

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

**GEOQUÍMICA DE CARBONATOS DA
PLATAFORMA CONTINENTAL
NORDESTE DO BRASIL**
Tese de doutorado
Wanessa Sousa Marques
Recife, Agosto de 2008

WANESSA SOUSA MARQUES

GEOQUÍMICA DE CARBONATOS DA PLATAFORMA
CONTINENTAL NORDESTE DO BRASIL

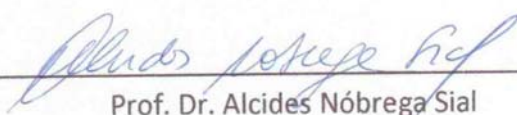
Tese de doutoramento apresentada à Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelos professores Alcides Nóbrega Sial e Eldemar de Albuquerque Menor, como um dos requisitos para obtenção do grau de doutor(a) em Geociências, na área de concentração Geologia Sedimentar e Ambiental.

RECIFE, Agosto de 2008

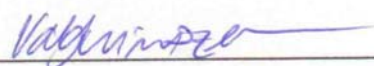
"GEOQUÍMICA DOS CARBONATOS DA PLATAFORMA CONTINENTAL NORDESTE DO BRASIL".

WANESSA SOUZA MARQUES

Aprovada:


Prof. Dr. Alcides Nóbrega Sial

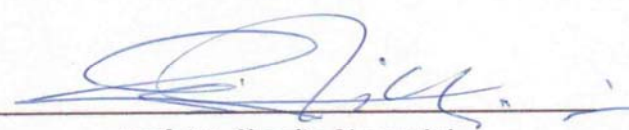
29/08/2008


Profª. Drª. Valdevez Pinto Ferreira


29/08/2008


Prof. Dr. George Satander Sá Freire

29/08/2008


Prof. Dr. Claudio Riccomini

29/08/2008


Prof. Dr. Eldemar de Albuquerque Menor

29/08/2008

MENSAGEM

Quando considero a brevidade da vida, fico dolorosamente impressionado pela incessante preocupação, da qual o bem estar material é para vós o objeto;
Ao passo que ligais tão pouca importância ao vosso aperfeiçoamento moral, que deve vos ser contado para a eternidade...

UM ESPÍRITO PROTETOR
Cracóvia, sul da Polônia, 1861

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese de doutorado a toda minha família, em especial à minha avó
Rosinha (em memória).

Como sertaneja simples e viúva muito jovem, teve a coragem e a fibra que muitos homens
não teriam...

Além de cuidar sozinha de seus animais e seus roçados, trabalhou como professora em
um simples colégio em São José da Macaoca, sertão central do Ceará.

...seu sonho era ver um de seus netos na universidade, já que os filhos não tiveram
oportunidade...

...imaginem a satisfação de ver esta tese de doutorado....

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que com sua infinita bondade, me proporcionou uma realização pessoal, através desta explanação de idéias científicas, coisa que gosto muito...

Aos meus amigos Marta, Alex e Enjôlras, por sua amizade sincera e apoio moral, durante todos esses anos.

A Roberto Lúcio, por sua dedicação sincera e transparente, e pela paciência...

A minha amiga Mirela, por sua amizade sincera...

Aos professores Valdir Manso, Alcides Nóbrega Sial, Eldemar Menor, e Satander Sá Freire, pelo apoio que me deram na realização dos trabalhos, agradeço também pela conquista do aprendizado...

Aos colegas do NEG-LABISE, pelo bom clima de trabalho e por todo apoio que recebi durante todo o tempo em que estive nesta pós-graduação.

A todos do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha-LGGM (Miguel Arraes, Seu Luiz, Joatam, Lucimery, Fernandinho, Daniel) pelo apoio e pelo clima familiar, do qual sentirei muita falta...

A todos do departamento que me ajudaram e me apoiaram durante esses seis anos que passei nessa pós-graduação, do mestrado ao doutorado...

A todos, muita paz e harmonia...

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. MÉTODOS	5
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	6
3.1 Primeiro artigo	7
3.2. Segundo artigo	21
3.3 Terceiro artigo	42
4. CONCLUSÕES GERAIS	64
5. REFERÊNCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

PRIMEIRO ARTIGO

Figura 1. Localização dos pontos amostrados	8
Figura 2. Difractogramas das amostras coletadas a diferentes profundidades. (a) REV52, 40m (b) REV95, 30m (c) VH3157, 10m (d) VH3147, 20m (e) REV12, 25m	12
Figura 3. Relações de concentração em Sr (ppm) e da razão Mg/Ca entre sedimentos terrígenos e carbonáticos na plataforma continental do Nordeste oriental do Brasil.	13
Figura 4. Diagrama de dispersão entre SiO ₂ e Mg/Ca das amostras com profundidade até 80 metros.	15

SEGUNDO ARTIGO

Figura 1. Porção nordeste da plataforma continental do Brasil e os pontos de amostragem	24
Figura 2. PCA dos sedimentos plataformais do nordeste do Brasil	26
Tabela 1. Matriz de correlação dos parâmetros geoquímicos analisados nos sedimentos plataformais do nordeste do Brasil	27
Tabela 2. Matriz de correlação dos parâmetros geoquímicos dos sedimentos plataformais de Pernambuco	27

Figura 3. Comportamento oposto entre as fácies terrígena e carbonática no ambiente plataformal _____	28
Figura 4. Comportamento da razão CaO/MgO com a profundidade nos carbonatos da plataforma continental de Pernambuco _____	30
Tabela 3. Dados geoquímicos das amostras da plataforma continental de Pernambuco (Mont'alverne, 1982) _____	33
Tabela 4. Dados geoquímicos da plataforma continental nordeste do Brasil (Freire, 1985) _____	35
Tabela 5. Amostras cedidas pelo LGMA _____	40
 TERCEIRO ARTIGO	
FIGURA 1. Localização da área de estudo e das amostras analisadas para isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$ _____	45
FIGURA 2. Variações de ΔSiO_2 (% de quartzo), $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ nos sedimentos plataformais de acordo com a profundidade _____	47
FIGURA 3. Espículas de organismos silicosos. Material residual da amostra VH-3126 (80m profundidade) após ataque com HCl 10%. Observação em LN/40x _____	48
FIGURA 4. Grãos de quartzo angulosos. Material residual da amostra VH-3126 (80m profundidade) após ataque com HCl 10%. Observação em LN/200x _____	49
FIGURA 5. - Dispersão entre os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$. Grupamentos isotópicos A e B de carbonatos das espécies bentônicas: <i>Amphistegina radiata</i> e <i>Peneroplis planatus</i> . A: Carbonatos de foraminíferos bentônicos, com influência de águas continentais. B: Carbonatos de foraminíferos bentônicos, com influência do fator temperatura das águas _____	50
FIGURA 6. Variações das médias dos teores de estrôncio nos sedimentos carbonáticos plataformais _____	51
FIGURA 7. DRX da amostra G2-104 (45m de profundidade) _____	52
FIGURA 8. DRX da amostra GI-29 (80m de profundidade) _____	52
FIGURA 9. Variações das médias dos teores de manganês nos sedimentos carbonáticos plataformais _____	53
FIGURA 10. Variações das médias dos teores em Fe_2O_3 nos sedimentos carbonáticos plataformais _____	54
Tabela 1. Resultados das análises de isótopos de carbono e oxigênio nos sedimentos carbonáticos _____	57

Tabela 2. Resultados das análises químicas das amostras doadas pelo LGMA_____	58
Tabela 3. Resultados das análises químicas de Freire (1985)_____	60

RESUMO

Com o objetivo de detectar sinais geoquímicos de diagênese meteórica em sedimentos relíquia, localizados em profundidades inferidas em estudos anteriores como correspondentes a antigas linhas de costa, ao longo da plataforma continental do Ceará; além de estudar a distribuição dos óxidos principais analisados em sedimento total em sedimentos de plataforma de outros estados do nordeste, foram realizadas análises químicas, e de isótopos estáveis de carbono e oxigênio em 208 amostras coletadas entre as profundidades de 0,5 a 80 metros, entre os estados do Ceará e Sergipe. Foram identificadas também paragêneses minerais correspondentes às fácies terrígena e carbonática, influenciadas pela contribuição sedimentológica do embasamento cristalino do continente adjacente, e pela diadocia de cálcio por magnésio, respectivamente. Os resultados analíticos mostraram a influência da natureza félsica do embasamento cristalino da área continental adjacente sobre a fácies terrígena dos sedimentos plataformais em questão. Um outro ponto observado foi que a biota bentônica produtora de calcita com alto magnésio parece estar associada ao substrato com alta fração terrígeno-quarzosa, ou seja, ao substrato referente a águas rasas. Como esta relação mostrou-se independente da profundidade, concluiu-se que foram estudados, além de sedimentos recentes, sedimentos reliquiais, presentes ao longo da plataforma continental nordeste do Brasil. Indicações de diagênese meteórica foram comprovadas em sedimentos de fundo da plataforma continental do Estado do Ceará, em profundidades onde existiriam sedimentos relíquia, correspondentes a retrabalhamento de antigas linhas de costa, em profundidades de 20 a 25m e 45m abaixo da atual. Essas evidências incluem, nesses níveis de profundidade, teores médios mais elevados de sílica livre (% de quartzo), Mn e Fe, em sedimento total, associados a valores isotópicos mais baixos em $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, a partir de testas de foraminíferos bentônicos das espécies *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*. Associadas a essas características, paragêneses de Mg calcita com distintos graus de diadocia é eventualmente associada ao domínio de 80 metros de profundidade. A combinação desses fatores geoquímicos e mineralógicos não é sempre completa por causa da mistura entre sedimentos relíquia e atuais, ambos sendo formados em condições ambientais distintas, devido à progressão da Transgressão Flandriana, ainda em evolução nos dias de hoje.

PALAVRAS CHAVE: diagênese meteórica, carbonatos biogênicos, calcita magnesiana, plataforma continental, nordeste do Brasil, isótopos de carbono e oxigênio, sedimentos relíquia.

ABSTRACT

With the aim of detect meteoric diagenesis by geochemistry in relict sediments, in depths corresponding to ancient coast lines, in continental shelf of Ceará state; beyond studying the principal oxides distribution in other states of northeastern Brazil, 208 samples of continental shelf of northeastern Brazil has been analysed, stable isotope of carbon and oxygen. Samples were collected from 0.5 through 80m depth, from Ceará through Sergipe states. It has been identified mineral paragenesis corresponding to terrigenous and carbonatic facies, influenced by sediments derived by felsic rocks of continent, and diadochy of Ca by Mg respectively. The analytical results revealed the felsic nature of the crystalline basement influencing the terrigenous facies of sediments. The benthonic biota kept in high Mg-calcite is statistically associated to a greater participation of the quartzous-terrigenous fraction in the bulk sediments of the substratum. It is associated to the shallow waters. This association is independent of depth, thus it can be concluded that has been studied recent and relicts sediments along the continental shelf of northeastern Brazil. Meteoric diagenesis has been evidenced in bottom sediments of the shelf of the state of Ceará, at bathymetric levels where there are relict sediments corresponding to reworking of ancient coastal lines: 20 to 25m and 45m depth. This evidence includes, in these depth levels, more elevated average silica free contents (quartz %), Mn and Fe, in total sediment, associated to lower $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in carbonate carapaces of benthonic foraminifer of the *Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus* species. Associated to these geochemical features, a paragenesis of Mg-calcites with distinct degrees of Ca^{++} for Mg^{++} diadochy, is eventually associated particularly to bathymetric domains of 80m. The combination of all these geochemical and mineralogical parameters is not always complete, due to mixing of contemporaneous and relict sediments, the former being formed under distinct environmental conditions in relation to the latter, due to the evolution of the Flandrian transgression, still in progress today.

KEY WORDS: meteoric diagenesis, biogenic carbonates, Mg calcite Continental shelf, northeastern Brazil, carbon and oxygen isotopes, relict sediments.

1. INTRODUÇÃO

A plataforma continental nordeste do Brasil representa uma das poucas áreas do mundo onde uma plataforma aberta e estável se apresenta quase completamente coberta por carbonato de cálcio biogênico. Nela é admirável a quase total ausência de carbonatos inorgânicos (Coutinho,1992). As associações faunísticas são compostas principalmente por algas calcárias encrustantes e ramificantes, principalmente nas partes média e externa da plataforma. As do gênero *Halimeda* são predominantes. Foraminíferos e moluscos também estão presentes em grande quantidade, e briozoários são menos comuns (França et al.,1976).

Com sedimentos terrígenos dominados por areias quartzosas, a plataforma continental do nordeste, geomorfologicamente, é considerada uma plataforma estreita (largura variando entre 35 e 80 km), devido à configuração estrutural da placa sul-americana (França,1979). Algumas vezes, seu fundo é constituído por vários degraus ou patamares, representando a reestruturação de antigas linhas de costa, associadas à Transgressão Flandriana, durante a evolução do último período interglacial (Figura 1). Esta morfologia de fundo foi observada nos estados do Ceará (Freire,1985), Sergipe e Alagoas (Manso et al,1997), e Pernambuco (Mont'alverne,1982). A figura 1 mostra a posição do nível médio do mar durante a evolução do último período glacial. Esta curva inclui as regiões do Rio de Janeiro e Santa Catarina, e mostra que há 10.000 anos, o nível do mar estava a 25 metros abaixo do atual.

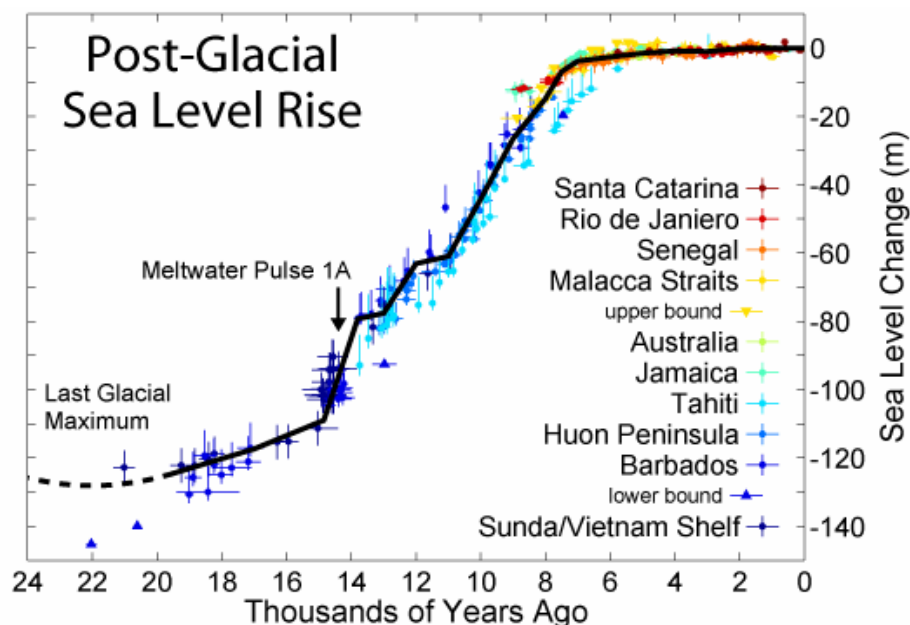


Figura 1. Curva de variação média do nível do mar durante o último período pós-glacial (fonte: wikipedia)

A carga sedimentar lançada pelos rios na plataforma continental nordeste não é relevante. Um motivo seria o reflexo do clima semiárido. Este clima é registrado há 45.000 anos por Behling et al. (2000). Aproximadamente 90% da carga transportada pelo Rio São Francisco, o maior em extensão, é retida em seu canal, e apenas o restante é lançado na plataforma. Aparentemente, quase nenhuma carga é lançada ao mar por outros rios França et al. (1976).

Com relação à textura dos sedimentos, a maior parte da plataforma externa (a partir dos 40m de profundidade) é coberta por cascalhos. Em contraste, na plataforma interna (profundidades abaixo dos 20m), predominam areias com algum cascalho. O conteúdo de lama geralmente não atinge 2,5%. A fração carbonática consiste de carbonato biogênico com mais de 75% de CaCO_3 , chegando a 95%. A fração terrígena é composta predominantemente por quartzo, feldspato, minerais pesados e argilas França et al.,(1976).

Tendo em vista as características sedimentológicas da plataforma continental do nordeste brasileiro, observa-se a riqueza existente em área e sedimentos, para estudos geoquímicos, os quais têm alto grau de aceitação na comunidade científica internacional. Estudos anteriores, tais como os de França et al. (1976), França (1979), Coutinho (1992) oferecem uma visão geral da geoquímica da margem continental como um todo.

Outros estudos realizados, por exemplo, os de Freire (1985) e Mont'alverne (1982) deram ênfase à sedimentologia com determinação dos teores de óxidos principais, com vistas ao aproveitamento econômico de certos elementos, não objetivando a interpretação geoquímica do ambiente de sedimentação.

O objetivo dessa tese de doutorado foi detectar sinais geoquímicos de diagênese meteórica em sedimentos relíquia, localizados em profundidades inferidas em estudos anteriores como correspondentes a antigas linhas de costa, ao longo da plataforma continental do Ceará; além de estudar a distribuição dos óxidos principais analisados em sedimento total em outros estados do nordeste, identificando paragêneses minerais correspondentes às fácies terrígena e carbonática, influenciadas pela contribuição do embasamento cristalino do continente adjacente, e pela diadocia de cálcio por magnésio e estrôncio, respectivamente.

Os resultados irão contribuir em detalhe para os estudos geoquímicos já realizados nesta área, aumentando o leque de conhecimentos a respeito da geoquímica de sedimentação na plataforma continental nordeste do Brasil.

Tendo isto em consideração, optou-se por realizar a referida tese em forma de artigos científicos, submetidos a revistas de caráter nacional e internacional.

Os manuscritos encontram-se na parte de resultados e discussões, e, posteriormente, formatados da maneira em que foram submetidos para cada revista.

As pesquisas foram realizadas sistematicamente, observando-se os fatores mais importantes na sedimentação de carbonatos plataformais: Considerando-se a importância do aporte continental sobre a sedimentação carbonática plataformal, foi realizado primeiramente um estudo sobre a influência de sedimentos continentais sobre a formação dos carbonatos na área em questão.

Em seguida, foi realizado um estudo sobre a distribuição dos óxidos principais em sedimento total (fácies terrígena e fácies carbonática), utilizando-se o método estatístico de análise multivariada ACP (Análise dos Componentes Principais).

Finalizando os trabalhos, foi realizada uma pesquisa sobre o registro geoquímico, em sedimentos relíquia da plataforma continental do Ceará, evidenciando estruturas de antigas linhas de costa,, construídas durante o último período interglacial ou Transgressão Flandriana.

2. MÉTODOS

Os métodos analíticos consistiram de análises químicas por fluorescência de raios X, análises por difração de raios X, análise de isótopos estáveis de carbono e oxigênio, além de análises estatísticas de matrizes de correlação e de componentes principais (ACP).

Foi feita uma compilação abrangendo os dados de Freire (1985), que incluem análises de fluorescência de raios X em sedimentos totais (fácies terrígena e carbonática) da plataforma continental de todo o nordeste brasileiro, e os dados de Mont'alverne (1982), que incluem análises de fluorescência de raios X de sedimentos totais da plataforma continental de Pernambuco. Foram analisadas, também por fluorescência de raios X, amostras de sedimentos totais da plataforma continental do Ceará, cedidas pelo Laboratório de Geologia Marinha (LGMA) da UFC.

As amostras de Freire (1985) e Mont'alverne (1982) foram analisadas no Laboratório de Análises Mineraias da SUDENE. As amostras cedidas pelo LGMA foram analisadas no Laboratório de Fluorescência de Raios X do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco.

Todas as amostras utilizadas nos trabalhos foram lavadas no local de coleta, secas em condições normais de temperatura e pressão, acondicionadas em recipientes plásticos e estocadas em laboratório.

Durante as análises de fluorescência de raios X no Laboratório de Fluorescência de Raios X, as amostras pulverizadas foram secas a 110°C durante 6 horas, e em seguida

calcinadas em mufla a 1000°C durante duas horas, para a determinação de perda ao fogo. A partir de cada amostra calcinada foi feita uma pérola fundida, utilizando-se tetraborato de lítio como fundente, visando-se as análises por fluorescência RX. Essas análises foram produzidas em espectrômetro FRD Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, pelo método de curvas de calibração preparadas com materiais de referências internacionais.

Os elementos maiores estão em notação de porcentagem em peso (%), e os elementos menores em partes por milhão (ppm).

As análises de difração de raios X foram realizadas pelo método do pó, no Departamento de Física, da Universidade Federal de Pernambuco, por equipamento Siemens D5000, com as seguintes condições padrão: varredura de θ /min, de 5 a 50θ , emissão $KCu\alpha$, e correção de “drift” a partir do pico $I=100$ de quartzo α (3,34 Å) a fim de se determinar a quantidade de magnésio inserida na estrutura de calcitas, de acordo com o método de Goldsmith & Graf (1958).

As análises estatísticas consistiram de análises regressivas entre variáveis (representadas pelas porcentagens de óxidos principais), dando origem a matrizes de correlação. As variáveis em questão foram correlacionadas segundo paragêneses, de acordo com seu ambiente de proveniência.

A análise multivariada ACP consistiu na análise de matriz de dados, dando origem ao gráfico de componentes principais, mostrando também paragêneses minerais, agrupadas segundo suas afinidades geoquímicas, definidas de acordo com seu ambiente de proveniência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados analíticos forneceram uma visão mais detalhada da geoquímica dos sedimentos da plataforma continental do nordeste do Brasil, com ênfase à plataforma continental do Ceará, servindo como complemento para o conhecimento prévio geral sobre a geoquímica da área.

Os resultados alcançados são mostrados em forma de trabalhos científicos, expostos a seguir.

3.1 Primeiro artigo. Publicado na Revista Brasileira de Geociências volume 37 (4), 2007

INFLUÊNCIA DE FRAÇÕES CONTINENTAIS NA SEDIMENTAÇÃO DE CARBONATOS BIOGÊNICOS RECENTES NA PORÇÃO ORIENTAL DA PLATAFORMA CONTINENTAL NORDESTE BRASILEIRA

Marques W.S.¹, Menor E.A.¹, Sial A.N.¹, Ferreira V.P.¹, Freire G.S.S² e Manso V.A.V.¹

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

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

wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br, menor@terra.com.br, valderez@ufpe.br, freire@ufc.br, vazmanso@uol.com.br

RESUMO

A influência de aportes continentais na formação de sedimentos marinhos recentes, integrados por fração bioclástica carbonática, é estudada a partir de dados mineralógicos e geoquímicos, sobre sedimentos totais do assoalho plataformar. A área estudada corresponde à plataforma do Nordeste Oriental do Brasil, entre as isóbatas de 10 e 80 metros, adjacente a uma área continental dominada por clima tropical semi-árido a úmido. Foram selecionadas 47 amostras das fácies dominantes nessa plataforma para análises XRD e análises químicas. Os resultados definiram dois tipos de sedimentos de fundo: os de dominância terrígeno-quartzosa e os de dominância francamente carbonática, cujas frações apresentaram distintas características mineralógicas e geoquímicas. Na fácies terrígena, que ocorre desde ambientes rasos (10m) até ambientes mais profundos (25-55m), predominam quartzo, feldspato potássico e calcita de alto magnésio, com teores em Sr geralmente <2.200 ppm. Na fácies carbonática predominam e coexistem calcita de alto magnésio e aragonita, com teores em Sr geralmente >2.600 ppm, chegando a mais de 6.400 ppm. Em ambos os casos, não foi identificada a presença de calcita com baixo magnésio. Mesmo quando a fração terrígena é acessória (<3%), a assinatura geoquímica, marcada por fortes intercorrelações $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{Rb}$, mantém padrões $r \geq 0.9$, refletindo a fonte félsica, de origem continental. As análises estatística (correlação $\text{Mg/Ca} - \text{SiO}_2$), química e mineralogia dos sedimentos indicam que a textura e a natureza mineralógica do substrato são os fatores principais de controle da biota bentônica e que, nessas condições, a fácies mais terrígeno-quartzosa favorece espécies preserváveis em calcita com alto magnésio, em ao invés de espécies aragoníticas. Essa tendência mostrou-se independente da isóbata da amostragem desde os 10 até os 55 metros.

PALAVRAS CHAVE: carbonatos biogênicos, calcitas magnesianas, fluorescência de raios X.

INTRODUÇÃO

Carbonatos biogênicos ocorrem, em grande parte, em águas marinhas rasas de regiões tropicais. Devido ao metabolismo das espécies que os compõem, são quimicamente heterogêneos, ou seja, apresentam uma variedade de elementos químicos inseridos em sua estrutura cristalina Brownlow (1996). Muitos fatores influenciam sua mineralogia e distribuição espacial, entre eles, o tipo de biota. Por exemplo, a maior parte dos foraminíferos precipita calcita magnesiana em suas carapaças, enquanto que algas marinhas ramificantes do gênero *Halimeda* precipitam exclusivamente aragonita Bilal & Boersma (1998).

