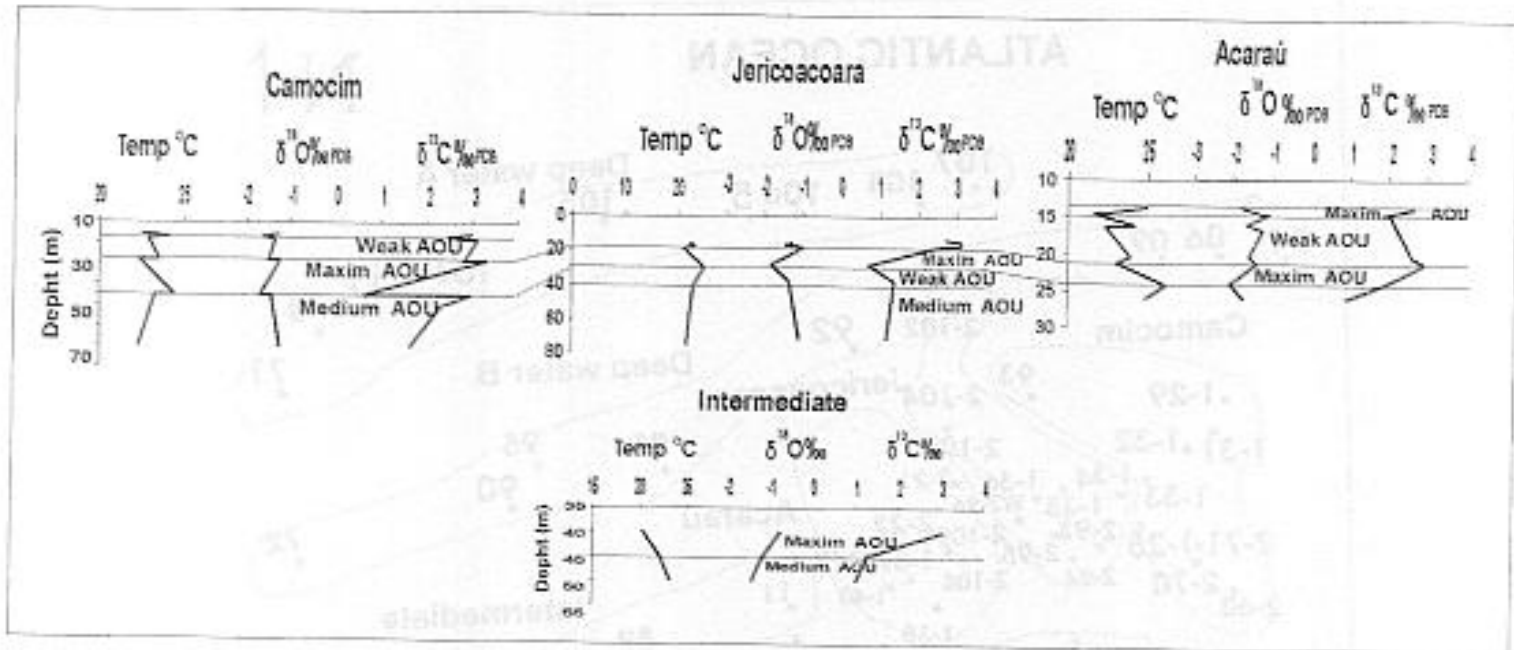


FIGURE 3

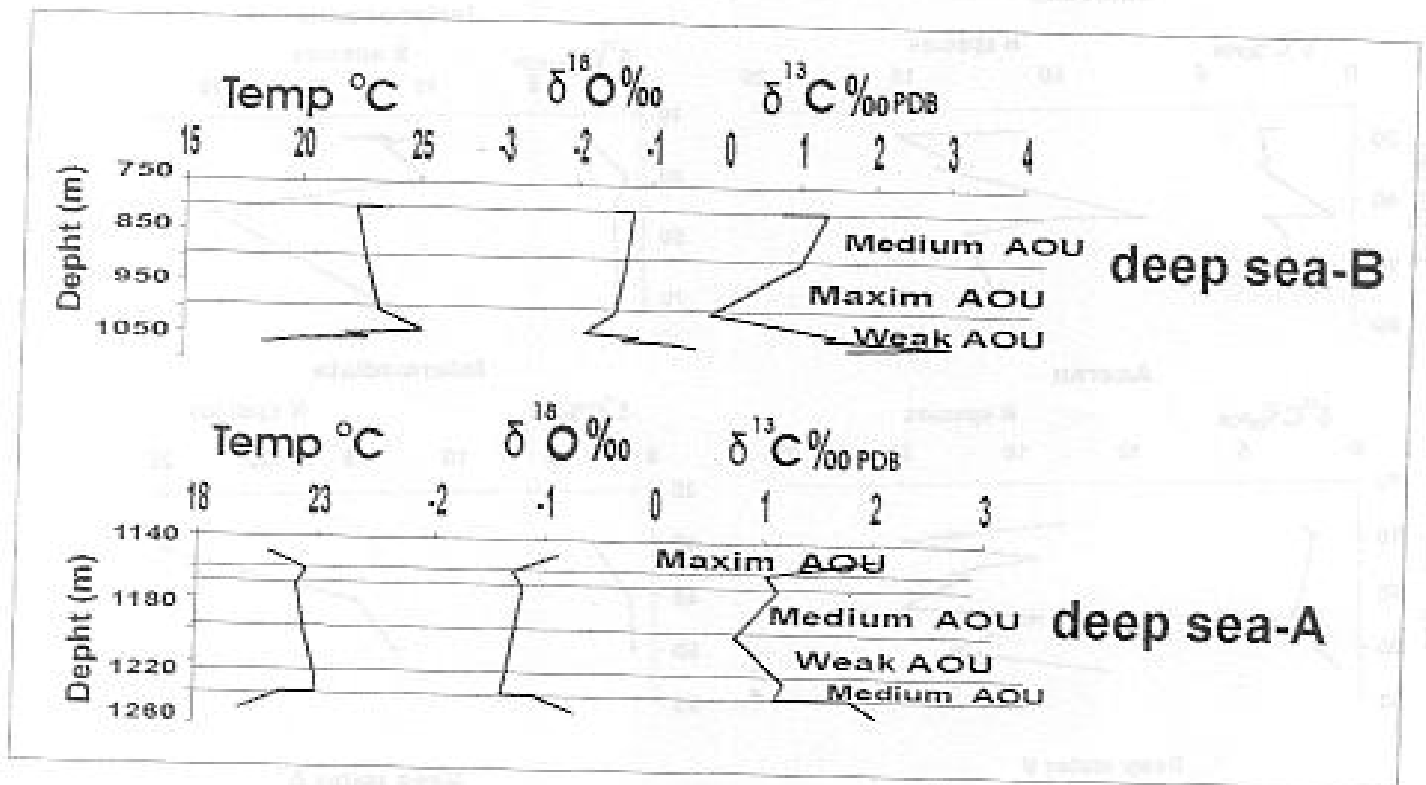


FIGURE 4

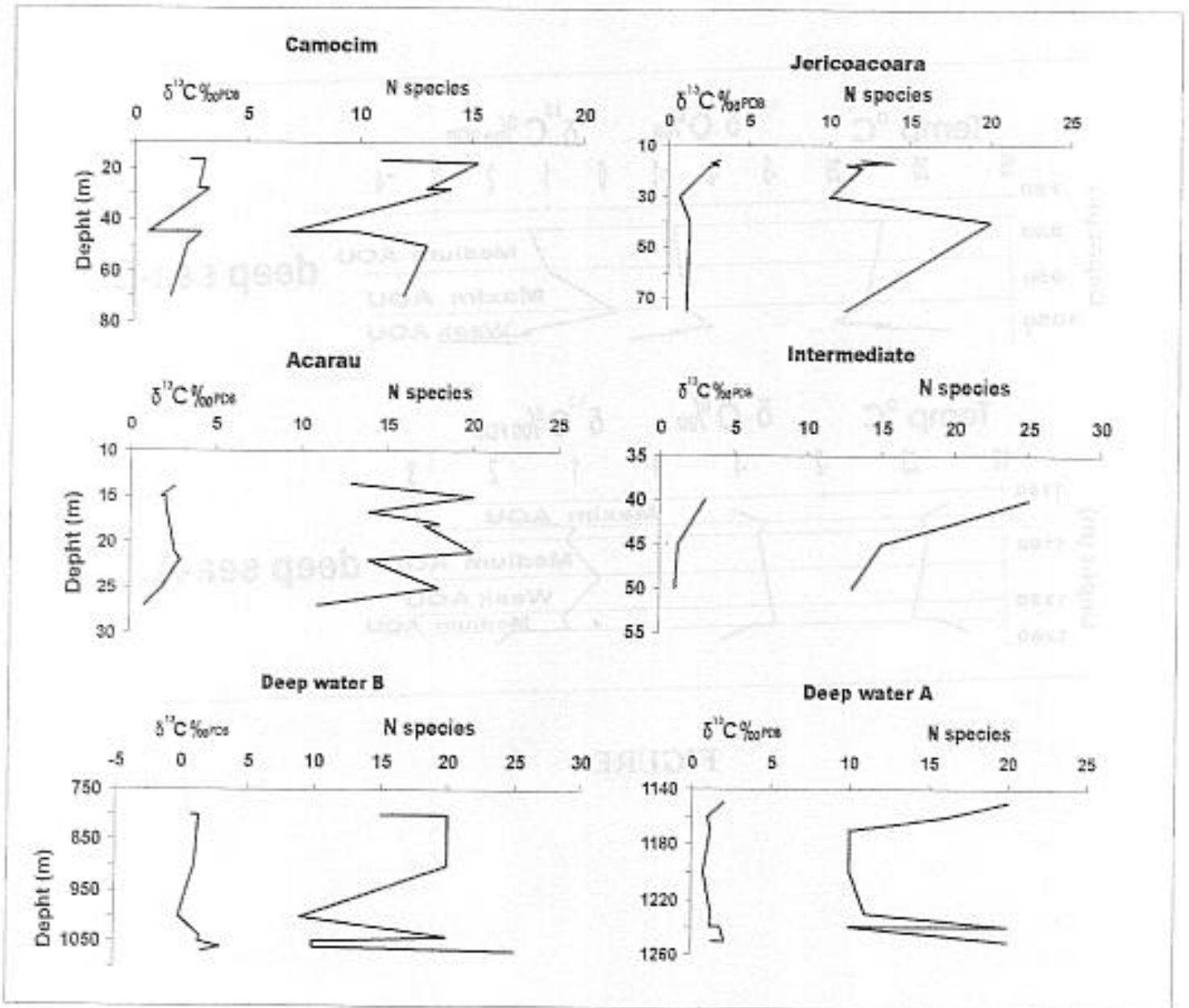


FIGURE 5

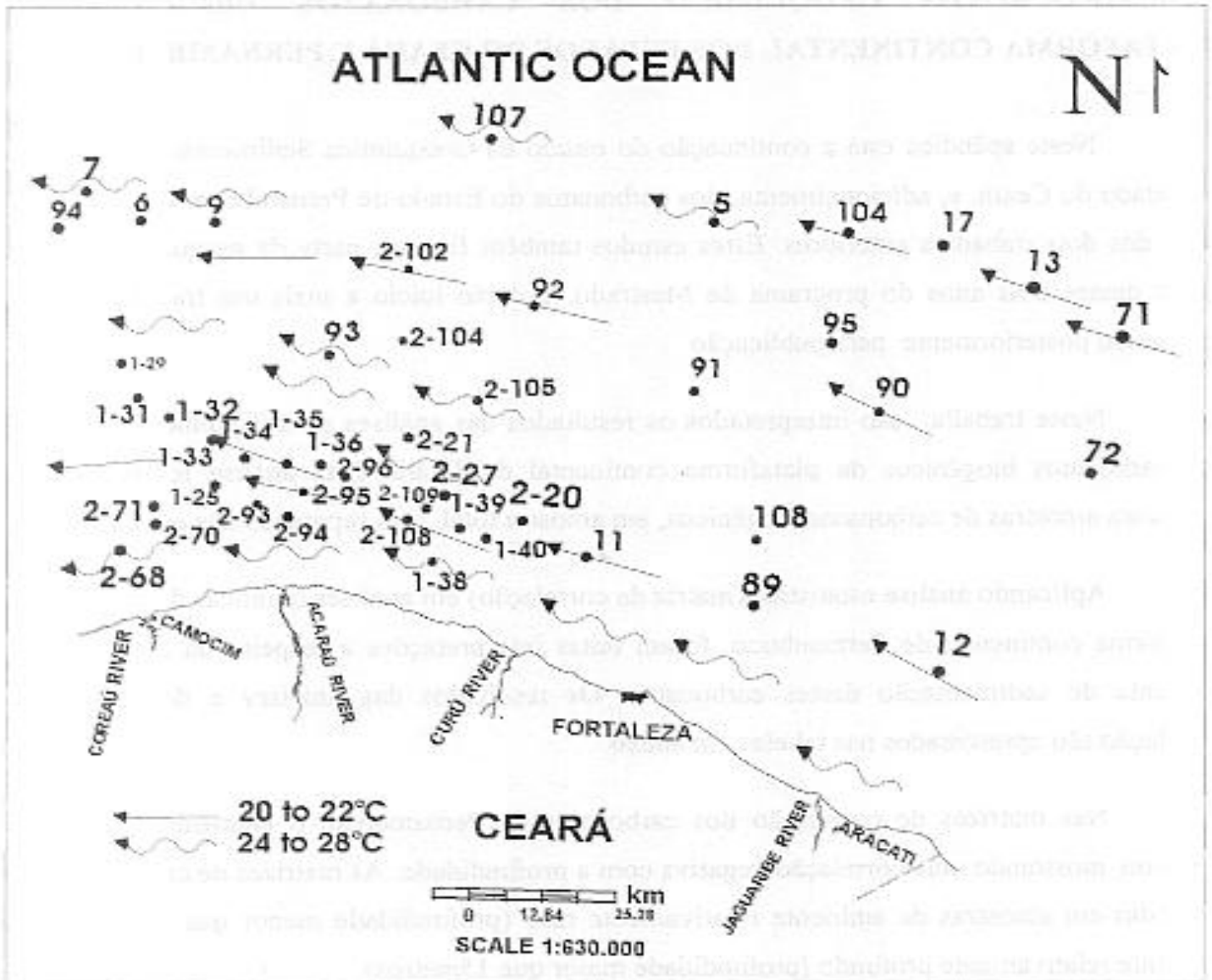


FIGURE 6

APÊNDICE

COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO DOS CARBONATOS BIOGÊNICOS DA PLATAFORMA CONTINENTAL DOS ESTADOS DO CEARÁ E PERNAMBUCO.

Neste apêndice está a continuação do estudo da Geoquímica Sedimentar dos carbonatos do Estado do Ceará, e, adicionalmente, dos carbonatos do Estado de Pernambuco, que não fizeram parte dos dois trabalhos anteriores. Estes estudos também fizeram parte da pesquisa realizada ao longo desses dois anos do programa de Mestrado, e darão início a mais um trabalho, que será submetido posteriormente para publicação.

Neste trabalho, são interpretados os resultados das análises de Difractometria de raios X dos carbonatos biogênicos da plataforma continental do Ceará. Esta análise foi realizada em cinquenta amostras de carbonatos biogênicos, em amostra total, sem separação das espécies.