Fatores ambientais como temperatura, pH, pressão parcial de CO₂, penetração de luz e disponibilidade de oxigênio também são determinantes para a distribuição desses sedimentos nas plataformas continentais. Morse & Mackenzie (1990) apontaram uma relação entre a forma e a complexidade do esqueleto carbonático de diferentes organismos em relação à temperatura do ambiente, enfatizando que organismos produtores de aragonita são, na maioria das vezes, confinados a águas mais quentes. Esses autores indicaram também uma relação entre a razão de crescimento (ou calcificação) dos esqueletos, dependente da temperatura das águas, e o conteúdo de magnésio na estrutura carbonática. Brownlow (1996) enfatiza que os organismos podem precipitar calcita tanto em águas insaturadas como supersaturadas em carbonato de cálcio, e que a razão de nucleação e crescimento dos cristais, assim como sua dissolução, são retardados pela presença do íon Mg⁺⁺ na água do mar. Afirma também que carbonatos precipitados em ambiente marinho raso são formados principalmente por calcita com alto magnésio (11 a 19% Mg), enquanto calcita com baixo magnésio (Mg < 11%) e aragonita são constituintes habitualmente subordinados nessas fácies.

A difração de raios X é uma análise satisfatória no que se refere à quantificação de magnésio na estrutura de carbonatos. Segundo Goldsmith *et al.* (1961), o teor de magnésio pode ser determinado por difração de raios X (DRX), uma vez que sua presença diminui a distância entre os planos de átomos da rede cristalina da calcita. A aragonita apresenta comportamento diferenciado com relação à presença de magnésio, porque seu crescimento não é afetado pela presença deste íon, uma vez que a estrutura ortorrômbica da aragonita não admite o íon magnésio em quantidades suficientes para formar solução sólida, tal como ocorre na calcita. Ao contrário, sua estrutura cristalina favorece a entrada de átomos com raio iônico maior que o do cálcio, como por exemplo, o estrôncio. Nas aragonitas, o cálcio é substituído por estrôncio, chumbo, e mais raramente, zinco Dana (1959).

O objetivo deste trabalho é estudar a influencia da carga sedimentar continental sobre a mineralogia e geoquímica da sedimentação carbonática da plataforma continental do Nordeste Oriental do Brasil, reconhecida como uma das mais ricas em carbonatos biogênicos da costa brasileira.

ÁREA DE ESTUDO

A plataforma continental do Nordeste Oriental brasileiro, particularmente a do Estado do Ceará (figura 1), recebe sedimentos retrabalhados da Formação Barreiras e do embasamento cristalino, através de drenagens de pequeno a médio porte Freire (1985).

As rochas do embasamento cristalino são predominantemente félsicas e, segundo Freire (1985), esse embasamento é recoberto por sedimentos neogênicos da Formação Barreiras na faixa litorânea.

Os sedimentos da Formação Barreiras são constituídos por areia, argila vermelha, e conglomerado. Também ocorrem áreas relativamente extensas com afloramentos de calcários sedimentares (Bacia Potiguar), no Estado do Rio Grande do Norte. Praticamente todas as drenagens que transportam sedimentos para a plataforma continental têm grande parte de suas bacias hidrográficas localizadas no domínio climático semi-árido Meireles & Silva (2002). Segundo Coutinho (1992), essa plataforma continental (figura 1) tem reduzida largura (60-80 km), pouca profundidade, pequeno gradiente (cerca de 1m/km, em média), águas quentes (25-30°C), e elevada salinidade (30-38‰). Em geral, seus domínios médios e externos são inteiramente cobertos por sedimentos carbonáticos biogênicos, caracterizados pelo predomínio de restos algálicos e de moluscos, pequenas quantidades de corais, e total ausência de oóides ou de outras formas de precipitação inorgânica carbonática. A profundidade da quebra da plataforma, ou o início do talude, situa-se entre as isóbatas de 60 e 70m.

Essas características se estendem ao longo da plataforma continental de outros estados do nordeste brasileiro, como o de Pernambuco, estudado por Mont'alverne, (1982).

No conjunto de amostras, entre aquelas de maiores profundidades (>80 metros) foram constatados nódulos carbonáticos na cor bege escura, identificados por Amaral, (1979) como sendo calcários fosfáticos eoceno-oligocênicos da margem continental, formados por fosfatização diagenética tardia de rochas carbonáticas, devido à incidência de correntes de ressurgência.

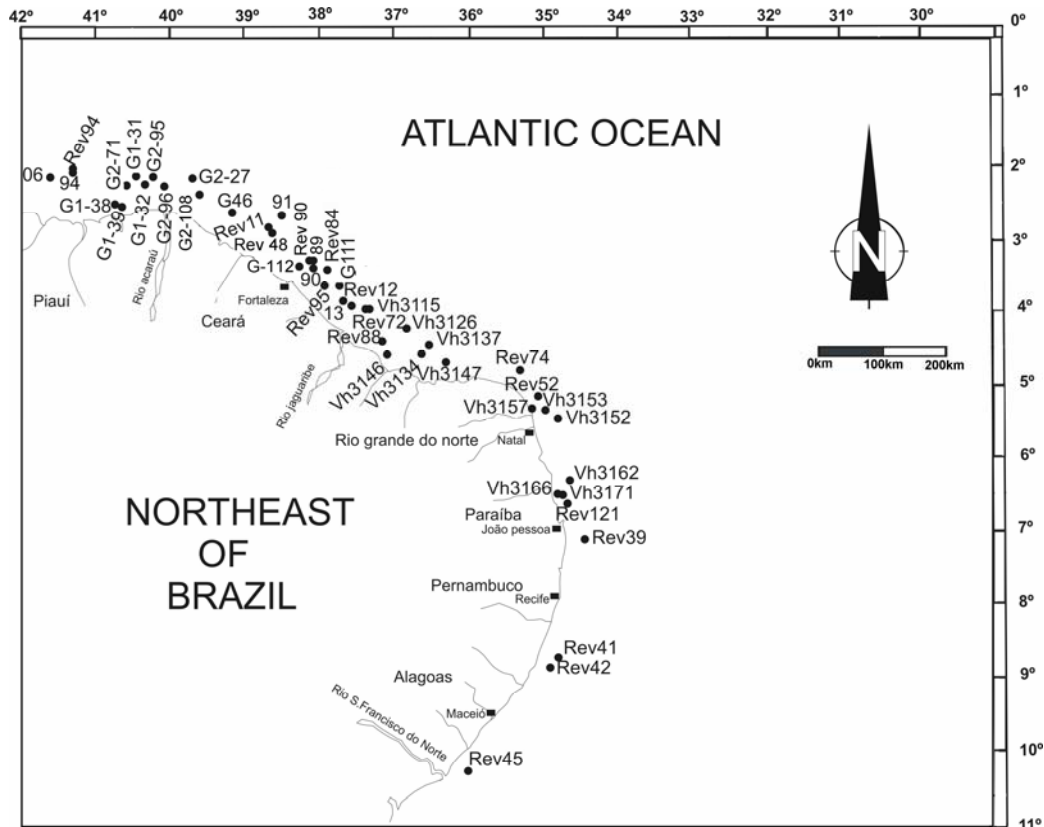


Figura 1. Localização dos pontos amostrados

MÉTODOS

A amostragem foi realizada com o emprego de dragas oceanográficas, tendo sido selecionadas 47 amostras entre as isóbatas de 10 e 80 metros, provenientes da plataforma continental dos estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba e Alagoas. A amostragem inclui essencialmente sedimentos holocênicos superficiais, compostos por carbonatos biogênicos e, em menor proporção, por sedimentos terrígenos. A coleta foi realizada durante as operações GEOMAR XVIII (novembro, 1981) e GEOMAR XXI (novembro, 1983), a bordo do navio oceanográfico Almirante Câmara, da Marinha do Brasil. Cada amostra de sedimento total foi lavada, seca em CNTP, acondicionada em recipientes plásticos, e estocada no Laboratório de Geologia Marinha - LGMA da Universidade Federal do Ceará. Os procedimentos iniciais, em laboratório, consistiram da homogeneização, quarteamento, e retirada de uma alíquota para pulverização em almofariz de porcelana, 100% passante em peneira de 100 mesh. Dessa alíquota foram separadas cinco gramas para determinação de análise química por fluorescência de RX, no Laboratório de Isótopos Estáveis-LABISE, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e análises difratométricas (XRD), no Departamento de Física UFPE.

Fluorescência de raios X

As amostras, pulverizadas e secas a 110°C durante 6 horas, foram em seguida calcinadas em mufla a 1000°C durante duas horas, para a determinação de perda ao fogo. A partir de cada amostra calcinada foi feita uma pérola fundida, utilizando-se tetraborato de lítio como fundente, visando-se as análises por fluorescência RX. Essas análises foram produzidas em espectrômetro FRX Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, pelo método de curvas de calibração preparadas com materiais de referências internacionais. Os elementos maiores estão em notação de porcentagem em peso (%), e os elementos menores em partes por milhão - ppm (tabela 1).

Difratometria de raios X

As análises por DRX foram realizadas no Laboratório de Física da Universidade Federal de Pernambuco, pelo método do pó (figuras 2a,b,c,d,e), por equipamento Siemens D5000, com as seguintes condições standard: varredura de θ /min, de 5 a 50 θ , emissão $KCu\alpha$, e correção de drift a partir do pico $l=100$ de quartzo α (3,34 Å) a fim de se determinar a quantidade de magnésio inserida na estrutura de calcitas, de acordo com Goldsmith et al., (1961).

Análise estatística

O tratamento estatístico dos dados incluiu uma análise regressiva através das correlações entre 14 variáveis pelos Coeficientes de Correlação de Spearman (tabela 2), em nível de confiança de 95%, adequado para o tipo de população a ser analisada (n=47), seguindo-se sugestões contidas em Siegel (1975).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises por DRX (figura 2a, b,c,d,e) evidenciaram o franco predomínio de calcita de alto magnésio em fácies proximais, ou naquelas caracterizadas por fração siliciclástica dominante (>60% em sedimento total), mesmo quando correspondentes a amostras profundas (>25m). Quartzo e quantidades subordinadas de feldspatos potássicos são os principais componentes dessa fração siliciclástica, com muscovita e argilominerais (caulinita) apenas identificáveis esporadicamente, como acessórios. Teores mais baixos em Sr (< 2200 ppm, em geral) e padrões $Mg/Ca \geq 0.12$ (figura 3) caracterizam as fácies proximais, e colocam em evidência a reduzida participação, ou mesmo ausência, de aragonita e de calcitas com baixo magnésio em sedimento total analisado nessas fácies. Em condições distais, ou seja, em amostras mais profundas (> 25m), com franco predomínio da fração carbonática, calcita com alto magnésio (às vezes mais de um tipo) coexiste com proporções expressivas de aragonita.

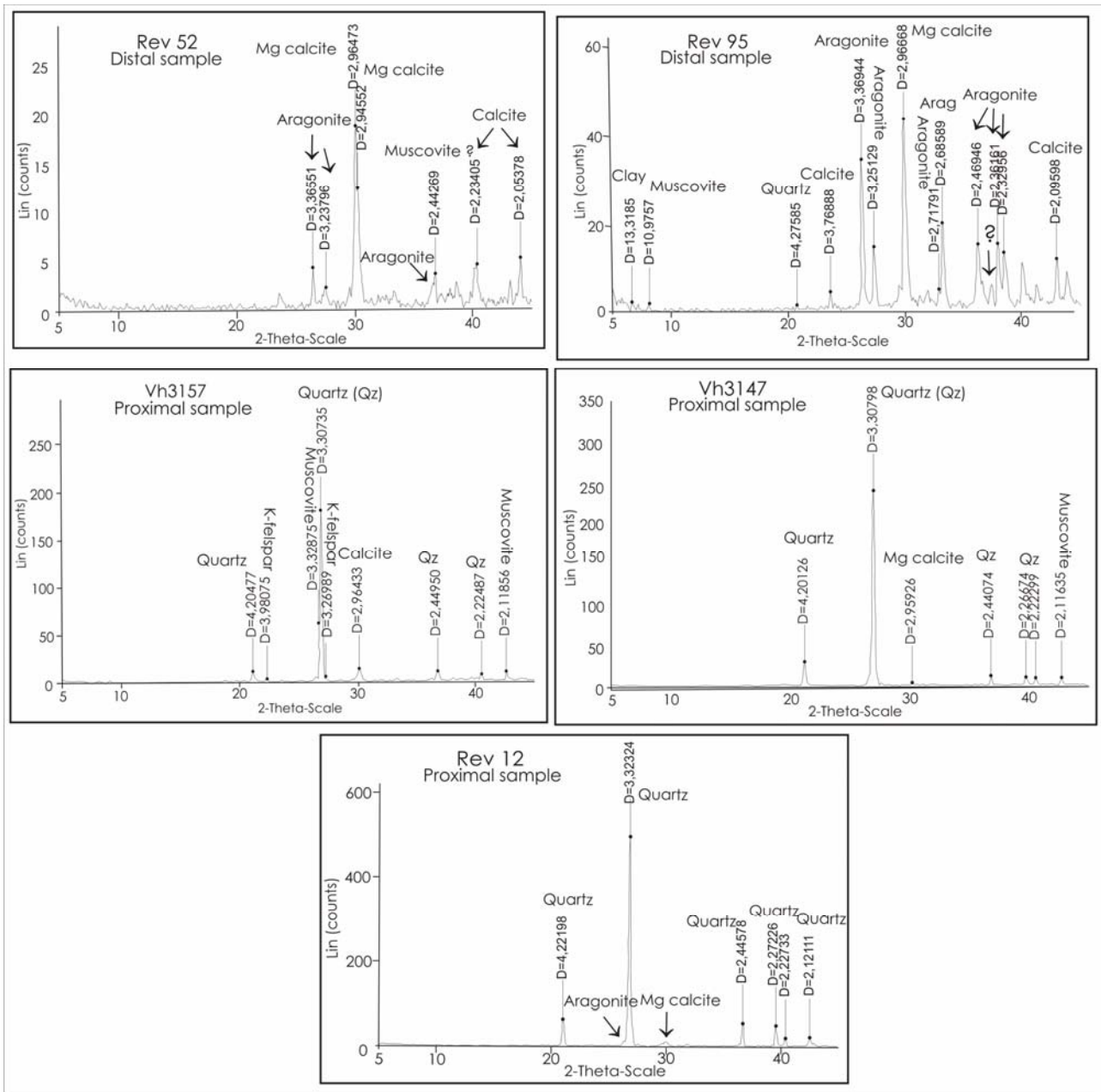


Figura 2. Difractogramas das amostras coletadas a diferentes profundidades. (a) REV52, 40m (b) REV95, 30m (c) VH3157, 10m (d) VH3147, 20m (e) REV12, 25m

A fração siliciclástica, freqüentemente acessória neste ambiente, por vezes não é identificável por DRX em sedimento total. Calcitas com alto magnésio com relações Ca:Mg de 85:15 a 80:20 são predominantes, porém, em isóbatas mais profundas (>35m), e pode ocorrer o padrão Ca:Mg de 70:30, associado. Altos teores em Sr (>2500 ppm) e relações Mg/Ca de sedimento total <0.12 (figura 3) caracterizam essa paragênese.

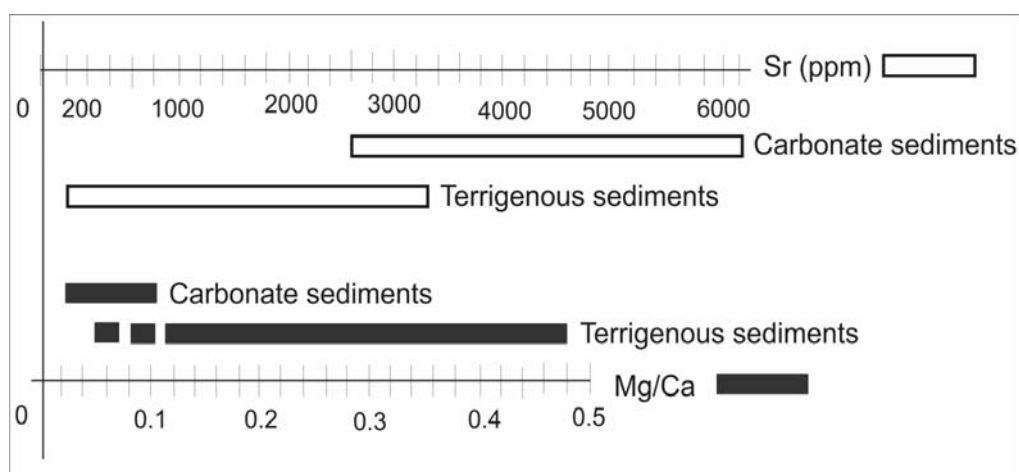


Figura 3. Relações de concentração em Sr (ppm) e da razão Mg/Ca entre sedimentos terrígenos e carbonáticos na plataforma continental do Nordeste oriental do Brasil.

O predomínio de calcitas com alto magnésio é ratificado por fortes teores em MgO (2.78 a 6.89%) para sedimento total com $\text{CaCO}_3_{\text{total}} > 95\%$. Não foi identificada a presença de calcitas com baixo magnésio. Amostras com teores relevantes em Sr (> 3.000 ppm) tiveram a presença de aragonita sistematicamente confirmada em DRX. Os resultados estatísticos revelam, em primeira instância, a esperada dualidade geoquímica de fácies plataformais, ou seja, a oposição entre espécies químicas relacionadas com os aportes terrígenos continentais e aquelas associadas às precipitações bioquímicas que ocorrem *in situ*.

Nesse sentido, com uma origem terrígena continental se alinham fortes intercorrelações integradas entre SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O - Rb (tabela 2), geralmente com fatores $r \geq 0.9$, e que, de alguma forma, também se associam ao grupamento de intercorrelações Fe_2O_3 - Mn - TiO_2 ($r = 0.4$ a 0.8). O conjunto de intercorrelações SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O - Rb marca conspicuamente a constituição siliciclástica principal do sedimento total, composta por quartzo associado a feldspatos potássicos, aparentemente com ausência ou quantidades não detectáveis de plagioclásio sódico em DRX. Tomado isoladamente, o grupo Fe_2O_3 - Mn - TiO_2 ($r = 0.7$ a 1.0) aponta a presença de uma fração residual de origem pedogênica, composta por óxidos de Fe e de Mn, além de minerais pesados contendo titânio (e.g. ilmenita e/ou rutilo). Com efeito, embora de forma não sistemática, os maiores teores em Fe_2O_3 , TiO_2 e Mn, costumam ocorrer nas fácies mais terrígenas, independentemente da isóbata da amostragem.

Em oposição, a sedimentação bioquímica, marcada pelas intercorrelações integradas CaO - MgO - P_2O_5 ($r = 0.7$, sistematicamente), se contrapõe invariavelmente (valores “r” negativos) ao conjunto terrígeno como um todo. A diadocia de Ca^{++} por Mg^{++} na

composição das Mg-calcitas e a partição do Ca^{++} na composição de aragonita e de fosfatos de Ca (grupo das apatitas, pressupostamente) explicam porque as correlações integradas do conjunto bioquímico não são tão fortes. Uma associação bioclástica essencialmente bentônica, composta principalmente por algas, moluscos, equinóides e corais, além da presença esporádica de escamas, espinhas e pellets fecais, suportam os padrões geoquímicos desse conjunto. A diversidade dessa biota e de sua correspondente preservação mineralógica permite uma razoável correlação entre CaO-MgO ($r = 0.7$), porém fraca entre Sr-MgO ($r = 0.2$) em razão da competição entre Sr e Mg ($r = -0.8$ para Ca/Mg-Sr) na composição dos carbonatos.

A correlação Mg/Ca-SiO₂ ($r = 0.8$) evidencia a competição geoquímica entre Sr e Mg na integração à estrutura cristalográfica dos carbonatos. Considerada isoladamente, ela poderia indicar a influência da profundidade no teor de Mg da calcita, ou seja, que a formação preferencial de calcita com algum magnésio ocorre em fácies proximais da plataforma, onde a fração terrígena costuma ser mais forte. Entretanto, na amostragem estudada há sedimentos siliciclásticos quartzosos (SiO₂>60% e Al₂O₃<3%) desde isóbatas de 10 a 55 metros, e a correlação Mg/Ca-SiO₂ mostra-se efetivamente mais sensível onde a fração siliciclástica quartzosa é maior (figura 4), independentemente da isóbata da amostragem. Assim, parece mais evidente que a composição mineralógica e química desses sedimentos esteja diretamente relacionada com a natureza da biota bentônica, e esta com o tipo de substrato sobre o qual se fixa. É possível que tais sedimentos siliciclásticos distais, constatados nessas isóbatas profundas (> 25m), correspondam a faixas litorâneas antigas retrabalhadas, não recobertas por sedimentos mais recentes, marcando períodos de estabilização do nível do mar transgressivo, a partir do ápice do último período glacial.

Seguramente, os registros originais deverão estar em grande parte, recobertos pelo processo de sedimentação subsequente. Nesse sentido, considerando-se o pequeno gradiente da plataforma e a ordem de grandeza das taxas de sedimentação de plataformas rasas carbonáticas (0.5-1.5 m/1000 yr¹, Tucker & Wright, 1990), em poucos mil anos esses depósitos podem ser suficientemente recobertos por sedimentos mais novos. Alternativamente, essa fácies terrígena quartzosa mais profunda pode corresponder a eixos ativos de paleocanais, hoje submersos, ainda recebendo aportes de materiais detríticos continentais através de plumas dos atuais sistemas de drenagem. Em qualquer dessas alternativas, a natureza siliciclástica desses substratos parece mais determinante para a mineralogia e geoquímica dos carbonatos associados, do que as condições hidrodinâmicas ou de temperatura das águas na atualidade, comandando uma

pouca ocupação por biota bentônica cujos restos sejam preservados em aragonita. Portanto, dentre as possibilidades apontadas por Morse & Mackenzie (1990), sugere-se o descarte do efeito de temperatura, posto que a expectativa de diferença entre 10 e 55 metros de profundidade seria da ordem de poucos graus centígrados, retendo-se a concepção de “diferenças na biota”.

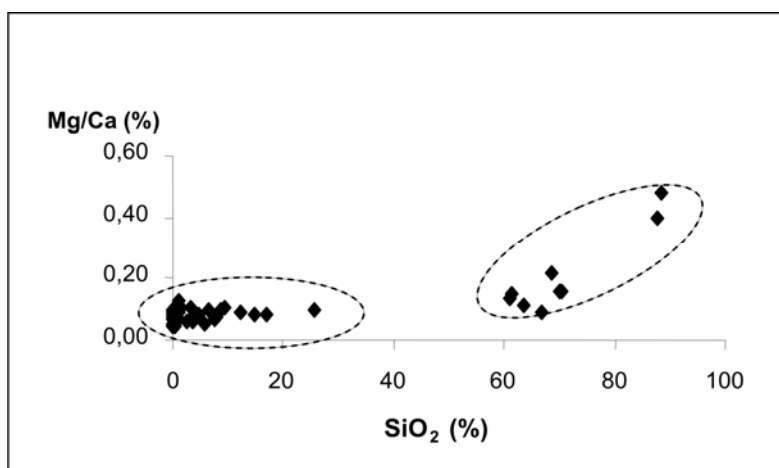


Figura 4. Diagrama de dispersão entre SiO_2 e Mg/Ca das amostras com profundidade até 80 metros.

Um comportamento indefinido se observa no caso do Na_2O , que apresenta correlações negativas fracas com todo o conjunto terrígeno, em concordância com a não identificação de plagioclásio sódico. Sua covariância com CaO ($r = 0,3$) e principalmente aquela com o Sr ($r = 0,6$) sugerem que, como indicaram Okamura & Kitano (1986) e Tucker & Wright (1990), o sódio possa estar integrado à estrutura cristalográfica de carbonatos.

CONCLUSÕES

Os resultados analíticos revelaram dois tipos de sedimentos de fundo:

- a) Sedimentos terrígenos, com predominância de quartzo e quantidades residuais de feldspatos potássicos e minerais pesados (ilmenita, goethita, óxidos de Mn). Neles, a fração terrígena é superior a 65% em sedimento total, e a fração carbonática (<35%) costuma ser representada predominantemente por calcita com alto magnésio observando-se, de forma geral, relações $\text{Mg/Ca} \geq 0,12$ e $\text{Sr} < 2.200$ ppm;
- b) Sedimentos carbonáticos, com predominância repartida entre calcita com alto magnésio e aragonita, e até mesmo dominância de aragonita, acompanhada de

quantidades acessórias de fração terrígena (geralmente <5%). Neles, em geral, constatam-se relações Mg/Ca < 0.12 e Sr > 2.600 ppm.

Mesmo com baixos teores em Al₂O₃ (<3% em 95,5% dos casos; média de 0,8%), fortes correlações integradas entre SiO₂ - Al₂O₃ - K₂O - Rb mostram-se preservadas, confirmando a paragênese de quartzo e feldspato potássico, em concordância com a natureza félsica do embasamento cristalino sobre o qual o sistema de drenagem costeiro está implantado.

A quantidade de Mg inserida em estruturas cristalográficas de calcitas, na plataforma estudada, depende, dentre outros fatores, de uma maior participação da fração terrígeno-quartzosa nos sedimentos totais do substrato, que comanda o desenvolvimento de biotas bentônicas preserváveis em calcitas com alto magnésio em detrimento de biotas preserváveis em aragonita. Essa tendência mostrou-se independente da isóbata da amostragem, desde os 10 até os 55 metros.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco pelas análises de XRD. Wanessa S. Marques agradece à CAPES pela bolsa de estudos, oferecida durante sua estada na UFPE. Esta é a contribuição do Neg-Labise de número 246.

REFERÊNCIAS

- Amaral C.A.B 1979. (Ed). Recursos minerais da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Projeto REMAC. Vol.10. Cenpes/Dintep. Rio de Janeiro. 111p
- Brownlow A.H. 1996. Geochemistry (2nd Edition). Prentice-Hall. United Sates of America. 580p.
- Bilal U.HAQ and Boersma A. 1998. (Eds). Introduction to marine micropaleontology. Elsevier. Netherlands. 376p
- Coutinho P.N. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. Fortaleza, Univ. Fed. Ceará, Revista de Geologia, 6: 65-73.
- Dana - Hurlbut. 1959. Manual de mineralogia. Livros técnicos e científicos S.A. São Paulo. USP. 640p
- Freire G.S.S. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. Recife, Univ. Fed. Pernambuco, Dissertação de mestrado em Geociências, 132p
- Goldsmith J.R., Donald L.G. and Heard H.C. 1961. Lattice constants of the calcium-magnesium carbonates. American Mineralogist, 46: 453-457
- Morse W.J. and Mackenzie F.T. 1990. Geochemistry of sedimentary carbonates. Amsterdam, Elsevier, 679p.
- Montalverne A.A.F. 1982. Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco. Recife, Univ. Fed. Pernambuco. Dissertação de mestrado em Geociências. 197p.
- Meireles A.J.A. e Silva V.E. 2002. Abordagem geomorfológica para a realização de estudos integrados para o planejamento e gestão em ambientes fluvio-marinhos. Scripta Nova- Revista Eletrônica de Geografia e Ciências Sociales. VI:118
- Okamura M. & Kitano Y. 1986. Coprecipitation of alkali metal íons with calcium carbonate. Geochim. Cosmochim. Acta, 50:49-58.

- Siegel S. 1975. Estatística não paramétrica para Ciências do Comportamento. S. Paulo, MacGraw-Hill do Brasil, p. 228-240.
- Summerhayes C.R., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil - Salvador to Fortaleza - Contributions to Sedimentology. 4: 44-78
- Tucker M. & Wright V.P. (1990). Carbonate Sedimentology. Oxford, Blackwell Sci. Publ., 421 p.

Tabela 1. Resultados analíticos de óxidos e alguns elementos menores (óxidos em porcentagem e elementos menores em ppm)
Amostras cedidas pelo LGMA

sample	depth (m)	lat (S)	long (W)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Mn	Sr	Rb	Mg/Ca
Rev86	10	02°07'48"	38°21'36"	0,00	0,00	0,03	2,82	51,31	0,51	0,00	0,01	0,07	45,29	5	5470	5	0,04
G1 38	10	02°38'15"	40°47'00"	1,40	0,22	0,30	6,08	47,68	0,17	0,02	0,03	0,10	44,67	24	2720	5	0,10
G1 39	10	02°40'00"	40°44'30"	1,46	0,30	0,25	5,66	44,92	0,09	0,01	0,19	0,10	44,56	18	2661	5	0,10
Vh03157	10	05°45'12"	35°11'12"	68,68	3,00	2,62	1,61	8,46	0,13	0,23	2,81	0,04	10,98	549	820	15	0,22
Vh03146	15	04°52'06"	36°22'48"	1,05	0,31	0,16	6,89	43,30	0,37	0,04	0,19	0,06	45,77	46	2629	5	0,13
Rev88	18	04°36'00"	37°14'24"	0,00	0,00	0,03	5,97	48,39	0,41	0,01	0,03	0,07	46,92	16	3052	5	0,10
Vh03147	20	04°44'30"	36°19'12"	88,31	1,88	0,62	1,02	2,87	0,08	0,17	0,56	0,00	3,10	158	183	12	0,48
Rev74	20	04°56'24"	35°19'30"	25,61	0,65	0,05	3,90	34,56	0,48	0,18	0,04	0,05	35,14	16	3287	5	0,10
Vh03166	20	06°45'12"	34°54'30"	5,79	0,36	0,07	3,26	45,52	0,99	0,10	0,03	0,07	43,58	5	5301	5	0,06
G2 96	21	02°29'05"	40°04'00"	3,20	0,33	0,31	5,90	46,63	0,11	0,05	0,01	0,11	43,57	30	2940	5	0,10
Vh03171	23	06°51'48"	34°46'30"	14,63	0,38	0,08	3,90	41,11	0,48	0,04	0,02	0,07	39,51	18	3588	5	0,08
G2 95	25	02°30'06"	40°07'00"	9,27	0,60	0,37	5,50	42,85	0,30	0,23	0,01	0,10	40,95	31	2626	5	0,11
G1 32	25	02°17'00"	40°27'30"	70,18	3,17	0,47	1,74	12,11	0,11	0,90	0,23	0,03	13,09	90	1318	31	0,16
G2 71	25	02°31'05"	40°35'00"	8,53	0,50	0,29	5,42	43,85	0,10	0,14	0,02	0,10	41,40	36	2611	5	0,10
G2 27	25	02°33'05"	39°47'03"	12,43	1,39	0,33	4,31	40,56	0,32	0,35	0,08	0,09	40,52	40	3717	5	0,09
Rev12	25	03°52'48"	37°43'12"	87,78	1,97	0,25	1,04	3,52	0,18	0,22	0,28	0,00	4,85	51	217	15	0,40
G1 12	25	03°36'30"	38°17'30"	7,61	0,25	0,05	3,67	45,38	0,58	0,07	0,02	0,10	42,51	17	4086	5	0,07
G2 108	28	02°35'09"	39°52'00"	1,23	0,31	0,34	5,54	48,48	0,20	0,03	0,01	0,12	44,60	29	2689	5	0,09
Rev95	30	03°17'24"	38°00'00"	0,12	0,00	0,01	2,78	50,62	0,69	0,03	0,01	0,07	45,93	5	6482	0	0,04
Vh03134	30	04°48'30"	36°37'42"	0,67	0,21	0,07	3,86	49,17	0,76	0,04	0,02	0,08	45,70	14	5200	0	0,06
06	35	02°18'00"	41°39'36"	0,00	0,00	0,03	5,44	49,13	0,23	0,00	0,00	0,08	45,34	11	3611	5	0,09
90	35	03°28'48"	38°04'48"	0,00	0,00	0,02	4,52	50,88	0,13	0,00	0,03	0,08	45,41	18	4349	0	0,07
G1 31	35	02°15'00"	40°30'30"	61,05	2,32	0,96	2,21	16,55	0,08	0,56	0,12	0,06	18,03	111	1550	20	0,13
13	35	04°15'00"	36°39'36"	61,41	2,81	1,83	2,29	15,69	0,13	0,75	0,18	0,06	16,73	98	1226	25	0,15
Rev42	35	09°06'00"	34°33'36"	66,86	2,21	0,18	1,09	14,53	0,63	0,68	0,13	0,01	16,19	50	3326	25	0,09
89	35	03°28'48"	38°04'48"	0,39	0,01	0,02	2,78	50,13	0,66	0,05	0,01	0,08	45,94	16	6060	5	0,04
Rev90	35	03°28'48"	38°04'48"	0,05	0,05	0,04	3,52	50,58	0,62	0,00	0,00	0,08	45,45	12	4735	5	0,06
Rev121	35	06°48'00"	34°39'36"	16,83	1,83	1,55	3,41	36,59	1,27	0,28	0,11	0,12	38,67	71	3063	10	0,08
Rev72	35	03°49'48"	37°22'12"	63,70	2,9	0,59	1,58	14,97	0,69	0,76	0,08	0,01	16,16	53	2981	23	0,12
G 111	38	03°54'30"	37°35'00"	7,60	0,41	0,15	4,04	42,07	0,77	0,11	0,23	0,11	42,49	51	3174	5	0,08

Tabela 1. Continuação

sample	depth (m)	lat (S)	long (W)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Mn	Sr	Rb	Mg/Ca
Rev52	40	05°18'00"	35°24'24"	0,00	0,00	0,00	4,48	50,06	0,43	0,01	0,00	0,06	45,72	5	5133	0	0,07
G 46	40	02°57'30"	39°16'30"	0,60	0,16	0,16	5,68	49,08	0,31	0,00	0,00	0,11	44,86	14	2801	0	0,09
Rev75	40	03°16'30"	35°06'00"	0,15	0,01	0,04	5,47	46,21	0,73	0,30	0,00	0,07	47,27	15	3839	5	0,10
Rev41	43	09°04'48"	35°01'12"	0,33	0,03	0,02	3,11	50,42	0,47	0,01	0,00	0,07	44,87	16	4710	5	0,05
Rev39	55	07°28'48"	34°46'48"	70,31	2,75	0,15	1,72	12,20	0,50	0,73	0,04	0,02	13,83	29	2161	24	0,16
Rev48	60	03°20'24"	38°40'12"	0,03	0,00	0,03	3,19	51,19	0,63	0,00	0,00	0,08	45,46	18	3165	5	0,05
Rev94	60	02°18'00"	41°27'36"	0,15	0,00	0,07	4,98	48,19	0,90	0,12	0,03	0,12	47,74	16	3936	5	0,08
VH3115	60	04°15'00"	37°24'30"	4,60	0,35	0,05	4,78	46,21	0,57	0,14	0,01	0,08	43,65	9	3200	5	0,08
94	60	02°18'00"	41°27'36"	0,58	0,06	0,05	4,45	46,28	0,65	0,12	0,02	0,10	47,43	30	4314	5	0,08
VH3137	60	04°40'00"	36°34'42"	2,50	0,45	0,14	3,81	48,13	0,82	0,09	0,03	0,10	44,80	20	4051	5	0,06
Rev45	60	10°36'00"	36°24'00"	6,59	0,46	0,32	5,18	44,00	0,48	0,09	0,04	0,09	43,44	43	2882	5	0,09
VH3153	60	05°46'00"	35°00'30"	7,83	1,07	1,17	3,85	43,57	0,66	0,19	0,06	0,17	41,52	76	3063	5	0,07
Rev84	80	03°39'36"	38°00'00"	0,37	0,02	0,02	5,72	48,26	0,44	0,00	0,00	0,08	45,79	10	3120	5	0,10
Rev11	80	03°01'48"	38°46'12"	0,05	0,00	0,03	4,78	49,20	0,41	0,00	0,02	0,10	46,78	18	3890	5	0,08
VH3126	80	04°34'42"	36°53'24"	3,46	0,62	0,15	3,11	46,20	0,70	0,12	0,03	0,08	43,85	22	3888	5	0,06
VH3162	80	06°39'42"	34°43'18"	3,90	1,76	0,79	4,33	44,26	0,79	0,13	0,08	0,10	44,03	73	3816	5	0,08

Tabela 2. Matriz de correlação dos resultados analíticos (óxidos em porcentagem e elementos menores em ppm)

	SiO ₂													
SiO ₂	1,0	Al ₂ O ₃												
Al ₂ O ₃	0,9	1,0	Fe ₂ O _{3t}											
Fe ₂ O _{3t}	0,5	0,7	1,0	MgO										
MgO	-0,8	-0,7	-0,3	1,0	CaO									
CaO	-1,0	-0,9	-0,5	0,7	1,0	Na ₂ O								
Na ₂ O	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,3	1,0	K ₂ O							
K ₂ O	0,8	0,9	0,4	-0,6	-0,8	-0,1	1,0	TiO ₂						
TiO ₂	0,4	0,5	0,7	-0,3	-0,5	-0,2	0,1	1,0	P ₂ O ₅					
P ₂ O ₅	-0,8	-0,5	0,0	0,7	0,7	0,2	-0,5	-0,3	1,0	PF				
PF	-1,0	-0,9	-0,5	0,8	1,0	0,4	-0,7	-0,5	0,8	1,0	Mn			
Mn	0,5	0,6	0,8	-0,4	-0,6	-0,3	0,2	1,0	-0,3	-0,5	1,0	Sr		
Sr	-0,7	-0,7	-0,5	0,2	0,7	0,6	-0,5	-0,4	0,3	0,7	-0,5	1,0	Rb	
Rb	0,9	0,9	0,4	-0,7	-0,9	-0,2	0,9	0,3	-0,6	-0,8	0,4	-0,6	1,0	Mg/Ca
Mg/Ca	0,8	0,5	0,3	-0,4	-0,8	-0,5	0,3	0,4	-0,6	-0,8	0,4	-0,8	0,4	1,0

3.2 Segundo artigo. Aceito para publicação em Continental Shelf Research

ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) E ASSOCIAÇÕES MINERAIS EM FÁCIES LITORANEAS EM CARBONATOS PLATAFORMAIS DO NORDESTE DO BRASIL

Marques W.S.¹, Sial A.N.¹, Menor E.A.¹, Ferreira V.P.¹, Freire G.S.S.², Lima E. A. M.³ e Manso V.A.V.¹

1- NEG-LABISE, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, C.P. 7852, Recife, Pernambuco, Brasil, 50670-000, Brasil

2- DEGEO, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, C.P. 6011, Fortaleza, Ceará. 60455-970, Brasil

3- CPRM- Serviço Geológico do Brasil. Av. Sul, 2291- Afogados, Recife - PE - Brasil, CEP.: 50770-011

wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br, menor@terra.com.br, valderez@ufpe.br, freire@ufc.br, enjolas@re.cprm.gov.br, vazmanso@uol.com.br

RESUMO

A distribuição de associações minerais em fácies terrígenas e carbonáticas na plataforma continental nordeste do Brasil foi estudada através do método de análise multivariada ACP. Os resultados permitiram concluir que minerais pesados como ilmenita, por exemplo, são estatisticamente restritos a fácies litorâneas dos estados da Paraíba e Pernambuco, e que minerais de argila são encontrados em fácies profundas da plataforma continental do Ceará. Na fração carbonática, composta essencialmente por calcita magnesiana e aragonita, não existe covariação entre a razão CaO/MgO e a profundidade em parte da área estudada, especificamente entre 15 e 20 metros, aparentemente devido a temperatura da água do mar, grau de oxigenação e luminosidade da água. A fácies carbonática é composta essencialmente por quartzo, minerais de argila, feldspato potássico, micromicáceos, conteúdo óxidos e hidróxidos de ferro, e minerais de titânio como principais acessórios. O comportamento dos elementos maiores atesta a presença de sedimentos quartzosos, talvez reliquia, nas profundidades de 35, 60, e 80 metros na plataforma continental do Ceará, o que aqui é interpretado como sedimentos característicos de antigas linhas de costa, construídas durante a Transgressão Flandriana.

PALAVRAS CHAVE: Carbonatos, sedimentos relíquia, composição geoquímica, plataforma continental, nordeste do Brasil, análise de componentes principais (PCA).

1. INTRODUÇÃO

O método do ACP (Análise de componentes principais) é um método de análise multivariada Silva et.al. (2005), utilizado na interpretação de matrizes de dados com muitas variáveis. É um método utilizado em muitos trabalhos, por ex.: Silva et al. (2005), Jolliffe (2002), Sass Kiss et al. (2008), Gil et al. (2008).

O procedimento estatístico básico é construir novas variáveis, no sentido de reduzir a dimensionalidade da matriz inicial. Esta simplificação de dados se dá a partir de combinações lineares das variáveis da matriz original, que permite uma adequada visualização dos resultados, que são agrupados de acordo com as similaridades entre si. Dessa forma, numa matriz de dados geoquímicos, as espécies químicas combinam-se de acordo com sua procedência no ambiente de formação. Então, dessas combinações lineares derivam projeções de novos dados, formando os componentes principais (PC), representados em gráficos bi ou tridimensionais de “escores” e de “pesos” Silva et. al. (2005), Mataragas et.al. (2007), Polat & Günes (2008), que representam a distribuição das amostras e a influência das variáveis, respectivamente.

O gráfico dos componentes principais é formado por vetores que representam as coordenadas da variância. O método do PCA é bastante utilizado em estudos geoquímicos Azevedo et al. (op cit), Fernandes et. al (2008), Tavares et al. (2008), Cancès et.al. (2008), Jartun et.al. (2008).

No caso de uma matriz de dados geoquímicos, cada vetor, com um percentual de informação, mostra o “espalhamento” (ou variância) dos dados, de acordo com suas afinidades geoquímicas, e o seu ambiente de proveniência. Sendo assim, essas afinidades podem fornecer informações a respeito da procedência de grupos de óxidos.

Yang & Youn (2007), e Foster et.al.(2007) apontam que a geoquímica é efetiva na investigação da origem de sedimentos marinhos, cujas variações químicas dependem da natureza dos detritos lançados no mar ou em lagos, pelos rios. Pode inferir dessas observações a importância do clima sobre a geoquímica de sedimentos marinhos, conforme enfatizam Maloof et. al. (2007) e Gingele et.al. (2007). Estudos detalhados da geoquímica de carbonatos sedimentares do nordeste do Brasil são ainda limitados. Com o objetivo de investigar a distribuição dos óxidos principais, e suas afinidades geoquímicas de acordo com sua proveniência nas fácies terrígena e carbonática, a análise PCA foi aplicada em 208 análises químicas de sedimentos carbonáticos de uma extensa área da plataforma continental do nordeste do Brasil.

2. AREA EM ESTUDO

A área em estudo (figura 1) corresponde à parte leste da plataforma continental do Brasil, e abrange sedimentos das plataformas dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. A plataforma continental, relativamente estreita e rasa nesta área, possui largura de 30 km, 50 a 80 metros de profundidade, e um talude continental íngreme Behling et al. (2000). Sua superfície é suavemente irregular e cortada por canais submarinos França et al. (1976). A fácies carbonática é representada por calcita magnesiana e aragonita. A entrada de sedimentos continentais não é relevante, por causa da pouca quantidade de rios que alcançam o oceano.

Aproximadamente 90% da carga sedimentar transportada pelo rio São Francisco, o maior da região, é retida em seu leito França et. al. (1976).

A fácies terrígena é composta por sedimentos retrabalhados da Formação Barreiras, uma larga cobertura sedimentar de origem continental a marinho rasa. A Formação Barreiras é formada por areias, argilas vermelhas e conglomerados Bezerra et.al. (2008). A fácies terrígena também é formada por fragmentos do embasamento Pré-Cambriano, de composição predominantemente félsica, transportados pelos rios até a plataforma continental Freire (1985).

3. MÉTODOS

Este estudo inclui um total de 208 análises químicas de sedimentos totais, compilados em três grupos: (1) dados de Mont'alverne (1982), de amostras do Estado de Pernambuco, de profundidades de 0,5 a 56 metros. (2) dados de Freire (1985), dos Estados do Ceará, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Alagoas, coletados durante as operações Geomar XVIII, projeto Vitor Hence, 1981 e Geomar XXI, projeto Revissee, 1983, a bordo do navio oceanográfico Almirante Câmara, da Marinha do Brasil. (3) formado por dados de amostras da plataforma continental do Ceará, cedidas pelo Laboratório de Geologia Marinha da UFC. Todas as amostras foram coletadas com um coletor do tipo Van Veen (formado por duas conchas de aço, que armazenam sedimentos em seu interior ao tocarem o chão), foram lavadas com água deionizada, secas em CNTP, acondicionadas em recipientes plásticos. Antes das análises químicas, todas as amostras foram homogeneizadas, trituradas em cadinho de porcelana, e passadas em peneira de 100 mesh. Dessa alíquota foram separadas 5g das amostras cedidas pelo LGMA para análises químicas por fluorescência de Raios X, no Laboratório de Isótopos Estáveis-LABISE, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Os outros dois grupos de amostras foram analisados também por fluorescência de raios X no Laboratório de Análises Minerais da SUDENE, em Recife.

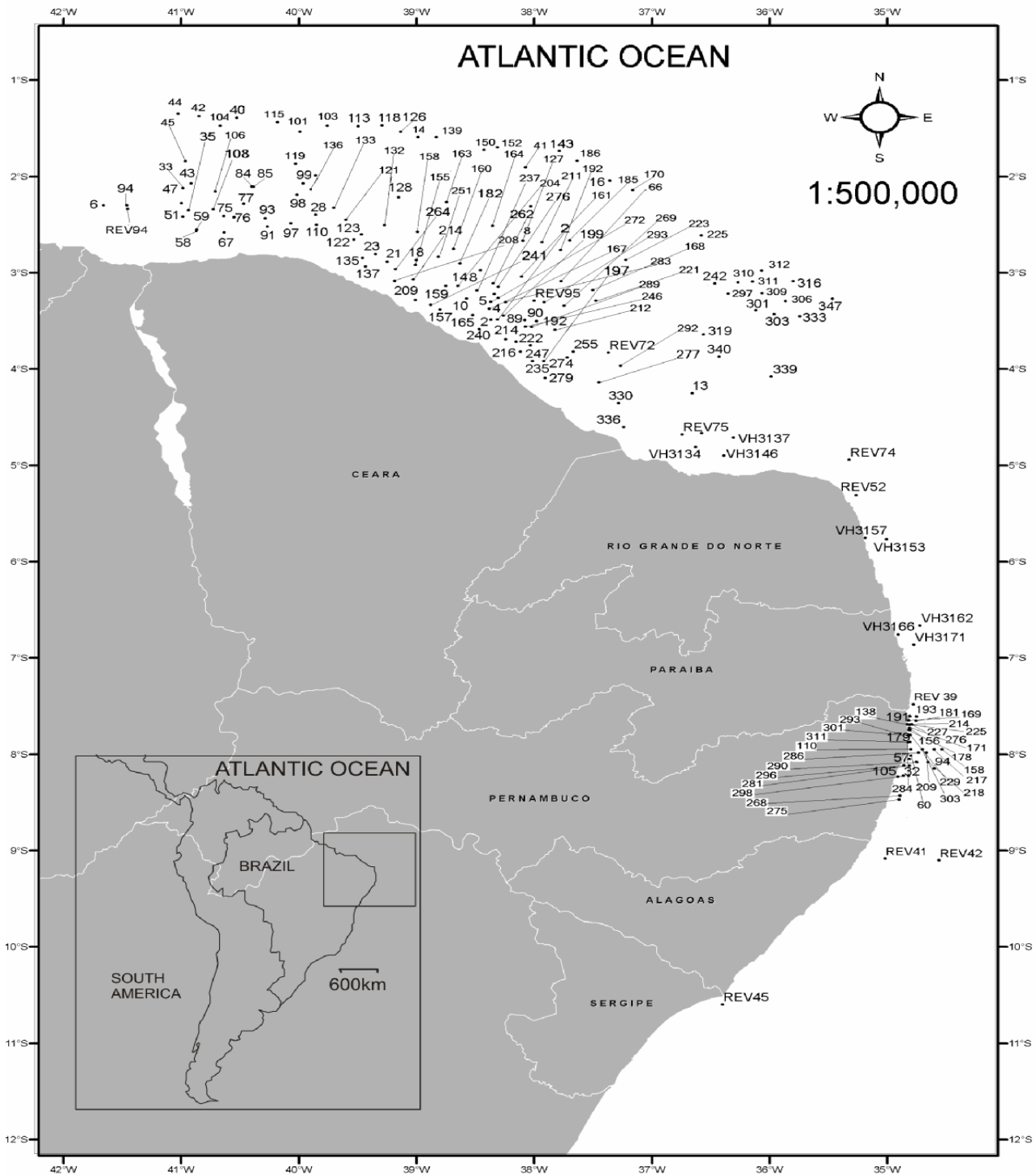


Figura 1. Porção nordeste da plataforma continental do Brasil e os pontos de amostragem.

Para a determinação de voláteis pela perda ao fogo, as amostras foram secas a 110°C , durante seis horas. As amostras analisadas no LABISE foram calcinadas em mufla a 1000°C durante 2 horas. A perda ao fogo não foi analisada nas amostras de Freire.