Aplicando análise estatística (matriz de correlação) em análises químicas de carbonatos da plataforma continental de Pernambuco, foram feitas interpretações a respeito da Geoquímica do ambiente de sedimentação destes carbonatos. Os resultados das análises e das matrizes de correlação são apresentados nas tabelas em anexo.

Nas matrizes de correlação dos carbonatos de Pernambuco, o elemento Manganês se destacou, mostrando uma correlação negativa com a profundidade. As matrizes de correlação foram efetuadas em amostras de ambiente relativamente raso (profundidade menor que 15 metros) e de ambiente relativamente profundo (profundidade maior que 15 metros).

O Manganês ocorre na água do mar principalmente na forma Mn^{2+} , ou como $MnCl^+$ (Bruland 1983), e assim como outros elementos químicos, é trazido para os oceanos por processos fluviais, eólicos e hidrotermais submarinos, e uma vez introduzido na água do mar, participa de uma série de processos biogeoquímicos, podendo resultar como cobertura de carbonato de Manganês nas carapaças dos animais, ou quando requerido como nutriente, pode fazer parte do tecido orgânico das espécies (Landing e Bruland 1987).

O Manganês no estado reduzido (Mn^{2+}), durante o seu ciclo na água do mar, poderá precipitar, por meio de adsorção, nas paredes da estrutura carbonática, ou mesmo formando solução sólida, com uma mistura do tipo: Mn-Ca-Mg (CO_3) (Boyle 1983).

Boyle comprovou isto estudando a composição química de conchas de foraminíferos e verificou o crescimento de carbonato de Manganês sobre a concha carbonática destes animais,

sugerindo que a incorporação do Mn no exoesqueleto das espécies poderia ser um importante fixador de Manganês em sedimentos de fundo oceânico. Adicionalmente, o mesmo autor concluiu que nem sempre as espécies estudadas mostraram os mesmos teores de Mn em suas conchas, e sugeriu que a causa desta variação poderia ser os diferentes regimes metabólicos, juntamente com os diferentes habitats de crescimento de cada espécie.