A partir de cada amostra calcinada foi feita uma pérola fundida, utilizando-se tetraborato de lítio como fundente. Essas análises foram produzidas em espectrômetro

FRD Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, pelo método de curvas de calibração preparadas com materiais de referências internacionais. Os elementos maiores estão apresentados em notação de porcentagem em peso (%), e os elementos menores em partes por milhão-ppm (Tabela 1).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de componentes principais (ACP)

No diagrama PC1 versus PC2 (figura 2), observa-se a nítida separação, em relação ao eixo PC1, entre os componentes formados *in situ*, representados pelos carbonatos (com valores maiores que +0,2), e os componentes alóctones, representados pela fácies terrígena (com valores menores que -0,1).

4.1.a Fatores que controlam a configuração do diagrama ACP na área em estudo

A matriz de dados utilizada na análise de componentes principais inclui dose parâmetros (óxidos principais, manganês e estrôncio). O primeiro componente (PC1) ou primeiro autovetor é um eixo no qual os elementos mostram variância máxima, ou máximo espalhamento, mantendo suas afinidades químicas. O segundo eixo principal (PC2), ortogonal a PC1, representa o segundo eixo de maior variância não explicada pelo primeiro autovetor. Também foi interpretada a matriz de correlação, provendo dados adicionais à interpretação do diagrama ACP.

CaO-MgO-Sr são componentes de filiação carbonática, e a eles se associa P₂O₅, possivelmente em razão da presença de matéria orgânica autóctone nos ambientes plataformais. A associação de fósforo à fácies carbonática também foi constatada por Edward et.al. (2005), na plataforma continental do México.

Os componentes de filiação terrígena são representados por SiO₂, K₂O, Al₂O₃, Mn, TiO₂ e Fe₂O₃. Dentro deste grupo, o PCA destaca os componentes relacionados com sedimentos detríticos de granulação mais grossa, representados por SiO₂ e K₂O (quartzo e feldspato potássico), daqueles relacionados com sedimentos terrígenos de granulação fina: Al₂O₃-Fe₂O₃-TiO₂-Mn (argilominerais, Mn e Fe pedogênicos, e ilmenita/rutilo da fração acessória de minerais pesados).

A presença de feldspato potássico (KF) na plataforma interna é sugerida pela covariância SiO₂-K₂O, caracterizando uma paragênese preferencial de quartzo com KF a quartzo com argilominerais.

A configuração estatística do diagrama PCA sugere a influência do clima semi-árido sobre os sedimentos plataformais, considerando que o clima exerce importante influencia sobre o tipo de sedimento transportado pelos rios até a plataforma continental Zecchin (In press).

Behling et al. (2000) evidenciaram a predominância desse tipo de clima no nordeste do Brasil durante o Quaternário (hoje Neógeno), a partir do estudo de polens nos sedimentos oceânicos, ao largo da plataforma continental do nordeste brasileiro.

A razão Mg/Ca situa-se em posição intermediária em relação ao eixo PC1, associando-se tanto aos carbonatos quanto aos componentes de fácies terrígenas, talvez pelo fato de os carbonatos próximos da costa conterem mais magnésio em sua estrutura que os carbonatos distais, pela influência da temperatura. A relação entre calcita com mais altos teores de magnésio, e a temperatura ambiental é admitida por outros autores McArthur et. al. (2007), Kuhnert e Rathmann (In press).

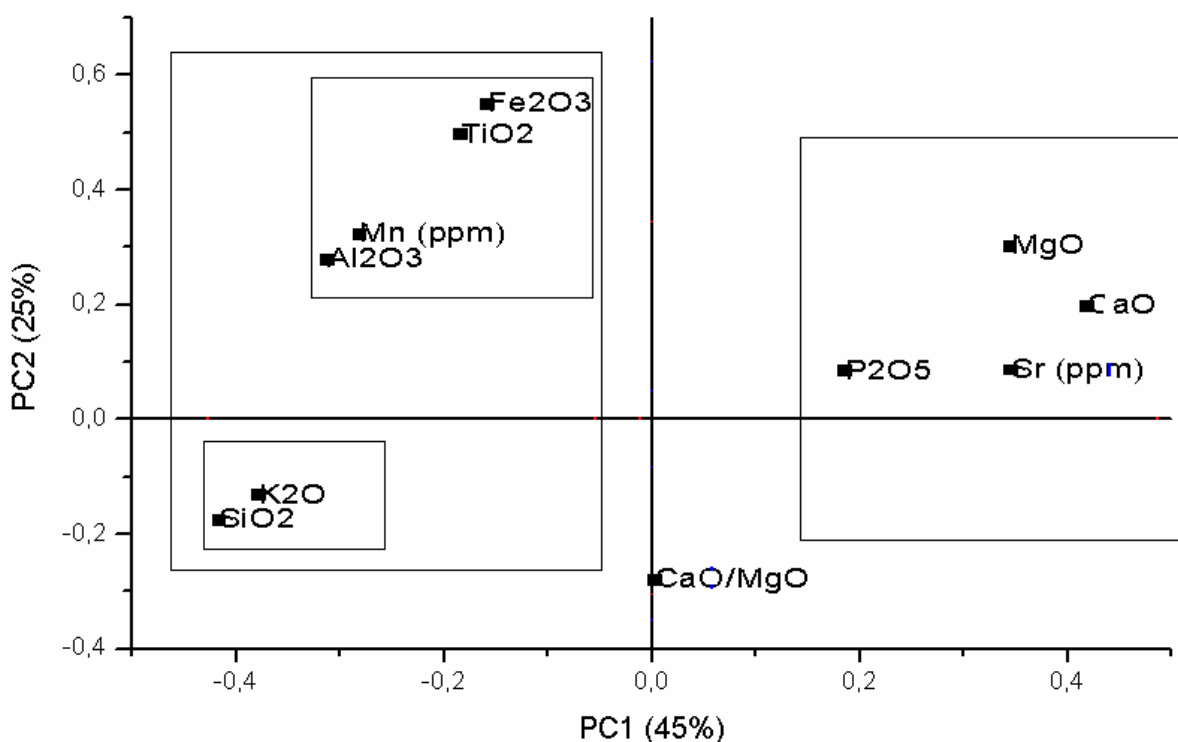


Figura 2. PCA dos sedimentos plataformais do nordeste do Brasil.

4.2 Matrizes de correlação

A matriz reunindo o conjunto de todos os dados é mostrada na Tabela 1. Os fatores de correlação (r) mais notórios são: CaO e SiO₂ = (-0,9); CaO e Al₂O₃ = (-0,5); CaO e K₂O = (-0,8), SiO₂ e Al₂O₃ ($r=0,6$), Al₂O₃ e K₂O ($r=0,7$), SiO₂ e K₂O ($r=0,8$), Fe₂O₃ e TiO₂ ($r=0,7$). A matriz de correlação das amostras das plataformas dos estados de Pernambuco e Paraíba é mostrada na Tabela 2. Nessa tabela de resultados é notória a não correlação entre óxidos de ferro e titânio Fe₂O₃ e TiO₂ ($r=1$).

Tabela 1. Matriz de correlação dos parâmetros geoquímicos analisados nos sedimentos plataformais do nordeste do Brasil

	depth (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn (ppm)	Sr (ppm)	CaO/MgO
Depht (m)	1											
SiO ₂	-0,1	1										
Al ₂ O ₃	-0,2	0,6	1									
Fe ₂ O ₃	-0,2	0,1	0,6	1								
MgO	-0,1	-0,7	-0,3	0,1	1							
CaO	0,0	-0,9	-0,5	0,0	0,8	1						
K ₂ O	-0,1	0,8	0,7	0,1	-0,6	-0,8	1					
TiO ₂	-0,1	0,2	0,4	0,7	-0,1	-0,2	0,1	1				
P ₂ O ₅	0,2	-0,4	-0,3	-0,1	0,2	0,3	-0,3	-0,1	1			
Mn (ppm)	0,0	0,3	0,4	0,5	-0,3	-0,4	0,3	0,6	0,0	1		
Sr (ppm)	0,1	-0,7	-0,4	-0,1	0,4	0,7	-0,5	-0,1	0,2	-0,4	1	
CaO/MgO	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,3	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,2	1

Tabela 2. Matriz de correlação dos parâmetros geoquímicos dos sedimentos plataformais de Pernambuco

	depth (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn (ppm)	Sr (ppm)	CaO/MgO
Depht (m)	1											
SiO ₂	-0,4	1										
Al ₂ O ₃	-0,3	0,6	1									
Fe ₂ O ₃	-0,4	-0,1	0,3	1								
MgO	0,6	-0,7	-0,3	0,1	1							
Cão	0,3	-1,0	-0,6	0,1	0,5	1						
K ₂ O	-0,2	0,7	0,8	0,0	-0,4	-0,7	1					
Ti	-0,3	0,1	0,1	0,1	-0,2	-0,1	-0,1	1				
P ₂ O ₅	0,3	-0,4	-0,1	0,3	0,5	0,3	-0,2	-0,1	1			
Mn (ppm)	-0,4	-0,3	0,0	0,7	-0,1	0,3	-0,2	0,2	0,0	1		
Sr (ppm)	0,0	-0,6	-0,4	-0,1	-0,1	0,7	-0,5	0,1	0,1	0,2	1	
CaO/MgO	-0,2	0,1	0,0	-0,2	-0,5	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,1	0,2	1

4.2a Fatores controladores da matriz de correlação na área em estudo

A matriz de dados mostra a não correlação entre fácies terrígena e carbonática no ambiente plataformal (Figura 3).

A correlação positiva entre sílica, alumínio e potássio corrobora que a fração terrígena é formada principalmente por quartzo, argilominerais, KF, e presença dispersa de minerais micáceos (muscovita). A covariância entre SiO₂ e Al₂O₃ (r=0,6) reflete a partição do silício entre quartzo e os minerais aluminossilicáticos (KF, argilominerais e muscovita).

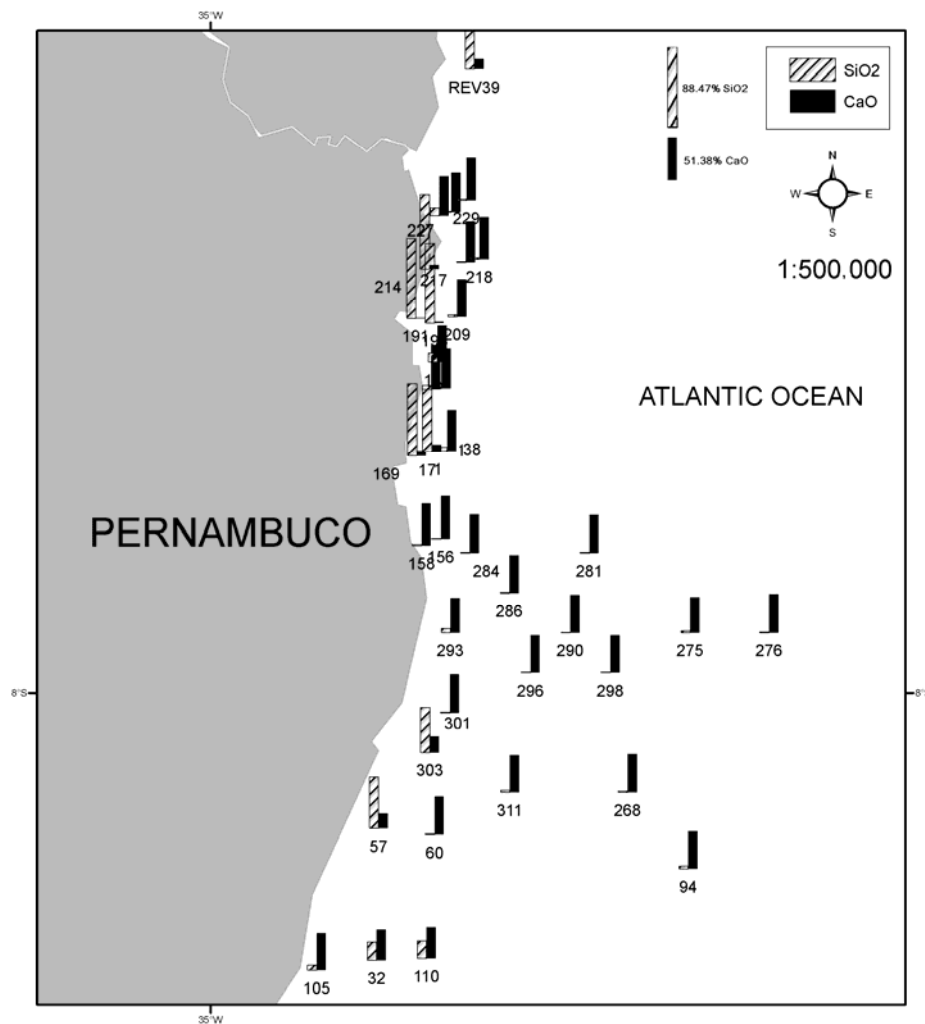


Figura 3. Comportamento oposto entre as fácies terrígena e carbonática no ambiente plataformal.

Fortes correlações entre Al₂O₃ com K₂O ($r=0,7$) e SiO₂ com K₂O ($r=0,8$) confirmam-se a presença de uma participação significativa de KF na fração terrígena. A expressiva covariância entre Fe₂O₃ e TiO₂ ($r=0,7$) aponta a ilmenita como principal mineral pesado de titânio na fração terrígena, mas a presença desse acessório na plataforma é difusa, em razão de suas fracas correlações com SiO₂ e Al₂O₃. Landing & Bruland (1987) explicam que a dispersão mecânica de um elemento na plataforma depende, entre outros fatores, da importância de fontes fluviais. Nesse caso, parece lógico que a ilmenita esteja presente em granulação variada, de modo que sua distribuição apresenta-se disseminada tanto em fácies proximais como nas distais. Nesse mesmo sentido, a correlação Al₂O₃-Fe₂O₃ ($r=0,6$), sugere uma dispersão de minerais ferríferos, e sugere que existe uma componente terrígena pedogênica (goethita), de granulação muito fina, que acompanha os argilominerais.

CaO, MgO e Sr mostram boa intercorrelação, apesar da não ligação entre Mg e Sr em minerais carbonáticos, sendo o elemento estrôncio preferencialmente incorporado à estrutura da aragonita. A matriz de correlação dos dados dos estados de Pernambuco e Paraíba (Tabela 2) mostra a influência de um clima variando para úmido, ao invés de semi-árido como no estado do Ceará, mostrando algumas peculiaridades da fácies carbonática em relação às outras plataformas do nordeste. Diferenças são também observadas no comportamento de elementos de minerais acessórios como o titânio, com distribuição ramdomica, e não relacionado a minerais de argila, enquanto ferro e manganês mostram co-variância relativamente forte um com o outro ($r = 0,7$).

Marin e Girese, (2001) sugeriram que o elemento manganês pode ser carregado para plataformas continentais através das redes fluviais. No caso em estudo, a correlação entre ferro, alumínio e manganês não é relacionada com a profundidade, sugerindo que sua dispersão mecânica não alcança fácies distais.

Na tabela 2, óxidos de ferro e titânio não mostram correlação, sugerindo que ilmenita, explorada em placers da Paraíba, esteja em granulação mais grossa e melhor selecionada do que na plataforma do Ceará, mas estando restrita a fácies litorâneas de pouca profundidade, talvez menor que 5 metros. A razão CaO/MgO não representa uma correlação bem definida com a profundidade, mas mostra uma tendência para aumento a partir da profundidade entre 15 e 20 metros na plataforma de Pernambuco (Figura 3). Isto pode estar ligado à variação de temperatura, já que calcita com alto magnésio está relacionada a águas quentes e rasas Mc Arthur et al. (2007); Kunhert & Hathmann, (in press).

A distribuição das espécies está relacionada com a temperatura, iluminação e disponibilidade de oxigênio, de modo que o fracionamento de filos é muito previsível nesse caso, passando a predominar espécies preservadas em calcitas com baixo Mg e/ou aragonitas, em águas mais profundas dessa plataforma, a partir dos 20 metros.

Mont'alverne (1982), mesmo sem entrar em detalhe sobre a distribuição dos filos, observou que nessa porção da plataforma existe uma tendência para diminuição das espécies nas fácies distais nessa parte da plataforma continental, onde foraminíferos planctônicos e bentônicos predominam sobre outras espécies.

Na plataforma continental do Estado do Ceará, foi observado um aumento nos teores de SiO₂ em fácies distais, entre as isóbatas de 25-35, 40-50 e 60 metros. Nessas profundidades, os teores de SiO₂ são comparáveis com aqueles encontrados em fácies costeiras (Tabelas 3, 4 e 5).

De outra forma, nessas fácies distais, os teores de TiO₂ e Fe₂O₃ são baixos. Freire (1985) assinala a presença de relevo irregular na isóbata de 40 metros, associados

a presença de cascalho e areia, juntamente com alguma lama biodetrítica, indicando, por essas associações, a existência de “sedimentos relíquia”, como indicadores de antigas linhas de costa.

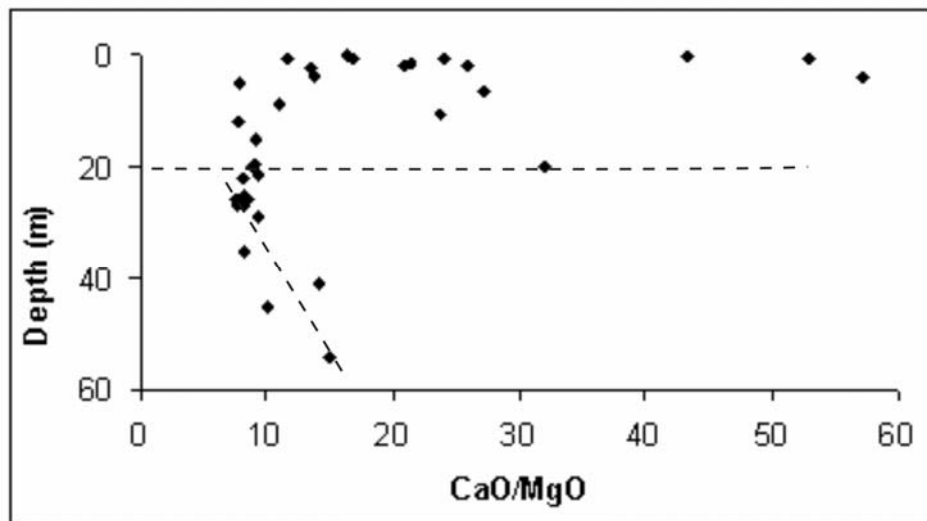


Figura 4. Comportamento da razão CaO/MgO com a profundidade nos carbonatos da plataforma continental de Pernambuco

O mesmo autor ainda denomina de “terraços de borda de plataforma” as irregularidades no relevo de fundo, constatadas também entre 20 e 30 metros, 40 e 50 metros, 60 e 70 metros. Por fim, Behling et al. (2000) enfatizaram a presença de material terrígeno em ambientes distais na plataforma continental do nordeste do Brasil, como registros proximais ao último período glacial, quando o nível do mar esteve bem mais abaixo que o atual.

CONCLUSÕES

O método do ACP, assim como o das matrizes de correlação, mostraram-se úteis no estudo dos carbonatos plataformais do nordeste do Brasil, no sentido de definição das paragêneses mineralógicas, afinidades e oposições geoquímicas, assim como na definição da proveniência e partição dos elementos maiores e do estrôncio nos sedimentos totais. Nesses ambientes de sedimentação plataformal, ficou evidenciada uma distinção entre minerais carbonáticos, de origem biogênica, sedimentados *in situ*, em relação aos minerais de origem continental, com evidente contribuição pedogênica. Do ponto de vista estatístico, essa distinção separou definitivamente os grupamentos Ca-Mg-Sr e Si-Al-K, tanto em interpretação a partir de matrizes de correlação quanto do diagrama de ACP.

Aparentemente, as relações do grupo de filiação continental terrígena Si-Al-K com Fe-Ti-Mn são dependentes dos fatores climáticos e hidrodinâmicos vigentes durante o processo de entrada fluvial na plataforma.

Foi constatada a presença de óxidos/hidróxidos de ferro e de fração pesada com titânio em granulometria certamente muito fina, acompanhando os argilominerais, em direção ao mar aberto. Entretanto, na plataforma entre os estados da Paraíba e Pernambuco, esses minerais se concentram em fácies proximais.

Supõe-se uma seletividade de organismos produtores de calcita com baixo magnésio na plataforma continental externa de Pernambuco, observada através da razão CaO/MgO dos respectivos dados analíticos. Isto pode ser devido a presença predominante de foraminíferos planctônicos e bentônicos nesta área, como apontado por Mon'alverne (1982) e Freire (1985).

AGRADECIMENTOS

Wanessa S. Marques gostaria de enviar seus agradecimentos à CAPES, pela bolsa de estudos. Os comentários dos avaliadores da revista foram de grande valia para o melhoramento do manuscrito original. Todas as afirmações contidas neste trabalho, entretanto, são de inteira responsabilidade dos autores. Esta é a contribuição de número 246 do Neg-Labise, Universidade Federal de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

- Amaral C.A.B 1979. (Ed). Recursos minerais da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Projeto REMAC, Cenpes/Dintep, Rio de Janeiro. 10, 111p.
- Azevedo D.A., Tamanqueira J.B., Dias J.C.M., Carmo A.P.B., Landau L., Gonçalves F.T.T. 2008. Multivariate statistical analysis of diamond and biomarker data from Brazilian basin oil samples. *Fuel*. 87, 2122-2130.
- Bezerra F.H.R., Neves B.B.B., Corrêa A.C.B., Barreto A.M.F., Sugguio K. 2008. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin-The Cariatá trough, northeastern Brazil. *Geomorphology*. 97, 555-582.
- Behling H., Arz W.H., Pätzold J., Wefer G. 2000. Late quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB3104-1. *Quaternary Science Reviews*. 19,981-994.
- Coutinho P.N. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. *Revista de Geologia UFC. Fortaleza*. 6,65-73.
- Edwards A.C., Hoz L.R., Fucugauchi J.U., Fortanel A.S., Garza E.M., Cruz R.L.S. 2005. Geochemical distribution pattern of sediments in an active continental shelf in Southern México. *Continental Shelf Research*. 25,521-537.
- Fernandes P.G., Carreira P., Silva M.O. 2008. Antropogenic sources of contamination recognition-Sines coastal aquifer (SW Portugal). *Journal of Geochemical Exploration*. 98,1-14.
- Foster I.D.L., Boardman J. and Bright K. 2007. Sediment tracing and environmental history for two small catchments, Karoo Uplands, South Africa. *Geomorphology*. 90, 126-143.
- Freire G.S.S. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. Dissertação de mestrado em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Recife. 132p.

- França A.M.C., Coutinho P.N., Summerhayes C.P. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. 6, 71-87.
- Gingele F., Deckker P.D. and Norman M. 2007. Late Pleistocene and Holocene climate of SE Australia reconstructed from dust and river loads deposited offshore the River Murray mouth. *Earth and Planetary Science Letters*. 255, 257-272.
- Gil M.V., Carlo L.F., Blanco D., Sanches M.E, 2008. Assessing the agronomic and environmental effects of the application of cattle manure compost on soil by multivariable methods. *Bioresource Technology*. 99, 5763-5772.
- Jolliffe I.T. 2002. *Principal component analysis*. 2ed. New York. Springer Verlag. 502pp.
- Kuhnert H. e Rathmann S. *In press*. Carbonate ion effect on Mg/Ca, Sr/Ca and stable isotopes on the benthic foraminifera *Oridorsalis umbonatus* off Namibia. *Marine micropaleontology*.
- Landing W.M. e Bruland K.W. 1987. The contrasting biogeochemistry of iron and manganese in the Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 51,29-43.
- Maloof A.C., Kopp R.E., Grotzinger J.P., Fike D.A., Bosak T., Vali H., Poussart P.M., Weiss B.P. and Kirschvink J.L. 2007. Sedimentary iron cycling and the origin and preservation of magnetization in platform carbonate muds, Adros Island, Bahamas. *Earth and Planetary Science Letters*. 259,581-598.
- Mataragas M., Skandamis P., Nychas G.J.E. and Drosinos E.H. 2007. Modeling and predicting spoilage of cooked, cured meat products by multivariate analysis meat. *Science*. 77,348-356.
- Marin B. and Giresse P. 2001. Particulate manganese and iron in recent sediments of the Gulf of Lions continental margin (north-western Mediterranean Sea) deposition and diagenetic processes. *Marine Geology*. 172,147-165.
- McArthur J.M., Doyle P., Leng M.J., Reeves K., Williams C.T., Sanchez R.G., Howarth R.J. 2007. Testing palaeo-environmental proxies in Jurassic belemnites: Mg/Ca, Sr/Ca, Na/Ca, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 252,464-480.
- Mont'alverne A.A.F. 1982. Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco. Recife, Univ. Fed. Pernambuco. Dissertação de mestrado em Geociências. 197p.
- Polat K. and Günes S. 2008. Computer aided medical diagnosis system based on principal component analysis and artificial immune recognition system classifier algorithm. *Expert Systems with Applications*. 34, 773-779.
- Sass-Kiss A., Kiss J., Havadi B., Adányi N. 2008. Multivariate statistical analysis of botrytised wines of different origin. *Food Chemistry*. 110, 742-750.
- Silva, J. B. P., Malvestiti, I., Hallwass F. 2005. Principal component analysis for verifying ^1H NMR spectral assignments: the case of 3-aryl (1,2,4)-oxadiazol-5-carbohydrazide benzylidenes. *Química Nova*. 28(3),492-496.
- Summerhayes C.P., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil. *Contributions to Sedimentology*. 4,44-78.
- Tavares M.T., Sousa A. J., Abreu M.M. 2008. Ordinary kriging and indicator kriging in the cartography of trace elements contamination in São Domingos mine site (Alentejo, Portugal). *Journal of Geochemical Exploration*. 98, 43-56.
- Yang S. e Youn Jung-Su. 2007. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments. *Marine Geology*. 243, 229-241.
- Zecchin M. *In Press*. The architectural variability of small-scale cycles in shelf and ramp clastic systems: The controlling factors. *Earth-Science Reviews*

Tabela 3. Dados geoquímicos das amostras da plataforma continental de Pernambuco (Mont'alverne, 1982)

sample	Depth (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn (ppm)	Sr (ppm)	CaO/MgO	Lat S	Long W
169	0.50	87.14	1.18	0.36	0.36	5.88	0.53	0.14	0.06	45	125	16.33	07°48'09"	34°49'41"
214	0.50	88.47	1.65	0.18	0.11	4.76	1.00	0.00	0.03	40	200	43.27	07°38'46"	34°49'03"
225	0.60	9.50	0.56	0.26	0.90	47.70	0.06	0.16	0.05	70	5000	53.00	07°36'08"	34°48'33"
227	0.65	0.88	0.38	0.64	4.10	47.80	0.06	0.01	0.05	200	1500	11.66	07°35'58"	34°47'58"
193	0.70	95.74	0.52	0.18	0.07	1.68	0.21	0.04	0.04	12	25	24.00	07°41'29"	34°48'48"
171	0.75	81.00	0.90	0.29	0.53	8.96	0.60	0.01	0.06	42	175	16.91	07°47'58"	34°48'56"
179	1.40	0.20	0.28	0.16	0.14	53.15	0.03	0.00	0.06	27	6000	379.64	07°44'48"	34°48'58"
178	1.60	6.29	0.37	0.29	2.24	47.91	0.20	0.00	0.11	62	3500	21.39	07°44'46"	34°48'27"
191	1.90	96.50	0.52	0.13	0.05	1.05	0.18	0.03	0.03	10	50	21.00	07°41'15"	34°49'44"
158	2.10	1.71	0.28	0.35	1.95	50.54	0.04	0.00	0.12	92	4000	25.92	07°52'38"	34°49'27"
217	2.40	0.56	0.38	0.36	3.60	48.60	0.05	0.23	0.09	90	1800	13.50	07°38'26"	34°47'14"
181	3.70	11.24	0.37	0.47	3.25	44.67	0.15	0.04	0.13	75	1200	13.74	07°43'28"	34°48'39"
229	4.00	1.32	0.52	0.23	0.90	51.50	0.08	0.01	0.06	100	6200	57.22	07°35'22"	34°47'12"
209	5.20	2.14	0.52	0.66	5.80	45.00	0.10	0.00	0.11	100	1200	7.76	07°41'10"	34°47'40"
218	6.50	1.73	0.52	0.33	1.84	50.20	0.05	0.12	0.07	100	4700	27.28	07°38'17"	34°46'33"
105	9.00	6.17	0.56	0.58	4.09	44.86	0.10	0.03	0.33	92	2100	10.97	08°13'54"	34°54'42"
156	10.60	0.45	0.28	0.34	2.17	51.38	0.05	0.00	0.10	140	4000	23.68	07°52'17"	34°48'29"
303	12.00	54.56	1.60	0.58	2.53	19.74	0.55	0.04	0.09	72	500	7.80	08°03'00"	34°49'02"
57	13.00	61.50	0.71	0.20	0.05	18.20	0.31	0.00	0.05	40	500	364.00	08°06'48"	34°51'36"
284	15.00	0.84	0.35	0.37	5.05	46.06	0.17	0.00	0.12	60	2300	9.12	07°53'00"	34°47'02"
60	19.50	0.65	0.33	0.12	5.00	45.50	0.11	0.00	0.06	40	1400	9.10	08°07'06"	34°48'48"
138	20.00	4.43	0.37	0.35	1.57	50.11	0.11	0.03	0.00	120	420	31.92	07°47'55"	34°48'10"
293	20.00	5.40	1.51	0.64	4.74	42.39	0.30	0.02	0.15	80	1900	8.94	07°57'00"	34°48'00"
32	21.50	21.95	0.52	0.36	4.00	37.38	0.15	0.00	0.09	40	1100	9.35	08°13'24"	34°51'42"

Tabela 3. Continuação

301	22.00	0.56	0.47	0.11	5.62	45.92	0.11	0.01	0.09	20	2200	8.17	08°01'00"	34°48'02"
311	25.00	2.39	0.57	0.21	5.45	45.33	0.24	0.01	0.18	30	1700	8.32	08°05'00"	34°45'02"
94	26.00	3.08	0.28	0.10	5.90	44.74	0.09	0.00	0.11	12	1500	7.58	08°08'48"	34°36'06"
110	26.00	21.30	0.56	0.28	4.38	37.66	0.27	0.00	0.14	20	1300	8.60	08°13'18"	34°49'12"
286	26.00	0.75	0.23	0.37	5.80	45.50	0.08	0.01	0.10	40	2100	7.84	07°55'00"	34°45'03"
290	27.00	0.48	0.47	0.11	5.96	45.85	0.09	0.01	0.07	20	1700	7.69	07°57'00"	34°42'00"
296	27.00	0.58	0.38	0.10	5.54	45.50	0.11	0.01	0.09	20	1900	8.21	07°59'00"	34°44'00"
281	29.00	0.71	0.09	0.30	4.90	45.64	0.13	0.01	0.10	25	2400	9.31	07°53'00"	34°41'03"
298	35.00	0.58	0.38	0.10	5.54	45.50	0.13	0.01	0.11	30	1700	8.21	07°59'00"	34°40'00"
268	41.00	1.22	0.30	0.14	3.30	46.70	0.15	0.01	0.14	40	2900	14.15	08°05'00"	34°39'08"
275	45.00	2.66	0.30	0.09	4.30	43.26	0.23	0.01	0.13	30	2500	10.06	07°57'00"	34°36'00"
276	54.00	1.23	0.20	0.11	3.15	47.04	0.17	0.01	0.13	30	3100	14.93	07°57'00"	34°32'03"

Tabela 4. Dados geoquímicos da plataforma continental nordeste do Brasil (Freire, 1985)

sample	depth (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn (ppm)	Sr (ppm)	CaO/MgO	Lat S	Long W
240	10	57.30	0.64	0.07	0.31	13.40	0.41	0.05	0.06	80	2940	43.23	03°48'05"	38°51'06"
241	10	6.60	0.13	0.02	2.00	33.90	0.11	0.02	0.10	48	3600	16.95	03°46'08"	38°48'09"
208	10	3.10	0.29	0.30	3.10	32.80	0.06	0.05	0.16	190	1570	10.58	03°32'05"	38°59'02"
209	10	2.30	0.05	0.02	2.50	35.00	0.04	0.02	0.14	73	2640	14.00	03°33'09"	38°81'07"
197	15	80.70	0.85	0.08	0.43	5.00	0.36	0.04	0.03	140	370	11.63	03°44'07"	38°19'02"
67	18	2.50	0.09	0.06	3.10	33.00	0.10	0.02	0.11	58	2100	10.65	02°33'00"	40°37'09"
58	19	0.51	0.06	0.07	3.00	34.80	0.04	0.01	0.12	65	2650	11.60	02°34'00"	40°52'09"
35	20	77.20	0.42	0.13	0.36	6.80	0.27	0.04	0.07	48	330	18.89	02°24'02"	40°37'07"
279	20	49.30	0.50	0.07	1.00	16.10	0.38	0.06	0.08	180	1100	16.10	04°10'09"	37°40'03"
59	20	0.07	0.07	0.10	3.10	34.30	0.04	0.01	0.13	84	1750	11.06	02°33'09"	40°52'00"
235	22	86.40	0.61	0.10	0.08	3.20	0.39	0.13	0.01	130	630	40.00	03°55'04"	38°01'00"
93	22	1.60	0.07	0.12	2.60	34.80	0.04	0.02	0.12	90	1680	13.38	02°31'06"	40°16'08"
247	22	42.10	0.50	0.04	0.56	19.80	0.41	0.03	0.09	58	3500	35.36	03°55'06"	37°55'05"
108	22	0.97	0.09	0.14	3.50	33.70	0.04	0.02	0.15	83	1760	9.63	02°35'09"	39°52'00"
91	23	57.50	0.66	0.18	0.84	12.40	0.53	0.06	0.10	76	1050	14.76	02°26'00"	40°17'02"
214	23	90.30	0.56	0.07	0.30	1.90	0.32	0.07	0.01	100	210	6.33	03°47'01"	38°11'06"
199	25	91.20	0.56	0.09	0.15	1.50	0.37	0.09	0.11	74	240	10.00	03°43'06"	38°16'00"
2	25	74.50	0.87	0.01	0.28	6.80	0.57	0.14	0.60	145	860	24.29	03°35'05"	38°28'00"
10	25	91.20	0.98	0.11	0.09	0.86	0.57	0.06	0.06	73	160	9.56	03°25'07"	38°42'00"
76	25	51.40	0.29	0.11	0.90	16.40	0.13	0.01	0.09	42	1360	18.22	02°25'06"	40°33'02"
51	25	0.83	0.06	0.04	2.30	35.60	0.04	0.01	0.13	40	2190	15.48	02°25'04"	40°59'05"
157	25	59.90	1.69	0.46	0.84	9.10	0.90	0.19	0.07	190	840	10.83	03°23'02"	38°48'02"
264	27	84.20	0.71	0.06	0.26	3.80	0.41	0.06	0.02	120	520	14.62	04°05'06"	37°49'04"
262	28	5.10	0.09	0.02	0.57	36.40	0.06	0.02	0.08	25	6310	63.86	04°01'09"	37°48'04"
75	30	0.85	0.07	0.06	3.60	33.60	0.04	0.02	0.11	76	2300	9.33	02°26'00"	40°33'04"
77	30	0.82	0.08	0.05	3.50	33.20	0.05	0.02	0.10	31	2650	9.49	02°22'08"	40°32'04"
135	30	53.20	0.53	0.21	1.30	15.10	0.39	0.07	0.09	160	850	11.62	02°56'00"	39°26'00"
182	30	76.20	0.56	0.05	0.27	6.90	0.45	0.05	0.03	48	1330	25.56	03°34'01"	38°14'05"

Tabela 4. Continuação

276	30	81.60	0.74	0.11	0.28	4.40	0.49	0.15	0.03	210	600	15.71	04°05'03"	37°43'01"
277	30	82.30	0.66	0.07	0.26	4.60	0.45	0.05	0.02	94	640	17.69	04°05'09"	37°43'09"
155	30	85.80	1.06	0.13	0.14	2.50	0.70	0.13	0.02	83	219	17.86	03°13'03"	38°48'05"
148	30	75.70	0.82	0.11	0.50	6.10	0.57	0.03	0.04	62	420	12.20	03°19'01"	38°49'08"
237	30	87.50	0.64	0.07	0.17	2.60	0.45	0.07	0.02	90	420	15.29	03°52'00"	37°56'01"
251	30	37.40	0.29	0.04	1.20	21.40	0.23	0.02	0.10	28	2370	17.83	03°53'09"	37°47'00"
272	30	82.70	0.71	0.05	0.26	4.30	0.53	0.03	0.03	120	480	16.54	03°59'04"	37°38'09"
283	30	1.00	0.04	0.02	3.20	33.90	0.04	0.02	0.14	15	2540	10.59	04°12'00"	37°33'04"
289	30	31.30	0.34	0.02	0.48	24.00	0.30	0.02	0.10	32	4650	50.00	04°16'05"	37°25'02"
274	33	34.80	0.48	0.05	0.35	21.80	0.37	0.04	0.09	32	4640	62.29	04°01'01"	37°40'00"
159	33	67.30	0.42	0.06	0.59	10.60	0.34	0.03	0.06	10	1030	17.97	03°20'03"	38°41'07"
246	33	59.00	0.69	0.07	0.24	12.80	0.49	0.06	0.05	120	3460	53.33	03°51'01"	37°53'04"
255	35	28.50	0.32	0.06	1.40	25.10	0.23	0.04	0.13	170	2250	17.93	03°49'04"	37°40'08"
97	35	50.20	0.50	0.18	1.30	15.70	0.36	0.04	0.11	150	850	12.08	02°24'00"	40°03'01"
165	35	88.50	0.64	0.08	0.16	2.40	0.49	0.08	0.02	62	300	15.00	03°26'07"	38°29'07"
167	35	90.80	0.71	0.08	0.13	1.30	0.45	0.07	0.02	52	220	10.00	03°29'07"	38°22'08"
218	35	91.50	0.64	0.05	0.04	1.40	0.49	0.05	0.02	54	250	35.00	03°45'05"	38°02'00"
23	36	1.00	0.08	0.08	3.70	33.50	0.04	0.15	0.13	85	2450	9.05	02°49'04"	39°26'00"
28	36	0.52	0.06	0.04	2.90	34.60	0.04	0.01	0.13	53	2100	11.93	02°30'07"	39°51'04"
106	37	0.38	0.05	0.02	3.90	33.40	0.07	0.01	0.12	32	1850	8.56	02°25'00"	39°51'00"
121	37	3.30	0.14	0.08	3.30	33.10	0.05	0.03	0.13	100	2500	10.03	02°42'02"	39°36'00"
136	38	52.10	0.48	0.25	1.20	15.80	0.32	0.04	0.10	150	940	13.17	02°55'00"	39°20'04"
4	38	8.50	0.09	0.03	0.26	32.00	0.14	0.01	0.11	10	5310	123.08	03°23'07"	38°24'00"
33	38	79.00	0.82	0.13	0.32	5.40	0.53	0.05	0.09	78	360	16.88	02°20'00"	40°31'03"
110	38	0.75	0.07	0.04	3.70	33.60	0.04	0.02	0.15	40	1880	9.08	02°30'06"	39°47'00"
47	38	0.76	0.06	0.04	2.10	35.70	0.04	0.01	0.12	26	2400	17.00	02°21'08"	41°00'03"
98	40	52.40	0.40	0.13	0.84	16.10	0.28	0.01	0.08	120	1550	19.17	02°18'05"	40°02'02"
132	40	65.30	0.50	0.04	0.84	11.20	0.37	0.01	0.06	52	670	13.33	02°44'03"	39°19'00"
133	40	64.70	0.37	0.10	0.78	11.30	0.18	0.04	0.07	120	820	14.49	02°48'07"	39°21'02"

Tabela 4. Continuação

137	40	58.00	0.45	0.09	1.10	14.20	0.27	0.02	0.08	130	880	12.91	02°53'00"	39°15'06"
160	40	24.80	0.18	0.07	1.90	25.80	0.16	0.03	0.13	34	1840	13.58	03°17'08"	38°30'00"
212	40	92.60	0.56	0.07	0.14	0.86	0.41	0.07	0.01	150	200	6.14	03°41'05"	38°08'00"
216	40	91.30	0.64	0.07	0.11	1.40	0.45	0.07	0.01	60	310	12.73	03°49'04"	38°07'03"
222	40	76.80	0.90	0.07	0.26	6.00	0.70	0.04	0.03	150	990	23.08	03°41'01"	37°55'03"
292	40	71.80	0.74	0.07	0.32	8.50	0.57	0.04	0.04	130	1590	26.56	04°07'07"	37°35'04"
293	40	21.30	0.56	0.07	0.72	21.30	0.45	0.05	0.10	90	3870	29.58	04°06'00"	37°37'09"
336	43	2.00	0.05	0.02	1.30	37.20	0.04	0.02	0.09	21	4100	28.62	04°37'08"	37°09'05"
146	45	86.80	0.85	0.12	0.23	2.60	0.49	0.04	0.02	92	240	11.30	03°13'07"	38°53'08"
204	45	89.90	0.82	0.08	0.11	1.60	0.53	0.05	0.01	120	210	14.55	03°38'02"	38°05'04"
269	50	86.20	0.79	0.06	0.13	2.50	0.60	0.06	0.02	43	270	19.23	03°56'02"	37°39'05"
161	50	20.90	0.45	0.07	1.50	27.43	0.35	0.05	0.13	64	2600	18.29	03°15'02"	38°33'09"
221	50	88.70	0.58	0.07	0.26	2.30	0.45	0.04	0.01	69	230	8.85	03°43'00"	37°58'02"
166	50	91.10	0.74	0.09	0.08	1.10	0.53	0.06	0.02	50	230	13.75	03°25'05"	38°22'07"
168	55	70.80	0.82	0.08	0.41	7.90	0.66	0.06	0.04	86	1120	19.27	03°29'03"	38°12'05"
45	58	0.52	0.05	0.03	2.40	35.50	0.04	0.01	0.13	23	2090	14.79	02°18'08"	41°00'02"
192	60	85.70	0.79	0.07	0.23	3.00	0.62	0.04	0.02	100	320	13.04	03°35'02"	38°09'08"
8	60	92.20	0.77	0.07	0.06	0.65	0.49	0.06	0.12	62	170	10.83	03°18'08"	38°30'06"
211	60	88.50	0.74	0.05	0.05	2.40	0.57	0.03	0.01	33	430	48.00	03°37'03"	38°05'09"
21	60	13.50	0.34	0.14	2.80	28.60	0.13	0.06	0.13	130	2740	10.21	02°56'08"	39°13'03"
119	60	7.00	0.11	0.02	2.94	31.60	0.14	0.02	0.17	52	2420	10.75	02°30'05"	39°31'00"
164	60	25.00	0.32	0.08	1.40	26.70	0.27	0.06	0.13	86	2250	19.07	03°20'07"	38°29'04"
163	65	3.10	0.08	0.05	1.90	35.80	0.05	0.02	0.14	65	2900	18.84	03°15'03"	38°29'03"
43	70	2.90	0.08	0.04	1.80	35.40	0.04	0.02	0.13	60	1850	19.67	02°07'04"	40°59'07"
18	80	3.10	0.08	0.04	1.10	35.00	0.09	0.01	0.14	50	1810	31.82	03°00'00"	38°54'02"
127	80	12.40	0.16	0.04	2.60	28.90	0.18	0.04	0.34	180	1630	11.12	02°37'01"	39°13'07"
340	80	9.50	0.12	0.02	3.20	30.80	0.16	0.02	0.10	52	2000	9.63	04°25'08"	37°02'02"
104	100	5.30	0.08	0.01	1.40	35.30	0.05	0.02	0.13	47	3600	25.21	02°13'07"	39°50'00"
128	100	7.10	0.08	0.02	3.00	32.00	0.05	0.02	0.17	81	1900	10.67	02°38'02"	39°15'08"
185	100	22.70	0.17	0.04	1.30	27.60	0.13	0.02	0.13	44	2570	21.23	03°30'07"	38°07'07"

Tabela 4. Continuação

223	100	0.39	0.03	0.02	2.80	35.00	0.04	0.01	0.13	34	2670	12.50	03°39'00"	37°51'06"
319	100	0.27	0.02	0.01	2.00	36.40	0.04	0.02	0.10	24	3610	18.20	04°11'02"	37°28'03"
339	100	27.40	0.50	0.07	1.70	24.50	0.37	0.04	0.12	150	4100	14.41	04°28'09"	37°04'01"
14	200	22.10	0.53	0.11	0.96	27.40	0.34	0.04	0.17	88	1960	28.54	03°08'08"	38°39'00"
16	200	25.10	0.42	0.05	1.10	26.90	0.28	0.02	0.19	40	2370	24.45	03°03'00"	38°46'05"
40	200	4.40	0.09	0.06	2.40	34.40	0.04	0.01	0.14	41	1820	14.33	02°06'00"	40°44'06"
42	200	45.70	0.66	0.24	0.72	17.80	0.36	0.06	0.10	100	1370	24.72	02°04'08"	40°55'03"
44	200	46.50	0.26	0.09	0.78	18.20	0.14	0.02	0.12	34	1000	23.33	02°13'02"	40°00'00"
84	200	5.90	0.29	0.12	1.80	33.80	0.08	0.04	0.18	75	2530	18.78	02°06'07"	40°24'02"
85	200	63.30	0.98	0.19	0.54	10.20	0.70	0.12	0.09	180	780	18.89	02°06'08"	40°23'02"
99	200	4.60	0.11	0.02	1.70	3.10	0.06	0.02	0.15	58	3090	1.82	02°13'05"	40°01'04"
101	200	0.49	0.03	0.01	2.00	35.90	0.04	0.01	0.12	43	2850	17.95	02°09'04"	39°56'02"
103	200	0.52	0.03	0.02	2.30	35.60	0.04	0.01	0.13	42	2520	15.48	02°11'00"	39°51'00"
113	200	1.30	0.03	0.01	2.80	34.70	0.04	0.01	0.15	64	2010	12.39	02°19'06"	39°39'07"
115	200	87.30	0.66	0.08	0.24	3.00	0.35	0.07	0.02	80	240	12.50	02°18'00"	39°34'06"
118	200	22.10	0.18	0.02	2.70	26.50	0.08	0.02	0.13	120	1800	9.81	02°26'03"	39°29'04"
126	200	41.20	0.79	0.09	0.90	17.00	0.78	0.04	0.15	110	1040	18.89	02°32'02"	39°20'01"
139	200	0.57	0.05	0.02	2.50	35.40	0.04	0.02	0.12	10	2800	14.16	02°49'08"	39°07'02"
141	200	0.50	0.03	0.01	2.30	35.80	0.04	0.01	0.12	63	2780	15.57	02°52'02"	39°00'05"
143	200	28.50	0.40	0.14	1.50	24.50	0.21	0.04	0.13	160	1560	16.33	02°56'07"	38°56'05"
150	200	75.70	1.01	0.07	0.42	6.00	0.70	0.03	0.06	75	490	14.29	03°05'09"	38°44'05"
152	200	89.20	0.61	0.07	0.23	2.00	0.37	0.04	0.37	50	170	8.70	03°08'05"	38°45'04"
170	200	3.00	0.05	0.02	1.90	35.80	0.46	0.01	0.11	39	3460	18.84	03°28'07"	38°04'05"
186	200	0.16	0.02	0.02	2.40	35.80	0.04	0.01	0.12	13	2830	14.92	03°28'07"	38°04'02"
225	200	3.20	0.06	0.02	2.00	35.30	0.04	0.01	0.10	50	3350	17.65	03°40'07"	37°49'08"
242	200	89.30	0.95	0.07	0.11	1.60	0.70	0.06	0.02	110	280	14.55	03°45'06"	37°46'07"
297	200	38.50	0.34	0.03	1.10	20.90	0.27	0.01	0.08	150	2470	19.00	04°01'09"	37°34'02"

Tabela 4. Continuação

301	200	23.90	0.17	0.02	1.20	26.30	0.16	0.02	0.12	35	4160	21.92	04°07'09"	37°27'07"
303	200	22.40	0.23	0.02	1.30	28.60	0.13	0.02	0.07	90	2720	22.00	04°12'09"	37°22'07"
306	200	40.60	0.40	0.04	1.40	20.10	0.34	0.02	0.09	110	1530	14.36	04°10'04"	37°17'09"
309	200	0.61	0.02	0.01	2.00	36.10	0.04	0.02	0.09	18	3500	18.05	04°04'02"	37°24'05"
310	200	5.80	0.14	0.02	1.30	35.70	0.08	0.03	0.09	60	4160	27.46	04°00'06"	37°28'04"
311	200	0.27	0.02	0.01	1.70	36.60	0.04	0.01	0.09	19	4230	21.53	03°58'05"	37°31'02"
312	200	0.47	0.02	0.01	2.30	35.60	0.08	0.01	0.13	28	3450	15.48	03°56'07"	37°32'04"
316	200	3.30	0.09	0.02	1.90	36.10	0.05	0.02	0.12	130	2510	19.00	04°03'04"	37°31'08"
333	200	10.30	0.10	0.02	1.40	32.80	0.07	0.02	0.07	80	3000	23.43	04°16'08"	37°10'05"
347	200	0.99	0.06	0.03	3.60	33.40	0.05	0.02	0.09	72	2490	9.28	04°31'07"	36°56'07"