Ainda segundo (Boyle 1983), a razão Mn/Ca variou substancialmente com a localidade das amostras, e triplicou em amostras do Atlântico equatorial, em comparação às amostras do Atlântico Norte. Nos carbonatos do Estado de Pernambuco, de forma geral, existe uma correlação negativa (média de -64) entre a profundidade e os teores de Mn nas amostras que contém mais de 85% de carbonato de cálcio (matriz de correlação em anexo). A respeito dos teores de Mn nos carbonatos plataformais recentes do Estado de Pernambuco, este poderá ter as seguintes origens:

- A) Entrar no ambiente marinho como particulado de origem pedogenética, sendo transportado do continente até o mar, sob forma de óxido de manganês.
- B) Entrar no ambiente marinho sob forma de manganês solúvel em águas doces, de origem continental.
- C) Entrar na estrutura dos carbonatos como um estágio precoce de formação de carbonato de manganês.

Outro fator que chamou a atenção na matriz de correlação das amostras relativamente profundas (profundidade maior que 15 metros), foi a razão CaO/MgO, pouco estudada na literatura.

No caso em estudo, observou-se uma clara relação positiva entre a razão CaO/MgO e a profundidade nas amostras da plataforma continental externa. Duas maiores possibilidades explicariam esta tendência:

- A) Perda de Mg na estrutura da calcita com a profundidade e/ou com o tempo.
- B) Mudança na assembléia biótica produtora de carbonato.

Na plataforma continental de Pernambuco, percebe-se uma quase perfeita divisão separando as frações calcita high Mg e calcita low Mg, seja por efeito diagenético precoce, seja por diferenças na mineralogia dos exoesqueletos. Essa separação pode ser definida em torno dos 15 metros de profundidade. Nesse contexto, abre-se a possibilidade de que a diadocia do Mn poderá estar acontecendo às expensas do conteúdo de Mg no carbonato. Sugere-se que as variações combinadas dos teores de Mn e CaO/MgO com relação à profundidade (diagrama triangular)

poderão definir se um sedimento carbonático recente será de plataforma continental interna ou externa, a partir da simples composição química dos seus elementos maiores.

Com relação aos carbonatos do Ceará, a difratometria de raios X revelou uma possível diminuição da participação do elemento Magnésio na estrutura dos carbonatos, de 20 a 35 metros de profundidade na plataforma continental (figuras 7 e 8).

Segundo (Scholle 1987), a difração de Raios X permite a determinação acurada da quantidade de Mg introduzido na estrutura, ou adsorvido nas paredes da estrutura dos carbonatos, através da interpretação do difratograma. Na interpretação dos difratogramas dos carbonatos do Ceará, as porcentagens de cada mineral foram calculadas a partir da altura dos picos principais dos minerais. O teor de Mg em cada mineral foi calculado a partir da posição do pico principal de cada mineral em relação ao ângulo 2θ , no difratograma, segundo o método de (Scholle, 1987).

Entre 15 e 20 metros, cerca de 90% da Calcita analisada é high Mg. Entre 20 e 35m, o Magnésio pode entrar na estrutura dos carbonatos de maneira menos efetiva, e entre 40 e 50m, novamente cerca de 90% da calcita analisada é high Mg.

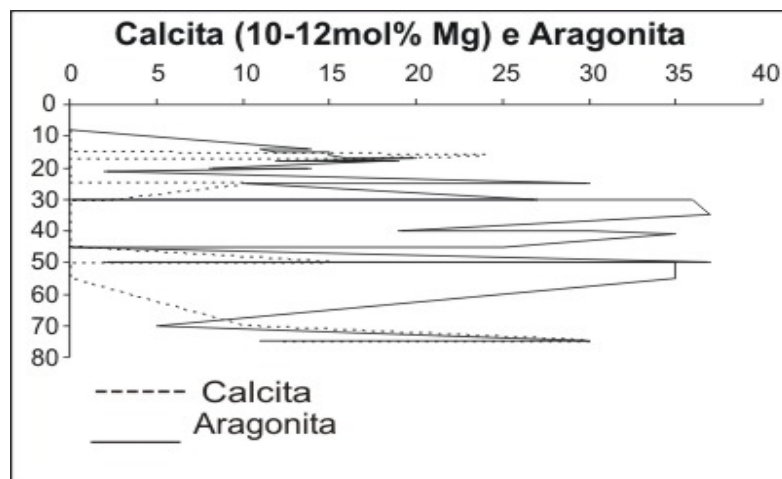


Figura 7– Porcentagens de Calcita (10-12mol% de Mg) e Aragonita com a profundidade nos carbonatos da plataforma continental do Ceará.

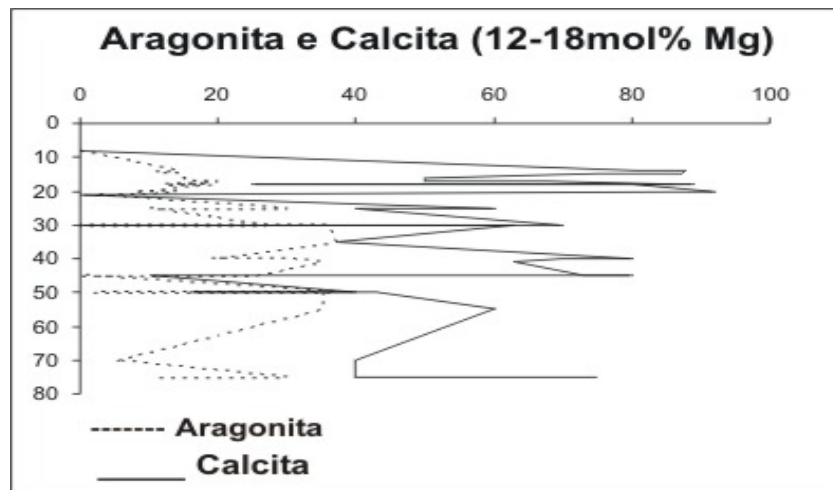


Figura 8- Porcentagens de Calcita (12-18mol% Mg) e Aragonita com a profundidade nos carbonatos da plataforma continental do Ceará.

De acordo com análise da biota em lupa binocular, na plataforma continental do Ceará, entre 15 e 20 metros, predominam algas calcárias vermelhas ramificantes e encrustantes (Corallinaceae) e foraminíferos de várias espécies. Entre 20 e 35m, predominam também algas calcárias e foraminíferos. Entre 40 e 50m, predominam algas calcárias, foraminíferos e areia bioclástica. Dentre outras espécies presentes na plataforma continental, estão briozoários e bivalves.

Como as espécies predominantes em cada profundidade especificada acima são, em geral, as mesmas, as mudanças na quantidade de Mg introduzido na estrutura cristalina dos carbonatos devem estar associadas aos parâmetros físico-químicos da água do mar na plataforma, entre 20 e 35 metros, por exemplo, diferenças na temperatura. As temperaturas calculadas, a partir de foraminíferos bentônicos, das águas de fundo da plataforma continental do Ceará variam entre 24 e 25°C na parte mais rasa da plataforma. Variações entre 20 e 23°C ocorrem a cerca dos 20m, como também dos 40m. Mudanças na temperatura afetam a razão de crescimento das espécies, a razão de precipitação de carbonatos, e com ela, a quantidade de Mg introduzido na estrutura cristalina (Krauskopf e Bird 1995).

Segundo (Burton 1993), nenhum parâmetro físico-químico da água do mar (ex.: temperatura, pH, sulfato dissolvido, íons Mg e Ca, fosfato., etc.) pode ser tomado isoladamente como causador das mudanças na mineralogia e composição química dos carbonatos marinhos. A não ser que os demais parâmetros sejam insignificantes. Por isto, além da temperatura, deve haver

outros fatores que, em conjunto, influenciam a entrada de Mg na estrutura dos carbonatos da costa cearense.

Na parte mais rasa da plataforma, a entrada de Mg pode estar associada, entre outros fatores, à temperatura mais alta das correntes oceânicas, enquanto dos 20 aos 35m, a menor quantidade de Mg pode estar associada às correntes oceânicas relativamente mais frias.

CONCLUSÕES

Variações na composição isotópica de exoesqueletos de foraminíferos da margem continental do Estado do Ceará indicam variações físico-químicas no ambiente de calcificação das espécies. Isso se traduz pela mistura entre águas continentais fluviais e oceânicas, e variações na temperatura das massas de água, tanto em escala regional como em escala local. Tais variações de temperatura podem acontecer em espaçamentos geográficos relativamente curtos. Variações nos valores $\delta^{18}\text{O}$ de exoesqueletos carbonáticos de foraminíferos da margem continental cearense indicam mistura em várias proporções entre águas oceânicas e continentais, sendo a região defronte ao rio Acaraú, a de mais forte influência continental. Nessa região, os valores de $\delta^{18}\text{O}$, obtidos de exoesqueletos de foraminíferos bentônicos, indicam influência de águas continentais, pelo menos até a cota batimétrica de 25m de profundidade. Os outros setores da costa cearense podem ou não apresentar a mesma característica, dependendo do alcance de influências fluviais em cada setor.

Com o valor de salinidade da água do mar de 35‰, sugere-se um valor de $\delta^{18}\text{O}$ de 0,2‰_{SMOW} para o oceano, na plataforma continental interna do Ceará. Este valor reflete a influência das águas continentais na costa cearense, quando comparado ao valor de 0,9‰_{SMOW}, proposto por (Wolff et al. 1998), para a costa nordeste brasileira. Uma explicação para isso seria que as espécies estudadas por (Wolff et al. 1998) habitam a área do monte submarino denominado “Elevação do Ceará”, relativamente longe da costa, localizada na planície abissal da margem continental nordeste brasileira. Nestas condições, o ambiente da elevação do Ceará deve ser influenciado principalmente por correntes oceânicas, e pela razão evaporação/precipitação, não se cogitando a influência de águas continentais, contrário ao que sugere o referido autor.

Outro fator relevante da plataforma continental cearense é a distribuição da utilização aparente do Oxigênio (AOU) sugerida. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$, obtidos de foraminíferos bentônicos, indicam que, aparentemente, a utilização aparente do Oxigênio é irregular.

Sobre o comportamento dos elementos na plataforma continental de Pernambuco, observou-se, de forma geral, uma correlação negativa entre a profundidade e os teores de Mn

nas amostras selecionadas com mais de 85% de carbonatos de cálcio. De outro lado, observou-se uma forte relação positiva entre a razão CaO/MgO, e a profundidade, para amostras coletadas entre 19,5 e 54m. Além disso, percebe-se uma quase perfeita divisão separando as frações high Mg-calcita e low Mg-calcita, em torno dos 15 metros de profundidade. Nesse contexto, abre-se a possibilidade de que o Mn poderá estar contido nos carbonatos às expensas do conteúdo de Mg, uma vez que as variações combinadas dos teores de Mn e CaO/MgO com relação à profundidade (diagrama triangular), parecem discernir se um sedimento carbonático recente pertencerá ou não à parte mais interna de uma plataforma continental, a partir da simples composição química do sedimento.

Dos resultados de difratometria de raios X em carbonatos da costa cearense, supõe-se que entre 20 e 35m, o Magnésio entre na estrutura dos carbonatos de maneira menos efetiva, possivelmente porque nessa faixa batimétrica devem ocorrer águas costeiras relativamente mais frias.