Tabela 5. Amostras cedidas pelo LGMA

Sample	Depth (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	PF	CaOMgO	Lat (S)	Long (W)
Vh03157	10	68,68	3,00	2,62	1,61	8,46	0,23	2,81	0,04	549	820	10,98	5,25	05°45'12"	35°11'12"
Vh03146	15	1,05	0,31	0,16	6,89	43,30	0,04	0,19	0,06	46	2629	45,77	6,28	04°52'06"	36°22'48"
Rev88	18	0,00	0,00	0,03	5,97	48,39	0,01	0,03	0,07	16	3052	46,92	8,11	04°36'00"	37°14'24"
Vh03147	20	88,31	1,88	0,62	1,02	2,87	0,17	0,56	0,00	158	183	3,1	2,81	04°44'30"	36°19'12"
Rev74	20	25,61	0,65	0,05	3,90	34,56	0,18	0,04	0,05	16	3287	35,14	8,86	04°56'24"	35°19'30"
Vh03166	20	5,79	0,36	0,07	3,26	45,52	0,10	0,03	0,07	5	5301	43,58	13,96	06°45'12"	34°54'30"
G2 96	21	3,20	0,33	0,31	5,90	46,63	0,05	0,01	0,11	30	2940	43,57	7,90	02°29'05"	40°04'00"
Vh03171	23	14,63	0,38	0,08	3,90	41,11	0,04	0,02	0,07	18	3588	39,51	10,54	06°51'48"	34°46'30"
G2 95	25	9,27	0,60	0,37	5,50	42,85	0,23	0,01	0,10	31	2626	40,95	7,79	02°30'06"	40°07'00"
G1 32	25	70,18	3,17	0,47	1,74	12,11	0,90	0,23	0,03	90	1318	13,09	6,96	02°17'00"	40°27'30"
G2 71	25	8,53	0,50	0,29	5,42	43,85	0,14	0,02	0,10	36	2611	41,4	8,09	02°31'05"	40°35'00"
G2 27	25	12,43	1,39	0,33	4,31	40,56	0,35	0,08	0,09	40	3717	40,52	9,41	02°33'05"	39°47'03"
Rev12	25	87,78	1,97	0,25	1,04	3,52	0,22	0,28	0,00	51	217	4,85	3,38	03°52'48"	37°43'12"
G1 12	25	7,61	0,25	0,05	3,67	45,38	0,07	0,02	0,10	17	4086	42,51	12,37	03°36'30"	38°17'30"
G2 108	28	1,23	0,31	0,34	5,54	48,48	0,03	0,01	0,12	29	2689	44,6	8,75	02°35'09"	39°52'00"
Rev95	30	0,12	0,00	0,01	2,78	50,62	0,03	0,01	0,07	5	6482	45,93	18,21	03°17'24"	38°00'00"
Vh03134	30	0,67	0,21	0,07	3,86	49,17	0,04	0,02	0,08	14	5200	45,7	12,74	04°48'30"	36°37'42"
6	35	0,00	0,00	0,03	5,44	49,13	0,00	0,00	0,08	11	3611	45,34	9,03	02°18'00"	41°39'36"
90	35	0,00	0,00	0,02	4,52	50,88	0,00	0,03	0,08	18	4349	45,41	11,26	03°28'48"	38°04'48"
G1 31	35	61,05	2,32	0,96	2,21	16,55	0,56	0,12	0,06	111	1550	18,03	7,49	02°15'00"	40°30'30"
13	35	61,41	2,81	1,83	2,29	15,69	0,75	0,18	0,06	98	1226	16,73	6,85	04°15'00"	36°39'36"
Rev42	35	66,86	2,21	0,18	1,09	14,53	0,68	0,13	0,01	50	3326	16,19	13,33	09°06'00"	34°33'36"
89	35	0,39	0,01	0,02	2,78	50,13	0,05	0,01	0,08	16	6060	45,94	18,03	03°28'48"	38°04'48"
Rev90	35	0,05	0,05	0,04	3,52	50,58	0,00	0,00	0,08	12	4735	45,45	14,37	03°28'48"	38°04'48"

Tabela 5. Amostras cedidas pelo LGMA- continuação

Sample	Depth (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	Loi	CaOMgO	Lat (S)	Long (W)
Rev121	35	16,83	1,83	1,55	3,41	36,59	0,28	0,11	0,12	71	3063	38,67	10,73	06°48'00"	34°39'36"
Rev72	35	63,70	2,90	0,59	1,58	14,97	0,76	0,08	0,01	53	2981	16,16	9,47	03°49'48"	37°22'12"
G 111	38	7,60	0,41	0,15	4,04	42,07	0,11	0,23	0,11	51	3174	42,49	10,41	03°54'30"	37°35'00"
Rev52	40	0,00	0,00	0,00	4,48	50,06	0,01	0,00	0,06	5	5133	45,72	11,17	05°18'00"	35°24'24"
G 46	40	0,60	0,16	0,16	5,68	49,08	0,00	0,00	0,11	14	2801	44,86	8,64	02°57'30"	39°16'30"
Rev75	40	0,15	0,01	0,04	5,47	46,21	0,30	0,00	0,07	15	3839	47,27	8,45	03°16'30"	35°06'00"
Rev41	43	0,33	0,03	0,02	3,11	50,42	0,01	0,00	0,07	16	4710	44,87	16,21	09°04'48"	35°01'12"
Rev39	55	70,31	2,75	0,15	1,72	12,20	0,73	0,04	0,02	29	2161	13,83	7,09	07°28'48"	34°46'48"
Rev48	60	0,03	0,00	0,03	3,19	51,19	0,00	0,00	0,08	18	3165	45,46	16,05	03°20'24"	38°40'12"
Rev94	60	0,15	0,00	0,07	4,98	48,19	0,12	0,03	0,12	16	3936	47,74	9,68	02°18'00"	41°27'36"
VH3115	60	4,60	0,35	0,05	4,78	46,21	0,14	0,01	0,08	9	3200	43,65	9,67	04°15'00"	37°24'30"
94	60	0,58	0,06	0,05	4,45	46,28	0,12	0,02	0,10	30	4314	47,43	10,40	02°18'00"	41°27'36"
VH3137	60	2,50	0,45	0,14	3,81	48,13	0,09	0,03	0,10	20	4051	44,8	12,63	04°40'00"	36°34'42"
Rev45	60	6,59	0,46	0,32	5,18	44,00	0,09	0,04	0,09	43	2882	43,44	8,49	10°36'00"	36°24'00"
VH3153	60	7,83	1,07	1,17	3,85	43,57	0,19	0,06	0,17	76	3063	41,52	11,32	05°46'00"	35°00'30"
Rev84	80	0,37	0,02	0,02	5,72	48,26	0,00	0,00	0,08	10	3120	45,79	8,44	03°39'36"	38°00'00"
Rev11	80	0,05	0,00	0,03	4,78	49,20	0,00	0,02	0,10	18	3890	46,78	10,29	03°01'48"	38°46'12"
VH3126	80	3,46	0,62	0,15	3,11	46,20	0,12	0,03	0,08	22	3888	43,85	14,86	04°34'42"	36°53'24"
VH3162	80	3,90	1,76	0,79	4,33	44,26	0,13	0,08	0,10	73	3816	44,03	10,22	06°39'42"	34°43'18"

3.3 Terceiro artigo. Aceito para publicação em International Geology Review

ANTIGAS LINHAS DE COSTA NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ - NE BRASIL. EVIDÊNCIAS POR GEOQUÍMICA E ISÓTOPOS DE CARBONO E OXIGÊNIO

Wanessa Sousa Marques¹, Alcides Nobrega Sial¹, Eldemar de Albuquerque Menor¹, Valderéz Pinto Ferreira¹, George Satander Sá Freire², Enjolras de Albuquerque Medeiros Lima³, Roberto Lúcio Belo de Souza¹ e Valdir do Amaral Vaz Manso¹

1- NEG-LABISE, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, C.P. 7852, Recife, Pernambuco, Brazil, 50670-000, Brazil; wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br, menor@terra.com.br, valderéz@ufpe.br, vazmanso@uol.com.br, laplace2@gmail.com

2- DEGEO, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, C.P. 6011, Fortaleza, Ceará. 60455-970, Brazil; freire@ufc.br

3- Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Av. Sul, 2291, Afogados, Recife, PE, Brazil, 50770-011; enjolras@re.cprm.gov.br

RESUMO

Sedimentos da plataforma continental do Estado do Ceará, nordeste do Brasil, foram estudados no sentido de evidenciar diagênese meteórica em sedimentos marinhos de antigas linhas de costa, definidas previamente. Foram analisados os óxidos principais de 131 amostras de sedimentos carbonáticos por fluorescência de Raios X, e 51 análises de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ realizadas a partir de carapaças de foraminíferos bentônicos das espécies *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*. Assinaturas geoquímicas específicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, e resultados de análises químicas de SiO_2 (estequiometricamente calculado como % de quartzo), Sr e Mn, permitiram evidenciar diagênese meteórica em sedimentos totais nas profundidades atuais de 25-30m, 45m e 80m da plataforma continental. Essas profundidades correspondem, dentre algumas outras, a morfologias de fundo da plataforma marinha previamente interpretadas como antigas linhas de costa, a partir de perfis batimétricos. Apesar de certa cobertura de sedimentação mais recente, foi possível confirmar que essas regiões possuem material detrítico reliquial, biogênico e continental, como resultado do retrabalhamento erosivo em antigas linhas de costa, durante a transgressão Flandriana.

PALAVRAS CHAVE: Diagênese meteórica, carbonatos biogênicos, isótopos de carbono e oxigênio, sedimentos relíquia, Tansgressão flandriana.

INTRODUÇÃO

Mudanças diagenéticas em carbonatos biogênicos são acompanhadas, em geral, pelo aumento da maturidade textural, e mudanças na composição química Hodgson (1966), Brand & Veizer (1981), Cícero & Lohmann (2001).

As mudanças na composição química são derivadas do mecanismo de dissolução-reprecipitação em meio aquoso, e os fatores que mais interferem na redistribuição das espécies químicas nos carbonatos são: 1) a estabilidade da fase carbonática original; 2) o grau de interação entre carbonato e água (sistema fechado, semi-fechado ou aberto); 3) diferenças nas composições químicas entre água do mar e água meteórica; 4) temperatura e salinidade do ambiente, e efeitos vitais das espécies.

Apesar da influência de todos esses fatores, a tendência geral no comportamento químico dos carbonatos biogênicos, quando afetados por diagênese meteórica, aponta aumento nos teores de ferro e manganês, e diminuição nos teores de estrôncio e sódio Brand & Veizer (1981).

Isotopicamente, ocorre diminuição nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ Brand & Veizer (op. cit.), Nagarajan et al. (2008).

Valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ permanecem positivamente correlacionados e em sedimentos carbonáticos, essas características isotópicas sugerem superfícies de exposição subaérea Allan & Matthews (1982).

Valores de Manganês e $\delta^{18}\text{O}$, no geral, mostram comportamentos inversamente proporcionais em amostras de carbonatos alterados por diagênese meteórica. Isto acontece porque, freqüentemente, águas meteóricas são ricas em manganês pedogênico e sempre empobrecidas em $\delta^{18}\text{O}$ Li et al. (2007).

Valores de estrôncio e manganês são considerados bons indicadores de diagênese meteórica em carbonatos. Durante as mudanças químicas que ocorrem ao longo da estabilização diagenética, valores de manganês tendem a aumentar, e valores de estrôncio tendem a diminuir (Brand & Veizer, 1981).

A plataforma continental do nordeste do Brasil possui antigas linhas de costa (Manso et al. 1997). Essas antigas linhas de costa foram construídas durante a Transgressão Flandriana, e nelas ocorrem sedimentos relíquia, depositados em zonas de mistura entre águas marinhas e meteóricas Freire (1985).

Os sedimentos relíquia apresentam grãos de quartzo retrabalhados e com manchas ferruginosas na superfície França et al. (1976).

Desse modo, antigas linhas de costa podem ser deduzidas em plataforma continental a partir de valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, juntamente com as características texturais

dos sedimentos de fundo, incluindo seus teores de manganês, estrôncio e ferro, e características morfológicas de fundo. O objetivo deste trabalho é a detecção de antigas linhas de costa na plataforma continental do Ceará, através da geoquímica de sedimentos totais, juntamente com indicações morfológicas de fundo obtidas em trabalhos anteriores.

ÁREA DE ESTUDO

A plataforma continental do estado do Ceará (Figura 1) é rasa, tem reduzida largura (60-80 km), pequeno gradiente (cerca de 1m/km, em média), águas quentes (25-30°C), e elevada salinidade: 30-38‰ Coutinho (1992), Behling et al.,2000; Summerhayes *et al.*,1975).

Sua morfologia inclui rupturas múltiplas em degraus, que correspondem a antigas linhas de costa, e este modelado está intimamente ligado às oscilações do nível do mar, ocorridas desde o último período glacial, pertencentes à Transgressão Flandriana (Freire, *op.cit.*). Conforme Allen (2000), Dabrio *et al.*, (2000), Angulo *et al.*, (2006), Caldas *et al.*, (2006) e Martin *et. al.*, (2007) esta transgressão teria evoluído de forma lenta e contínua, porém incluindo alguns avanços por pulsos transgressivos.

Na plataforma continental do Ceará, esses degraus estão mais destacados nas profundidades de 80 metros, entre 40 e 50 metros, e entre 20 e 35 metros (Freire, *op.cit.*).

Os sedimentos plataformais são constituídos por areias e cascalhos carbonáticos formados *in situ* e, em menor proporção, por clásticos terrígenos de proveniência continental e por sedimentos relíquia.

A fração carbonática (CaCO_3 >75%) é predominante após os 20 metros na plataforma média e externa, sendo composta principalmente por Lithothamnium, Halimeda, foraminíferos bentônicos e planctônicos, e moluscos (Coutinho,1992; Behling *et al.*, 2000; França *et al.*,1976).

Sedimentos relíquia são encontrados em maiores quantidades na plataforma externa, após os 40 metros de profundidade, e mostram como característica principal um retrabalhamento textural.

A fração terrígena inclui grãos de quartzo subarredondados com superfície brilhante, algumas vezes fosca ou picotada, por vezes com capeamento ou preenchimento de fraturas por óxido de ferro (Freire, *op.cit.*).

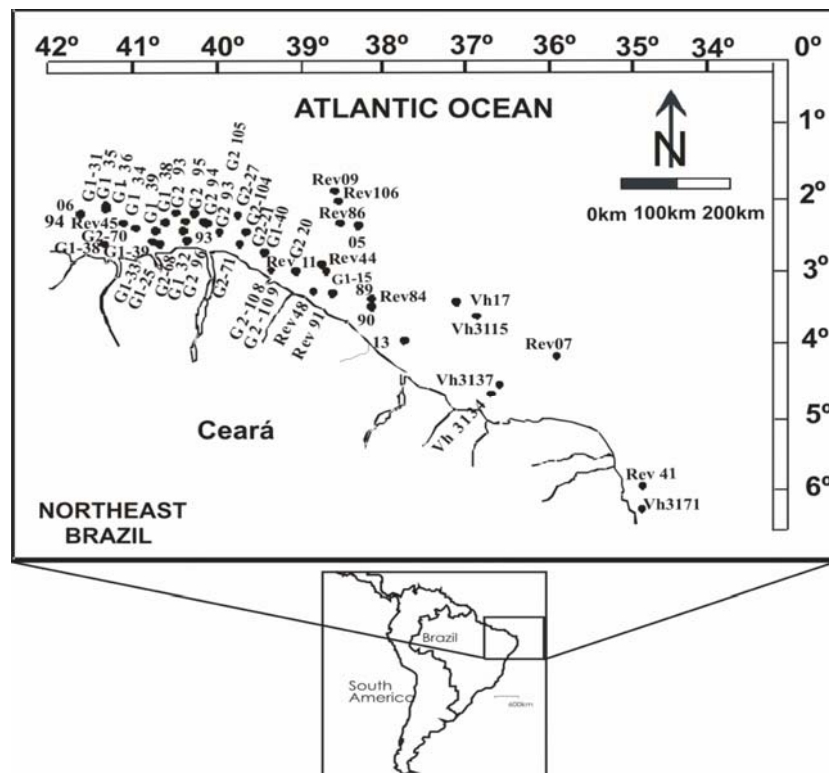


FIGURA 1. Localização da área de estudo e das amostras analisadas para isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$.

MÉTODOS

A amostragem é constituída de 131 pontos coletados de sedimentos da plataforma continental do Ceará. Foram aproveitados os dados de Freire (1985) de análises químicas realizadas por fluorescência de raios X, no Laboratório de Análises Mineraias da SUDENE. Foram também analisados sedimentos doados pelo Laboratório de Geologia Marinha (LGMA) da Universidade Federal do Ceará.

A coleta de todos os sedimentos foi realizada com dragas oceanográficas, durante as operações GEOMAR XVIII (novembro, 1981) e GEOMAR XXI (novembro, 1983), a bordo do navio oceanográfico Almirante Câmara, da Marinha do Brasil. Todas as amostras foram lavadas, secas em CNTP e acondicionadas em recipientes plásticos. Para as amostras doadas pelo LGMA, os procedimentos analíticos iniciais consistiram de homogeneização, quarteamento, e retirada de uma alíquota para pulverização em almofariz de porcelana, 100% passante em peneira de 100 mesh. Dessa alíquota foram separadas 5g para análises químicas por fluorescência de Raios X (XRF), no Laboratório de Isótopos Estáveis-LABISE, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Em seguida, as amostras pulverizadas foram previamente secas a 110°C durante 6 horas, e em seguida calcinadas a 1000°C durante 2 horas em mufla, para a determinação

de perda ao fogo. A partir de cada amostra calcinada foi feita uma pérola fundida, utilizando-se tetraborato de lítio como fundente.

Os resultados analíticos foram produzidos com a utilização de um espectrômetro FRD Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, pelo método de curvas de calibração preparadas com materiais de referência internacional. 30 análises de difratometria de raios X (XRD) de sedimentos totais foram realizadas, utilizando-se um equipamento Siemens D5000, com emissão $KCu\alpha$, varredura de 2 a 45θ , sob velocidade de varredura de $1\theta/\text{min}$. Para esses dados, foram selecionadas duas amostras nos seguintes níveis batimétricos: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80 metros.

As concentrações de Mg em calcitas foram calculadas a partir de XRD, conforme indicações de Goldsmith & Graf, (1958), utilizando-se as posições ($l=100$) de quartzo de baixa temperatura (low quartz) (3.34\AA) ou de aragonita (3.396\AA) para correção de “drift”, e leitura corrigida do pico de calcita com baixo magnésio (low Mg-calcite) ou de calcita com alto magnésio (high Mg-calcite).

Para as análises isotópicas, foram separadas 4 mg de testas de foraminíferos bentônicos das espécies *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*, de 51 amostras distintas da plataforma. Cada amostra foi levada a reagir com ácido ortofosfórico durante 12 horas, a 25°C .

O dióxido de carbono liberado desta reação foi extraído em uma linha de extração a vácuo, criogenicamente limpa, seguindo o método de Craig, (1957). O CO_2 foi então analisado quanto aos isótopos estáveis de carbono e oxigênio em um espectrômetro de massa SIRA II, no Laboratório de isótopos estáveis (LABISE), do Departamento de Geologia /UFPE. As composições isotópicas foram contrastadas com o padrão Borborema skarn calcite (BSC), com precisão analítica de 0,1‰, baseado em múltiplas análises desse padrão interno.

Os resultados são reportados em notação ‰_{PDB}.

Os dados de quartzo ou sílica livre foram calculados a partir de composições médias de caulinitas, segundo indicações de Weaver & Pollard, (1973), considerando-se que este é o argilomineral largamente dominante nos solos de regiões costeiras do nordeste do Brasil (Summerhayes *et al.*, 1975).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ e de porcentagem de quartzo foram calculados segundo as médias, incluindo dados com valores de dois metros acima e dois metros abaixo em relação à profundidade considerada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presença de quartzo em sedimentos plataformais é derivada fundamentalmente da dispersão mecânica deste mineral através das plumas fluviais, ou da abrasão de águas marinhas diretamente sobre a costa, sendo a contribuição eólica habitualmente acessória.

Embora a dispersão mecânica possa alcançar grandes distâncias, sua origem pode ser bem definida por análise morfooscópica dos grãos Timireva & Velichko, (2006). Normalmente, a concentração e as dimensões de grãos de quartzo nos sedimentos plataformais decaem rapidamente no sentido do oceano.

Entretanto, na plataforma continental do estado do Ceará, que possui baixa declividade, areias quartzosas (quartzo ou $\Delta\text{SiO}_2 \geq 80\%$) são constatadas aos 25m e 45m de profundidade (Figura 2), coincidindo com os marcos geomorfológicos destacados por Freire (1985).

Após os 25 metros, a presença de quartzo diminui rapidamente, consideradas as amostras quimicamente analisadas nesse trabalho.

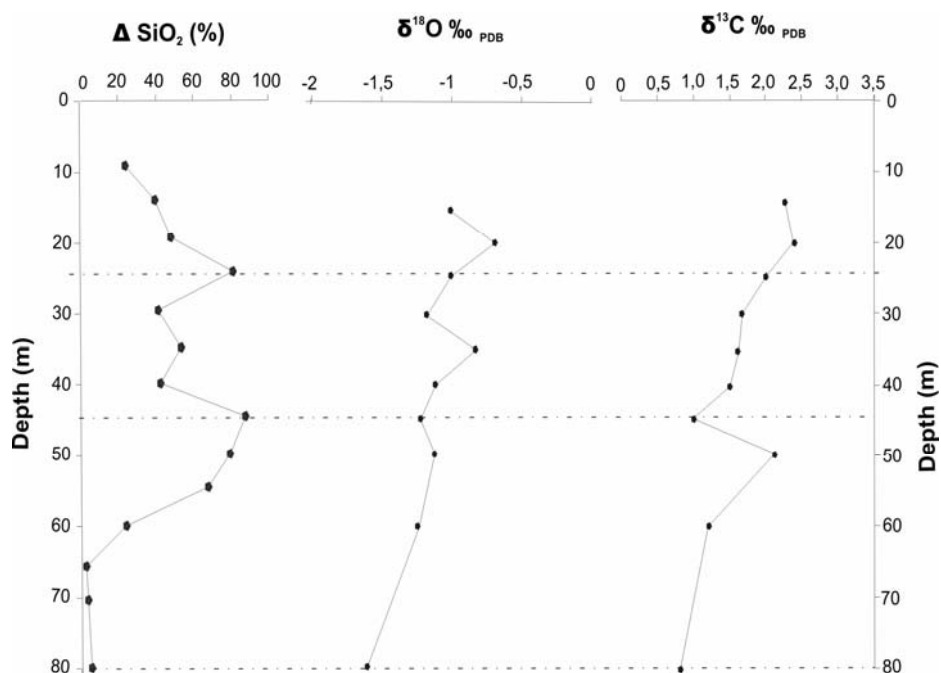


FIGURA 2. Valores de ΔSiO_2 (% de quartzo), $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ nos sedimentos de acordo com a profundidade.

Após 65 metros a presença de quartzo é meramente acessória (<2%), passando a 3% aos 80 metros. Nessa parte externa da plataforma, a presença do quartzo corresponde principalmente à contribuição biogênica de espículas de organismos silicosos sedimentadas no assoalho submarino (Figura 3), assim como a grãos trazidos pelo vento (Figura 4).

A dificuldade de se localizar registros sedimentares relacionados a marcos geomorfológicos de linhas de costa mais antigas tem como obstáculo o possível total recobrimento desses registros pela sedimentação subsequente, particularmente se as taxas de sedimentação forem significativas na plataforma considerada.

De fato, mesmo sob uma taxa regional de sedimentação de 14cm/1000 anos, definida por Behling *et al.* (2000) para plataformas marinhas do Nordeste do Brasil, estas feições estariam hoje recobertas por quase 3 metros de sedimentos mais recentes. Entretanto, percebe-se uma pequena inflexão na curva de variação de % quartzo aos 80m, influenciada por uma amostra (nº127) com participação significativa deste mineral (12%).