REFERÊNCIAS

- Bilal UH and Boersma A. 1998 (Ed.). Introduction to marine micropaleontology. Elsevier, Netherlands. 376p.
- Boyle EA. 1983. Manganese carbonate overgrowths on foraminifera tests. *Geoch Cosmoch Acta*. 47: 1815-1819.
- Burton EA. 1993. Controls on marine carbonate cement mineralogy: review and reassessment. *Chemical Geology*. 105:163-179
- Coutinho PN. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. *Revista de Geologia UFC*. Fortaleza. 6: 65-73
- Landing WM and Bruland K. 1987. The contrasting biogeochemistry of iron and manganese in the Pacific Ocean. *Geoch Cosmoch Acta*. 51: 29-43
- Morse WJ and mackenzie TF. 1990. *Geochemistry of sedimentary carbonates*. Elsevier. Netherlands. 679p.
- Mont'alverne, A. A. F. Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco. 1982. Recife. 196 p. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco).

Wolff T, Mulitza S, Arz H, Patzold J, Wefer G. 1998. Oxygen isotopes versus CLIMAP (18ka) temperatures: A comparison from the Tropical Atlantic. *Geology* 26 (8): 675-678.

ANEXO 1- ANÁLISES QUÍMICAS DE MONT'ALVERNE, (1982)

Amostras rasas – profundidade máxima: 15 metros

AMOSTRAS

RASAS	Prof (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PF	Cu
227	0,65	0,88	0,38	0,64	47,8	4,1	0,05	0,3	0,06	0,91	39,16	50
169	0,5	87,14	1,18	0,36	5,88	0,36	0,06	0,21	0,53	0,5	3,72	15
171	0,75	81	0,9	0,29	8,96	0,53	0,06	0,26	0,6	0,17	6,45	20
193	0,7	95,74	0,52	0,18	1,68	0,07	0,04	0,05	0,21	0,1	0,84	20
214	0,5	88,47	1,65	0,18	4,76	0,11	0,03	0,18	1	0,28	3,07	50
225	0,6	9,5	0,56	0,26	47,7	0,9	0,05	0,3	0,06	0,67	39,16	50
179	1,4	0,2	0,28	0,16	53,15	0,14	0,06	0,27	0,03	0,29	45,14	25
191	1,9	96,5	0,52	0,13	1,05	0,05	0,03	0,07	0,18	0,11	0,5	15
178	1,6	6,29	0,37	0,29	47,91	2,24	0,11	0,35	0,2	0,44	41,79	25
158	2,1	1,71	0,28	0,35	50,54	1,95	0,12	0,33	0,04	0,51	43,51	30
217	2,4	0,56	0,38	0,36	48,6	3,6	0,09	0,38	0,05	0,97	44,64	50
181	3,7	11,24	0,37	0,47	44,67	3,25	0,13	0,35	0,15	0,42	39,16	45
229	4	1,32	0,52	0,23	51,5	0,9	0,06	0,38	0,08	0,71	43,72	75
105	9	6,17	0,56	0,58	44,86	4,09	0,33	0,38	0,1	0,69	41,43	10
57	13	61,5	0,71	0,2	18,2	0,05	0,05	0,2	0,31	0,64	16,53	25
156	10,6	0,45	0,28	0,34	51,38	2,17	0,1	0,31	0,05	0,32	43,81	45
209	5,2	2,14	0,52	0,66	45	5,8	0,11	0,42	0,1	0,83	44,1	50
218	6,5	1,73	0,52	0,33	50,2	1,84	0,07	0,35	0,05	0,74	43,48	45
284	15	0,84	0,35	0,37	46,06	5,05	0,12	0,73	0,17	0,7	45,3	70

CONTINUAÇÃO DO ANEXO 1

Amostras rasas – profundidade máxima: 15 metros

AMOSTRAS										
RASAS	Prof (m)	Cr	Co	Sr (ppm)	Mn	Ni	Zn	CaO/MgO	Ba	Ti
227	0,65	20	17	1500	200	20	30	11,7	500	100
169	0,5	20	7	125	45	5	50	16,3	50	1350
171	0,75	20	7	175	42	7	56	16,9	50	80
193	0,7	5	3,5	25	12	7	61	24,0	50	400
214	0,5	10	10	200	40	5	30	43,3	1600	5
225	0,6	10	17	5000	70	20	30	53,0	600	1600
179	1,4	20	30	6000	27	27	50	379,6	50	5
191	1,9	5	3,5	50	10	7	61	21,0	50	300
178	1,6	20	27	3500	62	17	60	21,4	50	10
158	2,1	20	20	4000	92	22	60	25,9	50	25
217	2,4	10	17	1800	90	17	30	13,5	45	2300
181	3,7	5	20	1200	75	22	64	13,7	50	400
229	4	10	27	6200	100	20	45	57,2	700	100
105	9	30	17	2100	92	27	21	11,0	50	250
57	13	20	15	500	40	7	25	364,0	100	5
156	10,6	30	27	4000	140	27	60	23,7	50	5
209	5,2	20	20	1200	100	22	40	7,8	1300	5
218	6,5	10	15	4700	100	17	30	27,3	600	1200
284	15	5	40	2300	60	20	30	9,1	25	5

ANEXO 2- ANÁLISES QUÍMICAS DE MONT'ALVERNE, (1982)

Amostras profundas – profundidade entre 19,5 e 54 metros

AMOSTRAS PROFUNDAS	Prof (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu
32	21,5	21,95	0,52	0,36	37,38	4	0,09	0,37	0,15	0,89	34,21	25
60	19,5	0,65	0,33	0,12	45,5	5	0,06	0,7	0,11	1,11	45,5	30
94	26	3,08	0,28	0,1	44,74	5,9	0,11	0,54	0,09	0,37	44,42	15
110	26	21,3	0,56	0,28	37,66	4,38	0,14	0,32	0,27	0,19	34,66	10
138	20	4,43	0,37	0,35	50,11	1,57	0	0,33	0,11	0,32	42,15	95
268	41	1,22	0,3	0,14	46,7	3,3	0,14	1,28	0,15	0,7	44,17	75
275	45	2,66	0,3	0,09	43,26	4,3	0,13	1,2	0,23	0,85	46,37	60
276	54	1,23	0,2	0,11	47,04	3,15	0,13	1,16	0,17	0,71	46,09	70
281	29	0,71	0,09	0,3	45,64	4,9	0,1	0,83	0,13	0,75	46,34	60
286	26	0,75	0,23	0,37	45,5	5,8	0,1	0,65	0,08	0,67	45,7	60
290	27	0,48	0,47	0,11	45,85	5,96	0,07	0,78	0,09	0,87	45,52	45
293	20	5,4	1,51	0,64	42,39	4,74	0,15	1,2	0,3	0,83	42,98	55
296	27	0,58	0,38	0,1	45,5	5,54	0,09	0,67	0,11	0,78	45,92	65
298	35	0,58	0,38	0,1	45,5	5,54	0,11	0,9	0,13	0,82	44,92	35
301	22	0,56	0,47	0,11	45,92	5,62	0,09	0,83	0,11	0,7	45,69	35
311	25	2,39	0,57	0,21	45,33	5,45	0,18	0,77	0,24	0,7	44,31	45

CONTINUAÇÃO DO ANEXO 2

Amostras com profundidade entre 19,5 e 54 metros

AMOSTRAS PROFUNDAS	Prof (m)	Cr	Co	Sr (ppm)	Mn	Ni	Zn	CaO/MgO	Ba	Ti
32	21,5	10	15	1100	40	17	50	9,3	700	5
60	19,5	10	20	1400	40	17	25	9,1	50	5
94	26	20	20	1500	12	55	260	7,6	50	5
110	26	30	20	1300	20	17	17	8,6	50	15
138	20	30	27	420	120	27	9	31,9	50	300
268	41	2,5	20	2900	40	20	60	14,2	45	100
275	45	2,5	20	2500	30	20	40	10,1	45	100
276	54	2,5	40	3100	30	20	40	14,9	45	100
281	29	2,5	20	2400	25	20	40	9,3	45	100
286	26	2,5	40	2100	40	20	40	7,8	45	100
290	27	5	17	1700	20	17	26	7,7	475	100
293	20	10	25	1900	80	27	50	8,9	350	200
296	27	5	20	1900	20	17	23	8,2	225	100
298	35	10	20	1700	30	20	24	8,2	675	100
301	22	5	20	2200	20	17	25	8,2	350	100
311	25	5	25	1700	30	22	38	8,3	95	100

ANEXO 3- MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS ANÁLISES DE MONT'ALVERNE, (1982)

Todas as amostras

Prof (m)	Prof (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
Prof (m)	1												
SiO2	-0,42	1											
Al2O3	-0,43	0,34	1										
Fe2O3	-0,66	0,39	0,48	1									
CaO	-0,16	-0,26	-0,36	-0,16	1								
MgO	0,2	-0,2	0,15	0,05	-0,83	1							
P2O5	0,06	0,25	0,24	0,28	-0,47	0,31	1						
Na2O	0,55	-0,23	0,22	-0,29	-0,62	0,52	0,26	1					
K2O	0,21	0,27	0,49	0,05	-0,64	0,35	0,38	0,68	1				
SO3	0,24	-0,24	0,27	-0,05	-0,55	0,54	0,13	0,55	0,3	1			
PF	0,61	-0,75	-0,27	-0,59	-0,1	0,37	-0,04	0,54	0,11	0,34	1		
Cu	-0,02	-0,04	0,09	0,09	-0,07	0,03	-0,3	0,36	0,21	0,14	0,07	1	
Cr	-0,52	0,13	0,03	0,43	0,41	-0,33	0,06	-0,64	-0,37	-0,55	-0,42	-0,28	1
Co	-0,13	-0,07	0,01	0,07	-0,03	0,08	0,03	0,23	0,18	-0,15	0,22	0,46	-0,05
Sr	-0,11	-0,1	-0,11	-0,23	0,72	-0,76	-0,18	-0,32	-0,38	-0,26	-0,01	-0,14	0,03
Mn	-0,64	0,18	0,21	0,74	0,29	-0,29	-0,09	-0,48	-0,26	-0,21	-0,66	0,21	0,6
Ni	-0,28	0,17	0,13	0,15	-0,2	0,22	0,19	-0,03	-0,01	-0,38	-0,08	-0,06	0,4
Zn	0,11	0,07	-0,13	-0,17	-0,07	0,09	0,05	-0,07	-0,05	-0,41	0,03	-0,36	0,14
CaO/MgO	-0,26	-0,11	-0,09	-0,12	0,53	-0,5	-0,21	-0,29	-0,33	-0,41	0,05	-0,15	0,21
Calcita	0,47	-0,98	-0,49	-0,49	0,32	0,12	-0,33	0,17	-0,35	0,18	0,74	0,05	-0,16
Argila	-0,29	0,08	0,93	0,39	-0,31	0,21	0,18	0,28	0,36	0,39	-0,08	0,14	0,02
Qz/Fdsp	-0,37	0,98	0,19	0,32	-0,21	-0,22	0,22	-0,26	0,23	-0,3	-0,73	-0,08	0,12
Apat	0,01	0,25	0,31	0,32	-0,52	0,39	0,96	0,25	0,42	0,16	-0,1	-0,32	0,1
Goet	-0,7	0,43	0,41	0,98	-0,14	0,03	0,27	-0,34	0,03	-0,13	-0,64	0,06	0,43
Ba	-0,3	-0,04	0,34	0,32	-0,06	0,15	-0,2	-0,13	-0,17	0,38	-0,14	0,13	0,01