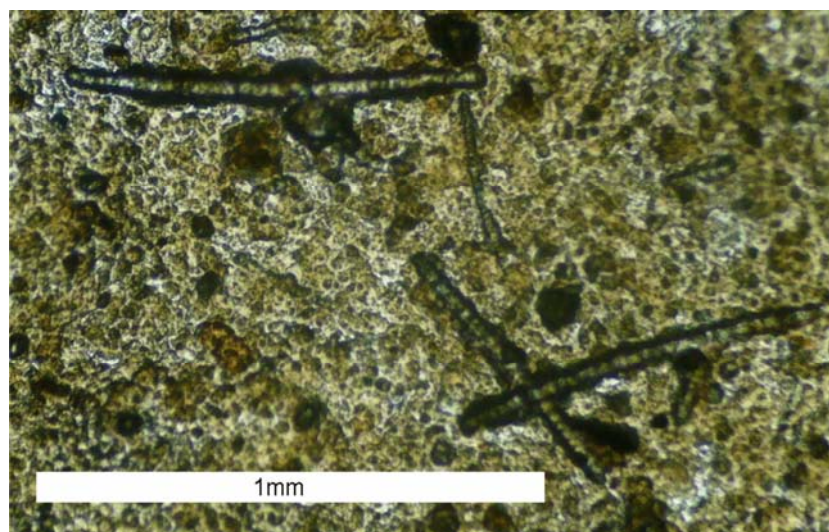


FIGURA 3. Espículas de organismos silicosos. Material residual da amostra VH-3126 (80m profundidade) após ataque com HCl 10%. Observação em LN/40x

Em outras amostras quimicamente não analisadas (amostra GI-29, 80), detectou-se, por difração de raios X, presença significativa de quartzo aos 80m de profundidade.

Estes dados únicos são significativos e indicam que, com alguma sorte, a dragagem de amostras nesse nível de profundidade pode encontrar zonas expostas, sub-expostas, ou retrabalhadas, da antiga linha de costa.

Um escorregamento de sedimentos poderia explicar esta exposição de sedimentos retrabalhados nesta profundidade, já que corresponde à borda do talude.

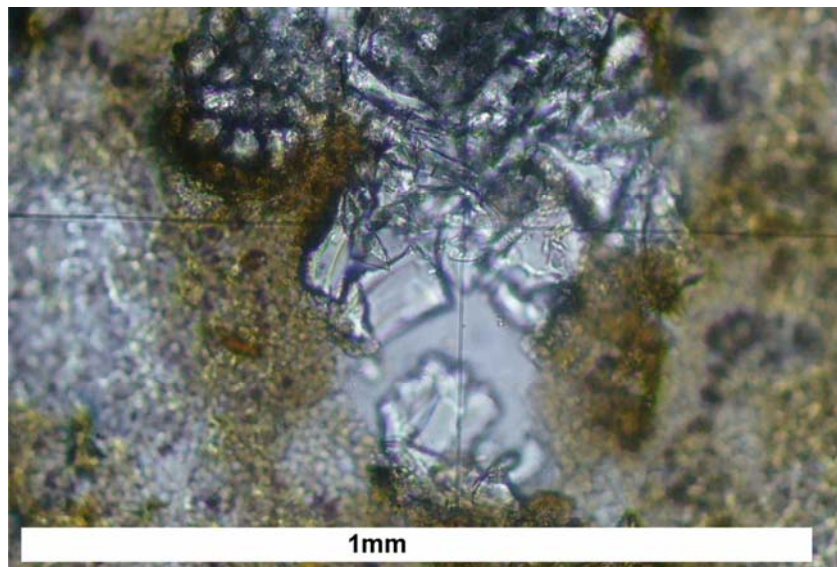


FIGURA 4. Grãos de quartzo angulosos. Material residual da amostra VH-3126 (80m profundidade) após ataque com HCl 10%. Observação em LN/200x.

Com relação aos dados isotópicos, o comportamento geral de $\delta^{18}\text{O}$ mostra valores médios decrescentes dos 15m aos 80m (Figura 2) o que, em princípio, indica um resfriamento das águas com a profundidade, fenômeno amplamente reconhecido em oceanografia Chester, (2000). Como os valores de $\delta^{18}\text{O}$ também sofrem influência da mistura de águas continentais (ricas em ^{16}O) nos ambientes marinhos (Li *et.al.*, 2007), as pequenas inflexões aos 30 e 45m, marcando valores médios um pouco mais baixos em $\delta^{18}\text{O}$, sugerem presenças reliquiaes das espécies bentônicas nesses níveis.

Esses valores de $\delta^{18}\text{O}$ podem ser resultado de provável diagênese meteórica quando, em concordância com Brand & Veizer (1981), tendem a diminuir.

Analogamente, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ decrescem, de forma geral, desde os 15m aos 80m, podendo-se considerar um valor médio mais baixo aos 45m, seguido de um aumento aos 50m, para finalmente se chegar a um valor mínimo aos 80m. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ nem sempre acompanham os de $\delta^{18}\text{O}$ nos casos de diagênese meteórica, uma vez que nem sempre as águas meteóricas são derivadas apenas de percolação em solos Brand & Veizer, (1981).

Considerando-se os resultados obtidos percebe-se que os dados isotópicos representam chave para mais de uma interpretação. No caso de $\delta^{18}\text{O}$, temperatura das águas e influência de águas continentais; no caso de $\delta^{13}\text{C}$, produtividade orgânica e influxo de águas continentais. Essa interpretação pode se tornar mais complicada no caso de mistura de sedimentos carbonáticos atuais com carbonatos reliquiaes.

Apesar disso, existe uma correlação positiva entre valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ (figura 5), e uma separação de dois grupos de tendências isotópicas, consideradas as espécies bentônicas analisadas.

O grupo A é caracterizado por padrão mais baixo de $\delta^{13}\text{C}$ (<1.5 ‰), resultante de mistura com águas continentais, que é confirmada por valores mais baixos em $\delta^{18}\text{O}$ (<-1 ‰). Esse grupamento expressa ambientes de sedimentação marinha com forte influência de sedimentos continentais.

Valores altos de $\delta^{13}\text{C}$ em carbonatos biogênicos implicam em alta produtividade biológica do meio Wynn & Read, (2007).

No caso do grupo A, sua menor produtividade pode estar relacionada com fatores restritivos de águas continentais como turbidez excessiva, que prejudica as reações de fotossíntese.

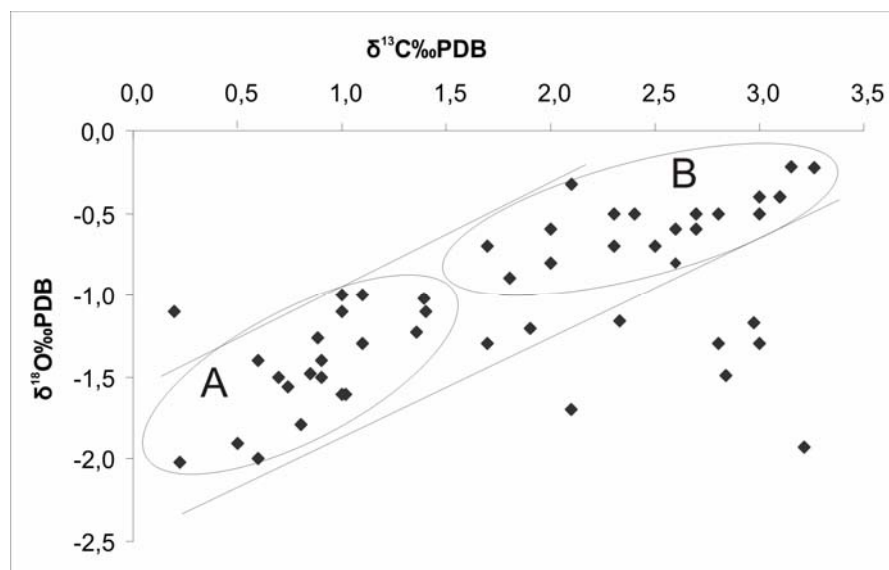


FIGURA 5. - Dispersão entre os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$. Grupamentos isotópicos A e B de carbonatos das espécies bentônicas: *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*. A: Carbonatos de foraminíferos bentônicos, com influência de águas continentais. B: Carbonatos de foraminíferos bentônicos, com influência do fator temperatura das águas.

O grupo B caracteriza-se por valores mais altos de $\delta^{13}\text{C}$ (> 1.5 ‰) e de $\delta^{18}\text{O}$ (> -1 ‰), resultante da associação entre temperatura e produtividade.

Com relação ao elemento estrôncio, este apresenta alto coeficiente de concentração em minerais carbonáticos, especialmente na aragonita, onde pode alcançar entre 6.000 a 10.000 ppm (Tucker & Wright, 1990).

Nos sedimentos carbonáticos da plataforma continental do Ceará, os valores médios de Sr vão de 500 a 4.500 ppm.

Nesses sedimentos existe uma paragênese de minerais carbonáticos incluindo, além de aragonita, calcitas com baixo magnésio (low Mg-calcites) e calcitas com alto magnésio (high Mg-calcites com Mg diadócico da ordem de 20 a 30%). Maiores teores em Sr costumam ser indicativos de fração aragonítica dominante ou importante na composição do sedimento total, o que implica na forte presença de organismos produtores de aragonita.

Destes organismos figuram espécies que possuem habitat em águas rasas como Halimeda, alga muito freqüente na área em estudo, mas não necessariamente indicadora de terraços marinhos.

Seja como for, o maior valor médio de Sr ocorre aos 45m de profundidade (Figura 6) e, de fato, conforme XRD a aragonita é relativamente abundante neste nível de profundidade (Figura 7).

A aragonita ocorre subordinadamente em profundidades maiores que 60m, associada com calcitas com alto e baixo magnésio, e, inclusive, aos 80m juntamente com a presença de quartzo (Figura 8).

Neste caso, a paragênese quartzo-aragonita-calcita com alto Mg-calcita com baixo Mg sugere mistura de biotas possivelmente não contemporâneas e possibilidade de retrabalhamento de material detrítico quartzoso remanescente de antigas linhas de costa.

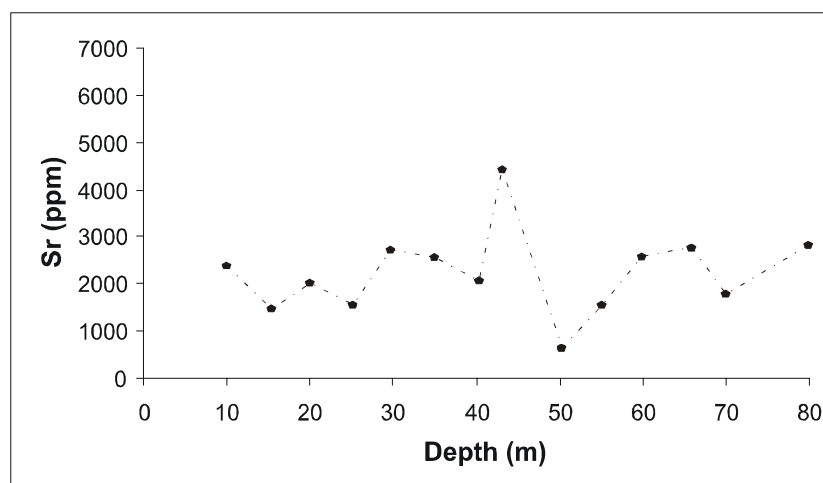


FIGURA 6. Variações das médias dos teores de estrôncio nos sedimentos carbonáticos plataformais.

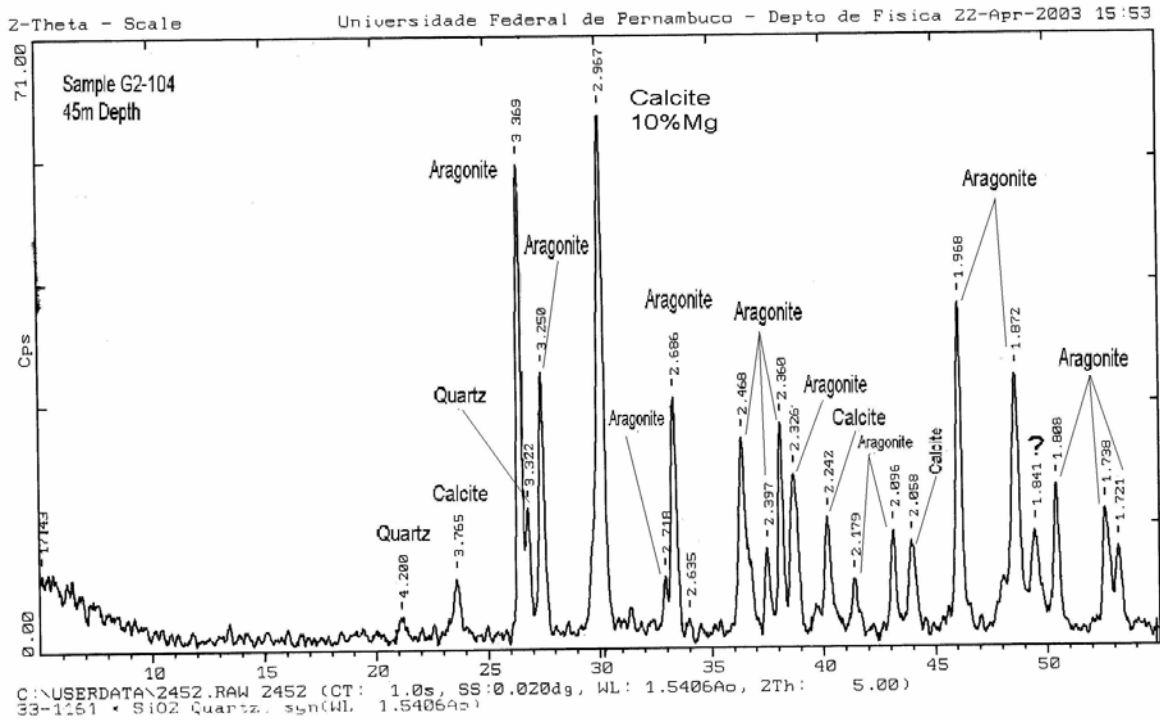


FIGURA 7. DRX da amostra G2-104 (45m de profundidade).

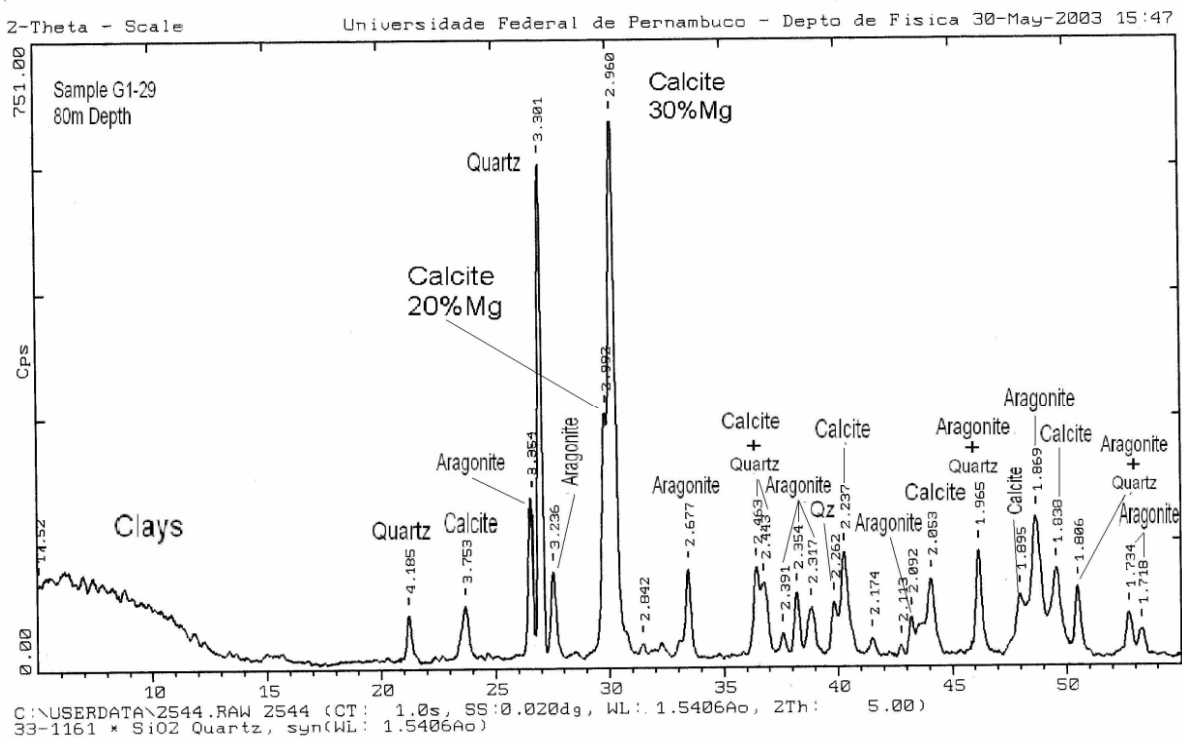


FIGURA 8. DXR da amostra G1-29 (80m de profundidade).

Com relação ao elemento manganês, a média de seus teores mostra um valor marcadamente mais elevado (190 ppm) aos 10m de profundidade (Figura 9), que corresponde ao aporte de particulados pedogenéticos e sedimentação desta espécie química, através de influxos fluviais. No sentido do oceano, as concentrações de Mn diminuem rapidamente e se estabilizam em torno de aproximadamente 70 ppm, com leve declínio para 60 ppm nas isóbatas de 70 e 80m.

Aparentemente, os teores em Mn dos sedimentos estudados não demarcam indícios de antigas linhas de costa, exceto para o nível de 45m de profundidade, onde algum fator de enriquecimento elevou sua concentração média para 110 ppm. Nesse caso, o nível de 45m de profundidade é assinalado, concordantemente, por valores médios mais elevados em Sr e Mn, e não por valores divergentes, como apontados por Brand & Veizer (1981) para os casos em que ocorre diagênese meteórica.

Essa discordância se deve ao fato que, com a evolução da transgressão flandriana, o terraço costeiro da época, que se encontra hoje aos 45m de profundidade, está submetido a um processo de acumulação sedimentar com condições físico-químicas diferenciadas, provocando, pois sobreposição de sedimentos depositados em diferentes condições geoquímicas. Existe, por conseqüência, um acúmulo de carbonatos biogênicos, com forte presença de aragonita (carbonato rico em estrôncio) na parte média e externa da plataforma continental.

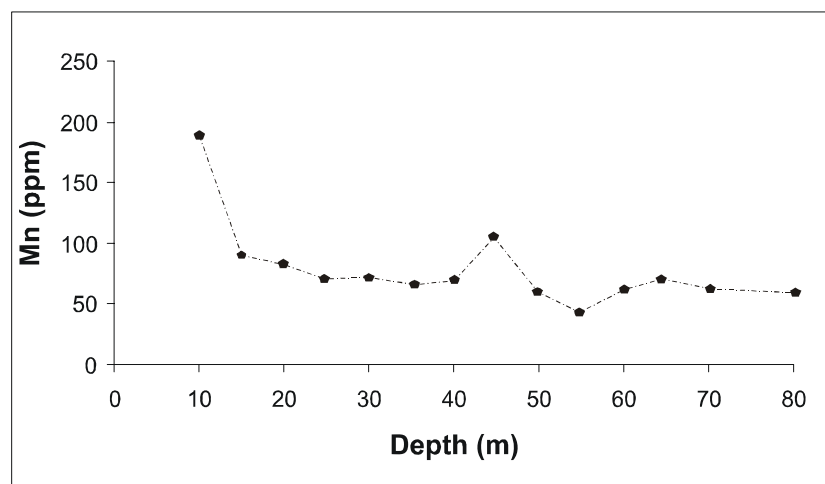


FIGURA 9. Variações das médias dos teores de manganês nos sedimentos carbonáticos plataformais

As médias dos teores de óxido de ferro (Figura 10), tal como ocorre com o manganês, apresentam um destacado valor aos 10m de profundidade (0.6% Fe_2O_3) que, por idêntica proveniência, é resultante do aporte contemporâneo de sedimentos derivados

de pedogênese. Considerando-se um background de 0.1% Fe_2O_3 , vários níveis de profundidade (25, 35, 45, 60 e 80m) apresentam-se com algum enriquecimento em Fe, chamando a atenção o nível de 35m (0,4 % Fe_2O_3).

Embora haja coincidência com alguns dos níveis onde se registram morfologias de fundo compatíveis com terraços marinhos, ou antigas linhas de costa, estes dados de concentração em Fe_2O_3 pressupõem um nível de dispersão mecânica do ferro muito mais amplo que o do Mn.

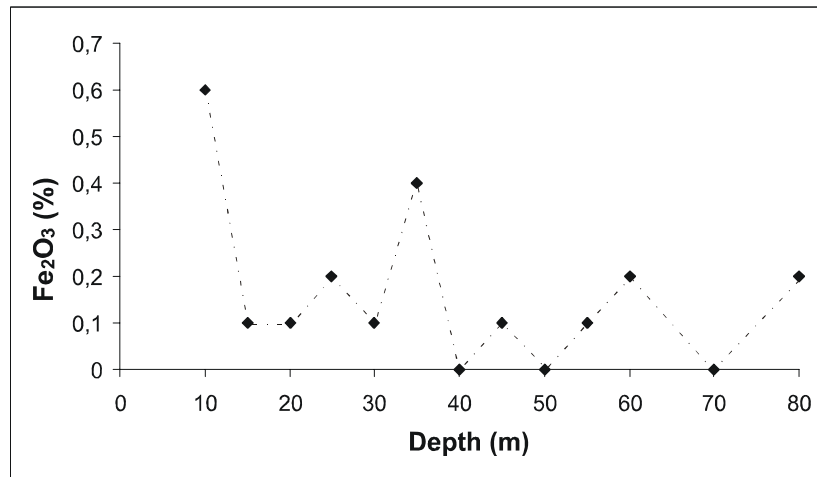


FIGURA 10. Variações das médias dos teores em Fe_2O_3 nos sedimentos carbonáticos plataformais

CONCLUSÕES

Indicações de diagênese meteórica foram comprovadas em sedimentos de fundo da plataforma continental do estado do Ceará, em batimetrias onde existiriam sedimentos relíquia, correspondentes a retrabalhamento de linhas de costa holocênicas: 20-25m, 45m e 80m. Estas evidências incluem, nestes níveis de profundidade, teores médios mais elevados de sílica livre (% de quartzo), Mn e Fe, em sedimento total, associados a valores isotópicos mais baixos em $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, a partir de carapaças carbonáticas de foraminíferos bentônicos das espécies *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*. Ao conjunto dessas características geoquímicas também se associa, eventualmente, uma paragênese de Mg-calcitas com distintos graus de diadocia de Ca^{++} por Mg^{++} , particularmente no domínio batimétrico dos 80m. A combinação de todos esses parâmetros geoquímicos e mineralógicos não é sempre completa, em razão de mistura de sedimentos contemporâneos e reliquiaes, uma vez que os primeiros estão sendo formados em condições ambientais diferenciadas em relação aos últimos, em razão da evolução da transgressão flandriana, que continua em progressão nos tempos atuais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LABISE pelas análises químicas realizadas, ao LGMA pela cessão de amostras, e à CAPES pelo suporte financeiro na forma de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- Angulo R.J., Lessa G.C. and Souza M.C. 2006. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25:486-506.
- Allen J. R. L. 2000. Late Flandrian (Holocene) tidal palaeochannels, Gwent Levels (Severn Estuary), SW Britain: character, evolution and relation to shore. *Marine Geology*, 162:353-380.
- Allan J.R. and Matthews R.K. 1982. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. *Sedimentology*, 29:797-817.
- Behling H., Arz W.H., Pätzold J., Wefer G. 2000. Late quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB3104-1. *Quaternary Science Reviews*, 19:981-994
- Brand U. and Veizer J. 1981. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system-2: stable isotopes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(03):987-997
- Caldas L.H.O., Stattegger K. and Vital H. 2006. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, 228: 39-53
- Chester R. 2000. *Marine Geochemistry*. London, Blackwell Sci., 491 p.
- Cícero A.D. and Lohmann. 2001. Sr/Mg variation during rock-water interaction: Implications for secular changes in the elemental chemistry of ancient seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 65:741-761.
- Coutinho P.N. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. *Revista de Geologia UFC. Fortaleza*. 6:65-73.
- Craig, H. 1957. Isotope standard for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometry analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12:133-149.
- Dabrio C.J., Zazo C., Goy J.L., Sierro F.J., Borja F., Lario J., González J.A. and Flores J.A. 2000. Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression (Gulf of Cadiz, Southern Spain). *Marine Geology*, 162:381-404
- França A.M.C., Coutinho P.N., Summerhayes C.P. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. 6:71-88.
- Freire G.S.S. 1985. *Geologia marinha da plataforma continental do Ceará*. Dissertação de mestrado em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Recife. 132 p.
- Goldsmith J.R. and Graf D.L. 1958. Relations between lattice constants and compositions of the Ca-Mg carbonates. *American Mineralogist*. 43: 84-101.
- Hodgson W.A. 1966. Carbon and oxygen isotope ratios in diagenetic carbonates from marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 30:1223-1233
- Li J.W., Vasconcelos P., Duzgoren-A.N., Yan D.R., Zhang W., Deng X.D., Zhao X.F., Zeng Z.P. and Hu M.A. 2007. Neogene weathering and supergene manganese enrichment in subtropical South China: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ approach and paleoclimatic significance *Earth and Planetary Science Letters*, 256:389-402.
- Manso V.A.V., Corrêa I.C.S., Barros C.E., Baitelli R. 1997. *Sedimentologia da Plataforma Continental entre Aracaju (SE) e Maceió (AL)*. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 69:505-520.