CONTINUAÇÃO DO ANEXO 3

Todas as amostras

	Co												
Co	1	Sr											
Sr	0,01	1	Mn										
Mn	0	0,02	1	Ni									
Ni	0,27	-0,21	0,05	1	Zn								
Zn	-0,06	-0,01	-0,22	0,73	1	CaO/MgO							
CaO/MgO	0,21	0,55	-0,09	0,11	-0,01	1	Calcita						
Calcita	0,06	0,15	-0,22	-0,19	-0,03	0,13	1	Argila					
Argila	-0,01	-0,09	0,18	0,13	-0,17	-0,08	-0,24	1	Qz/Fdsp				
Qz/Fdsp	-0,07	-0,1	0,13	0,13	0,08	-0,09	-0,94	-0,09	1	Apat			
Apat	-0,01	-0,28	-0,03	0,23	0,05	-0,27	-0,36	0,26	0,21	1	Goet		
Goet	0,09	-0,23	0,75	0,16	-0,16	-0,06	-0,51	0,28	0,38	0,32	1	Ba	
Ba	-0,19	0,03	0,29	-0,12	-0,21	-0,09	-0,04	0,44	-0,09	-0,06	0,24	1	

CONTINUAÇÃO DO ANEXO 3 - Amostras com profundidade entre 19,5 e 54 metros

Prof (m)	Prof (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SiO2	-0,23	1	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
Al2O3	-0,51	0,75	1	Fe2O3	CaO	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
Fe2O3	-0,5	0,62	0,73	1	CaO	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
CaO	0,7	-0,57	-0,57	-0,53	1	MgO	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
MgO	-0,86	0,05	0,24	0,23	-0,73	1	P2O5	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
P2O5	-0,09	0,63	0,42	0,4	-0,47	0,11	1	Na2O	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
Na2O	-0,04	0,37	0,38	0,31	-0,54	0,08	0,62	1	K2O	SO3	PF	Cu	Cr
K2O	-0,12	0,78	0,7	0,55	-0,56	-0,01	0,8	0,67	1	SO3	PF	Cu	Cr
SO3	-0,32	-0,14	0,24	0,13	-0,35	0,23	-0,15	0,36	0,24	1	PF	Cu	Cr
PF	0,11	-0,62	-0,64	-0,41	0	0,2	-0,37	-0,01	-0,37	0,26	1	Cu	Cr
Cu	-0,1	0,04	0,11	0,33	-0,42	0,19	0,47	0,75	0,39	0,31	0,3	1	Cr
Cr	-0,13	0,35	0,16	-0,08	0,02	0,03	-0,19	-0,47	-0,17	-0,37	-0,51	-0,77	1
Co	-0,25	0,12	0,1	0,4	-0,44	0,4	0,43	0,43	0,22	0,09	0,24	0,62	-0,38
Sr	0,88	-0,18	-0,35	-0,23	0,75	-0,93	-0,12	-0,07	-0,09	-0,35	-0,01	-0,06	-0,22
Mn	-0,34	0,62	0,78	0,84	-0,51	0,05	0,44	0,57	0,68	0,42	-0,48	0,39	-0,1
Ni	-0,4	0,53	0,17	0,17	-0,53	0,49	0,34	0,07	0,1	-0,42	-0,23	-0,08	0,58
Zn	0	0,38	-0,1	-0,1	-0,03	0,04	0,06	-0,29	-0,18	-0,72	-0,32	-0,43	0,75
CaO/MgO	0,91	-0,13	-0,31	-0,3	0,74	-0,96	-0,02	0,05	-0,02	-0,27	-0,14	-0,05	-0,11
Calcita	0,33	-0,95	-0,89	-0,7	0,62	-0,15	-0,62	-0,42	-0,8	0,01	0,67	-0,07	-0,3
Argila	-0,5	0,73	1	0,72	-0,56	0,24	0,42	0,38	0,69	0,25	-0,63	0,1	0,17
Qz/Fdsp	-0,06	0,94	0,54	0,44	-0,51	0	0,64	0,34	0,69	-0,27	-0,53	-0,04	0,43
Apat	-0,17	0,58	0,49	0,32	-0,49	0,27	0,91	0,5	0,72	-0,11	-0,43	0,26	0,02
Goet	-0,54	0,6	0,68	0,99	-0,59	0,31	0,43	0,32	0,55	0,14	-0,31	0,37	-0,11
Ba	-0,3	-0,06	0,41	0,06	-0,22	0,4	-0,09	0,11	0,02	0,28	-0,14	-0,09	0,11

CONTINUAÇÃO DO ANEXO 3- Amostras com profundidade entre 19,5 e 54 metros

	Co												
Co	1	Sr											
Sr	-0,29	1	Mn										
Mn	0,36	-0,17	1	Ni									
Ni	0,26	-0,52	0,01	1	Zn								
Zn	-0,11	-0,08	-0,26	0,83	1	CaO/MgO							
CaO/MgO	-0,25	0,93	-0,09	-0,44	-0,04	1	Calcita						
Calcita	-0,13	0,27	-0,71	-0,43	-0,2	0,21	1	Argila					
Argila	0,1	-0,35	0,78	0,16	-0,12	-0,3	-0,89	1	Qz/Fdsp				
Qz/Fdsp	0,08	-0,11	0,44	0,62	0,53	-0,05	-0,86	0,53	1	Apat			
Apat	0,31	-0,3	0,36	0,4	0,09	-0,16	-0,67	0,5	0,64	1	Goet		
Goet	0,43	-0,3	0,78	0,21	-0,11	-0,37	-0,67	0,67	0,44	0,36	1	Ba	
Ba	-0,12	-0,38	0,1	-0,08	-0,29	-0,33	-0,24	0,47	-0,08	0,26	0,06	1	

ANEXO 4- DIAGRAMA TRIANGULAR (PROF. x Mn x (CAO/MgO) DOS CARBONATOS DE PERNAMBUCO

círculos negros = amostras rasas (prof. menor ou igual a 15m)

círculos brancos = amostras profundas (prof. entre 19 e 54m)