- Martin R.E., Leorri E. and McLaughlin P.P. 2007. Holocene sea level and climate change in the Black Sea: Multiple marine incursions related to freshwater discharge events. *Quaternary International*, 167-168:61-72.
- Nagarajan R., Sial A.N., Altrin J.S.A., Madhavaraju J., Nagendra R. 2008. Carbon and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima basin, Karnataka, southern India. *Revista Mexicana de Ciências Geológicas*. 25 (02): 225-235.
- Summerhayes C.P., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil. *Contrib Sedimentology* 4:44-78.
- Timireva S.N. and Velichko A.A. 2006. Depositional environments of the Pleistocene loess-soil series inferred from sand grain morphoscopy—A case study of the East European Plain. *Amsterdam, Quaternary Intern.*, 152-153:136-145.
- Tucker M.E. and Wright V.P. 1990. *Carbonate sedimentology*. London, Blackwell Sci. Publ., 421 p.
- Weaver C.E. & Pollard L.D. 1973. *The chemistry of clay minerals*. Amsterdam. Elsevier. Dev. Sedim. 15, 187p.
- Wynn T. C and. Read J. F. 2007. Carbon-oxygen isotope signal of Mississippian slope carbonates, Appalachians, USA: A complex response to climate-driven fourth-order glacio-eustasy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 256 (6): 254-272.

Tabela 1. Resultados das análises de isótopos de carbono e oxigênio nos sedimentos carbonáticos

Sample	G1 38	G1 39	REV91	VH 3115	G2 109	2 93	G2 68	G2 70	2 94	G1 40	1 35	G1 36	G1 34	REV86	G2 20	G2 96
Depth(m)	14	15	15	15	16	16	17	17	17	18	18	18	19	20	21	21
$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰PDB}}$	-0.8	-0.9	-2.0	-1.9	-1.7	-0.3	-0.7	-0.4	-0.5	-0.7	-0.4	-0.6	-0.5	-1.8	-0.6	-0.4
$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	2.6	1.8	0.2	3.2	2.1	3.2	2.5	3.1	2.7	2.3	3.1	2.7	2.4	0.8	2.6	3.1

Sample	G2 105	REV106	G-115	VH03134	6	90	G1 31	13	89	G2 104	REV41	93	REV09	REV07	VH17	G2-46
Depth(m)	30	30	30	30	35	35	35	35	35	40	43	45	45	50	50	50
$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰PDB}}$	-1.5	-1.6	-1.3	-2	-1	-0.7	-0.5	-0.6	-1.1	-1.1	-1.3	-1.4	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2
$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	0.7	1.0	0.9	0.6	1	1.7	2.3	2	1	1.4	1.7	0.6	1.4	1.4	2.3	3.0

Sample	G1 32	G2 71	G2 27	G2 21	REV93	G1 25	G1 33	G2 108	94	VH3137	REV45	REV84	REV11	5	REV44	G2 95
Depth(m)	25	25	25	25	25	28	28	28	60	60	60	80	80	30	30	25
$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰PDB}}$	-0.5	-0.3	-1.2	-1.5	-1.5	-0.5	-0.3	-0.8	-1.1	-1.4	-1.3	-1.9	-1.3	-1.6	-1.5	-0.4
$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	3	2.1	1.9	0.9	0.9	2.8	3.3	2	0.2	0.9	3	0.5	1.1	0.7	2.8	3

Sample	REV48	VH3115	VH 3171
Depth(m)	60	60	23
$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰PDB}}$	-1	-1.9	-1,3
$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰PDB}}$	1.1	3.2	2,8

Tabela 2. Resultados das análises químicas das amostras doadas pelo LGMA

Sample	Depth(m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	CaO\MgO	Lat (S)	Long (W)
Vh03157	10	68.68	3.00	2.62	1.61	8.46	0.23	2.81	0.04	549	820	5.25	05°45'12"	35°11'12"
Vh03146	15	1.05	0.31	0.16	6.89	43.30	0.04	0.19	0.06	46	2629	6.28	04°52'06"	36°22'48"
Rev88	18	0.00	0.00	0.03	5.97	48.39	0.01	0.03	0.07	16	3052	8.11	04°36'00"	37°14'24"
Vh03147	20	88.31	1.88	0.62	1.02	2.87	0.17	0.56	0.00	158	183	2.81	04°44'30"	36°19'12"
Rev74	20	25.61	0.65	0.05	3.90	34.56	0.18	0.04	0.05	16	3287	8.86	04°56'24"	35°19'30"
Vh03166	20	5.79	0.36	0.07	3.26	45.52	0.10	0.03	0.07	5	5301	13.96	06°45'12"	34°54'30"
G2 96	21	3.20	0.33	0.31	5.90	46.63	0.05	0.01	0.11	30	2940	7.90	02°29'05"	40°04'00"
Vh03171	23	14.63	0.38	0.08	3.90	41.11	0.04	0.02	0.07	18	3588	10.54	06°51'48"	34°46'30"
G2 95	25	9.27	0.60	0.37	5.50	42.85	0.23	0.01	0.10	31	2626	7.79	02°30'06"	40°07'00"
G1 32	25	70.18	3.17	0.47	1.74	12.11	0.90	0.23	0.03	90	1318	6.96	02°17'00"	40°27'30"
G2 71	25	8.53	0.50	0.29	5.42	43.85	0.14	0.02	0.10	36	2611	8.09	02°31'05"	40°35'00"
G2 27	25	12.43	1.39	0.33	4.31	40.56	0.35	0.08	0.09	40	3717	9.41	02°33'05"	39°47'03"
Rev12	25	87.78	1.97	0.25	1.04	3.52	0.22	0.28	0.00	51	217	3.38	03°52'48"	37°43'12"
G1 12	25	7.61	0.25	0.05	3.67	45.38	0.07	0.02	0.10	17	4086	12.37	03°36'30"	38°17'30"
G2 108	28	1.23	0.31	0.34	5.54	48.48	0.03	0.01	0.12	29	2689	8.75	02°35'09"	39°52'00"
Rev95	30	0.12	0.00	0.01	2.78	50.62	0.03	0.01	0.07	5	6482	18.21	03°17'24"	38°00'00"
Vh03134	30	0.67	0.21	0.07	3.86	49.17	0.04	0.02	0.08	14	5200	12.74	04°48'30"	36°37'42"
6	35	0.00	0.00	0.03	5.44	49.13	0.00	0.00	0.08	11	3611	9.03	02°18'00"	41°39'36"
90	35	0.00	0.00	0.02	4.52	50.88	0.00	0.03	0.08	18	4349	11.26	03°28'48"	38°04'48"
G1 31	35	61.05	2.32	0.96	2.21	16.55	0.56	0.12	0.06	111	1550	7.49	02°15'00"	40°30'30"
13	35	61.41	2.81	1.83	2.29	15.69	0.75	0.18	0.06	98	1226	6.85	04°15'00"	36°39'36"
Rev42	35	66.86	2.21	0.18	1.09	14.53	0.68	0.13	0.01	50	3326	13.33	09°06'00"	34°33'36"
89	35	0.39	0.01	0.02	2.78	50.13	0.05	0.01	0.08	16	6060	18.03	03°28'48"	38°04'48"
Rev90	35	0.05	0.05	0.04	3.52	50.58	0.00	0.00	0.08	12	4735	14.37	03°28'48"	38°04'48"

Rev121	35	16.83	1.83	1.55	3.41	36.59	0.28	0.11	0.12	71	3063	10.73	06°48'00"	34°39'36"
Rev72	35	63.70	2.90	0.59	1.58	14.97	0.76	0.08	0.01	53	2981	9.47	03°49'48"	37°22'12"
G 111	38	7.60	0.41	0.15	4.04	42.07	0.11	0.23	0.11	51	3174	10.41	03°54'30"	37°35'00"
Rev52	40	0.00	0.00	0.00	4.48	50.06	0.01	0.00	0.06	5	5133	11.17	05°18'00"	35°24'24"
G 46	40	0.60	0.16	0.16	5.68	49.08	0.00	0.00	0.11	14	2801	8.64	02°57'30"	39°16'30"
Rev75	40	0.15	0.01	0.04	5.47	46.21	0.30	0.00	0.07	15	3839	8.45	03°16'30"	35°06'00"
Rev41	43	0.33	0.03	0.02	3.11	50.42	0.01	0.00	0.07	16	4710	16.21	09°04'48"	35°01'12"
Rev39	55	70.31	2.75	0.15	1.72	12.20	0.73	0.04	0.02	29	2161	7.09	07°28'48"	34°46'48"
Rev48	60	0.03	0.00	0.03	3.19	51.19	0.00	0.00	0.08	18	3165	16.05	03°20'24"	38°40'12"
Rev94	60	0.15	0.00	0.07	4.98	48.19	0.12	0.03	0.12	16	3936	9.68	02°18'00"	41°27'36"
VH3115	60	4.60	0.35	0.05	4.78	46.21	0.14	0.01	0.08	9	3200	9.67	04°15'00"	37°24'30"
94	60	0.58	0.06	0.05	4.45	46.28	0.12	0.02	0.10	30	4314	10.40	02°18'00"	41°27'36"
VH3137	60	2.50	0.45	0.14	3.81	48.13	0.09	0.03	0.10	20	4051	12.63	04°40'00"	36°34'42"
Rev45	60	6.59	0.46	0.32	5.18	44.00	0.09	0.04	0.09	43	2882	8.49	10°36'00"	36°24'00"
VH3153	60	7.83	1.07	1.17	3.85	43.57	0.19	0.06	0.17	76	3063	11.32	05°46'00"	35°00'30"
Rev84	80	0.37	0.02	0.02	5.72	48.26	0.00	0.00	0.08	10	3120	8.44	03°39'36"	38°00'00"
Rev11	80	0.05	0.00	0.03	4.78	49.20	0.00	0.02	0.10	18	3890	10.29	03°01'48"	38°46'12"
VH3126	80	3.46	0.62	0.15	3.11	46.20	0.12	0.03	0.08	22	3888	14.86	04°34'42"	36°53'24"
VH3162	80	3.90	1.76	0.79	4.33	44.26	0.13	0.08	0.10	73	3816	10.22	06°39'42"	34°43'18"

Tabela 3. Resultados das análises químicas de Freire (1985)

Sample	Depth(m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	CaO\MgO	Lat (S)	Long (W)
240	10	57.30	0.64	0.07	0.31	13.40	0.41	0.05	0.06	80	2940	43.23	03°48'05"	38°51'06"
241	10	6.60	0.13	0.02	2.00	33.90	0.11	0.02	0.10	48	3600	16.95	03°46'08"	38°48'09"
208	10	3.10	0.29	0.30	3.10	32.80	0.06	0.05	0.16	190	1570	10.58	03°32'05"	38°59'02"
209	10	2.30	0.05	0.02	2.50	35.00	0.04	0.02	0.14	73	2640	14.00	03°33'09"	38°81'07"
197	15	80.70	0.85	0.08	0.43	5.00	0.36	0.04	0.03	140	370	11.63	03°44'07"	38°19'02"
67	18	2.50	0.09	0.06	3.10	33.00	0.10	0.02	0.11	58	2100	10.65	02°33'00"	40°37'09"
58	19	0.51	0.06	0.07	3.00	34.80	0.04	0.01	0.12	65	2650	11.60	02°34'00"	40°52'09"
35	20	77.20	0.42	0.13	0.36	6.80	0.27	0.04	0.07	48	330	18.89	02°24'02"	40°37'07"
279	20	49.30	0.50	0.07	1.00	16.10	0.38	0.06	0.08	180	1100	16.10	04°10'09"	37°40'03"
59	20	0.07	0.07	0.10	3.10	34.30	0.04	0.01	0.13	84	1750	11.06	02°33'09"	40°52'00"
235	22	86.40	0.61	0.10	0.08	3.20	0.39	0.13	0.01	130	630	40.00	03°55'04"	38°01'00"
93	22	1.60	0.07	0.12	2.60	34.80	0.04	0.02	0.12	90	1680	13.38	02°31'06"	40°16'08"
247	22	42.10	0.50	0.04	0.56	19.80	0.41	0.03	0.09	58	3500	35.36	03°55'06"	37°55'05"
108	22	0.97	0.09	0.14	3.50	33.70	0.04	0.02	0.15	83	1760	9.63	02°35'09"	39°52'00"
91	23	57.50	0.66	0.18	0.84	12.40	0.53	0.06	0.10	76	1050	14.76	02°26'00"	40°17'02"
214	23	90.30	0.56	0.07	0.30	1.90	0.32	0.07	0.01	100	210	6.33	03°47'01"	38°11'06"
199	25	91.20	0.56	0.09	0.15	1.50	0.37	0.09	0.11	74	240	10.00	03°43'06"	38°16'00"
2	25	74.50	0.87	0.01	0.28	6.80	0.57	0.14	0.60	145	860	24.29	03°35'05"	38°28'00"
10	25	91.20	0.98	0.11	0.09	0.86	0.57	0.06	0.06	73	160	9.56	03°25'07"	38°42'00"
76	25	51.40	0.29	0.11	0.90	16.40	0.13	0.01	0.09	42	1360	18.22	02°25'06"	40°33'02"
51	25	0.83	0.06	0.04	2.30	35.60	0.04	0.01	0.13	40	2190	15.48	02°25'04"	40°59'05"
157	25	59.90	1.69	0.46	0.84	9.10	0.90	0.19	0.07	190	840	10.83	03°23'02"	38°48'02"
264	27	84.20	0.71	0.06	0.26	3.80	0.41	0.06	0.02	120	520	14.62	04°05'06"	37°49'04"
262	28	5.10	0.09	0.02	0.57	36.40	0.06	0.02	0.08	25	6310	63.86	04°01'09"	37°48'04"

Sample	Depth(m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	CaO\MgO	Lat (S)	Long (W)
75	30	0.85	0.07	0.06	3.60	33.60	0.04	0.02	0.11	76	2300	9.33	02°26'00"	40°33'04"
77	30	0.82	0.08	0.05	3.50	33.20	0.05	0.02	0.10	31	2650	9.49	02°22'08"	40°32'04"
135	30	53.20	0.53	0.21	1.30	15.10	0.39	0.07	0.09	160	850	11.62	02°56'00"	39°26'00"
182	30	76.20	0.56	0.05	0.27	6.90	0.45	0.05	0.03	48	1330	25.56	03°34'01"	38°14'05"
276	30	81.60	0.74	0.11	0.28	4.40	0.49	0.15	0.03	210	600	15.71	04°05'03"	37°43'01"
277	30	82.30	0.66	0.07	0.26	4.60	0.45	0.05	0.02	94	640	17.69	04°05'09"	37°43'09"
155	30	85.80	1.06	0.13	0.14	2.50	0.70	0.13	0.02	83	219	17.86	03°13'03"	38°48'05"
148	30	75.70	0.82	0.11	0.50	6.10	0.57	0.03	0.04	62	420	12.20	03°19'01"	38°49'08"
237	30	87.50	0.64	0.07	0.17	2.60	0.45	0.07	0.02	90	420	15.29	03°52'00"	37°56'01"
251	30	37.40	0.29	0.04	1.20	21.40	0.23	0.02	0.10	28	2370	17.83	03°53'09"	37°47'00"
272	30	82.70	0.71	0.05	0.26	4.30	0.53	0.03	0.03	120	480	16.54	03°59'04"	37°38'09"
283	30	1.00	0.04	0.02	3.20	33.90	0.04	0.02	0.14	15	2540	10.59	04°12'00"	37°33'04"
289	30	31.30	0.34	0.02	0.48	24.00	0.30	0.02	0.10	32	4650	50.00	04°16'05"	37°25'02"
274	33	34.80	0.48	0.05	0.35	21.80	0.37	0.04	0.09	32	4640	62.29	04°01'01"	37°40'00"
159	33	67.30	0.42	0.06	0.59	10.60	0.34	0.03	0.06	10	1030	17.97	03°20'03"	38°41'07"
246	33	59.00	0.69	0.07	0.24	12.80	0.49	0.06	0.05	120	3460	53.33	03°51'01"	37°53'04"
255	35	28.50	0.32	0.06	1.40	25.10	0.23	0.04	0.13	170	2250	17.93	03°49'04"	37°40'08"
97	35	50.20	0.50	0.18	1.30	15.70	0.36	0.04	0.11	150	850	12.08	02°24'00"	40°03'01"
165	35	88.50	0.64	0.08	0.16	2.40	0.49	0.08	0.02	62	300	15.00	03°26'07"	38°29'07"
167	35	90.80	0.71	0.08	0.13	1.30	0.45	0.07	0.02	52	220	10.00	03°29'07"	38°22'08"
218	35	91.50	0.64	0.05	0.04	1.40	0.49	0.05	0.02	54	250	35.00	03°45'05"	38°02'00"
23	36	1.00	0.08	0.08	3.70	33.50	0.04	0.15	0.13	85	2450	9.05	02°49'04"	39°26'00"
28	36	0.52	0.06	0.04	2.90	34.60	0.04	0.01	0.13	53	2100	11.93	02°30'07"	39°51'04"
106	37	0.38	0.05	0.02	3.90	33.40	0.07	0.01	0.12	32	1850	8.56	02°25'00"	39°51'00"
121	37	3.30	0.14	0.08	3.30	33.10	0.05	0.03	0.13	100	2500	10.03	02°42'02"	39°36'00"
136	38	52.10	0.48	0.25	1.20	15.80	0.32	0.04	0.10	150	940	13.17	02°55'00"	3920'04"

Sample	Depth(m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	CaO\MgO	Lat (S)	Long (W)
4	38	8.50	0.09	0.03	0.26	32.00	0.14	0.01	0.11	10	5310	123.08	03°23'07"	38°24'00"
33	38	79.00	0.82	0.13	0.32	5.40	0.53	0.05	0.09	78	360	16.88	02°20'00"	40°31'03"
110	38	0.75	0.07	0.04	3.70	33.60	0.04	0.02	0.15	40	1880	9.08	02°30'06"	39°47'00"
47	38	0.76	0.06	0.04	2.10	35.70	0.04	0.01	0.12	26	2400	17.00	02°21'08"	41°00'03"
122	39	52.00	0.34	0.06	0.66	17.40	0.25	0.02	0.08	100	1650	26.36	02°39'03"	39°32'02"
158	39	85.40	1.19	0.15	0.23	2.40	0.74	0.09	0.03	86	290	10.43	03°13'03"	38°46'06"
330	40	32.40	0.42	0.05	1.20	22.40	0.38	0.02	0.09	140	3180	18.67	04°21'03"	37°17'01"
5	40	2.30	0.03	0.02	1.20	36.10	0.04	0.01	0.12	10	2450	30.08	03°18'00"	38°22'07"
123	40	1.50	0.05	0.02	2.70	35.10	0.04	0.02	0.12	52	2450	13.00	02°36'07"	39°28'05"
98	40	52.40	0.40	0.13	0.84	16.10	0.28	0.01	0.08	120	1550	19.17	02°18'05"	40°02'02"
132	40	65.30	0.50	0.04	0.84	11.20	0.37	0.01	0.06	52	670	13.33	02°44'03"	39°19'00"
133	40	64.70	0.37	0.10	0.78	11.30	0.18	0.04	0.07	120	820	14.49	02°48'07"	39°21'02"
137	40	58.00	0.45	0.09	1.10	14.20	0.27	0.02	0.08	130	880	12.91	02°53'00"	39°15'06"
160	40	24.80	0.18	0.07	1.90	25.80	0.16	0.03	0.13	34	1840	13.58	03°17'08"	38°30'00"
212	40	92.60	0.56	0.07	0.14	0.86	0.41	0.07	0.01	150	200	6.14	03°41'05"	38°08'00"
216	40	91.30	0.64	0.07	0.11	1.40	0.45	0.07	0.01	60	310	12.73	03°49'04"	38°07'03"
222	40	76.80	0.90	0.07	0.26	6.00	0.70	0.04	0.03	150	990	23.08	03°41'01"	37°55'03"
292	40	71.80	0.74	0.07	0.32	8.50	0.57	0.04	0.04	130	1590	26.56	04°07'07"	37°35'04"
293	40	21.30	0.56	0.07	0.72	21.30	0.45	0.05	0.10	90	3870	29.58	04°06'00"	37°37'09"
336	43	2.00	0.05	0.02	1.30	37.20	0.04	0.02	0.09	21	4100	28.62	04°37'08"	37°09'05"
146	45	86.80	0.85	0.12	0.23	2.60	0.49	0.04	0.02	92	240	11.30	03°13'07"	38°53'08"
204	45	89.90	0.82	0.08	0.11	1.60	0.53	0.05	0.01	120	210	14.55	03°38'02"	38°05'04"
269	50	86.20	0.79	0.06	0.13	2.50	0.60	0.06	0.02	43	270	19.23	03°56'02"	37°39'05"
161	50	20.90	0.45	0.07	1.50	27.43	0.35	0.05	0.13	64	2600	18.29	03°15'02"	38°33'09"
221	50	88.70	0.58	0.07	0.26	2.30	0.45	0.04	0.01	69	230	8.85	03°43'00"	37°58'02"
166	50	91.10	0.74	0.09	0.08	1.10	0.53	0.06	0.02	50	230	13.75	03°25'05"	38°22'07"

Sample	Depth(m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3t	MgO	CaO	K2O	TiO2	P2O5	Mn	Sr	CaO\MgO	Lat (S)	Long (W)
168	55	70.80	0.82	0.08	0.41	7.90	0.66	0.06	0.04	86	1120	19.27	03°29'03"	38°12'05"
45	58	0.52	0.05	0.03	2.40	35.50	0.04	0.01	0.13	23	2090	14.79	02°18'08"	41°00'02"
192	60	85.70	0.79	0.07	0.23	3.00	0.62	0.04	0.02	100	320	13.04	03°35'02"	38°09'08"
8	60	92.20	0.77	0.07	0.06	0.65	0.49	0.06	0.12	62	170	10.83	03°18'08"	38°30'06"
211	60	88.50	0.74	0.05	0.05	2.40	0.57	0.03	0.01	33	430	48.00	03°37'03"	38°05'09"
21	60	13.50	0.34	0.14	2.80	28.60	0.13	0.06	0.13	130	2740	10.21	02°56'08"	39°13'03"
119	60	7.00	0.11	0.02	2.94	31.60	0.14	0.02	0.17	52	2420	10.75	02°30'05"	39°31'00"
164	60	25.00	0.32	0.08	1.40	26.70	0.27	0.06	0.13	86	2250	19.07	03°20'07"	38°29'04"
163	65	3.10	0.08	0.05	1.90	35.80	0.05	0.02	0.14	65	2900	18.84	03°15'03"	38°29'03"
43	70	2.90	0.08	0.04	1.80	35.40	0.04	0.02	0.13	60	1850	19.67	02°07'04"	40°59'07"
18	80	3.10	0.08	0.04	1.10	35.00	0.09	0.01	0.14	50	1810	31.82	03°00'00"	38°54'02"
127	80	12.40	0.16	0.04	2.60	28.90	0.18	0.04	0.34	180	1630	11.12	02°37'01"	39°13'07"

4. CONCLUSÕES GERAIS

Tendo em vista o objetivo de detectar sinais geoquímicos de diagênese meteórica em sedimentos relíquia na plataforma continental do Ceará, além de estudar a distribuição dos óxidos principais analisados em sedimento total em amostras de sedimentos plataformais de outros estados do nordeste, os resultados analíticos mostraram que conjuntos de óxidos fortemente correlacionados, tais como SiO₂ - Al₂O₃ - K₂O e Rb indicam a influência da natureza félsica do embasamento cristalino da área continental adjacente sobre a fácies terrígena dos sedimentos plataformais em questão.

Pela correlação estatística entre a quantidade de magnésio na calcita e a fração terrígeno-quartzosa, um outro ponto observado foi que a biota bentônica produtora de calcita com alto magnésio parece estar associada ao substrato com alta fração terrígeno-quartzosa, ou seja, ao substrato referente a águas rasas. Como esta relação mostrou-se independente da profundidade, conclui-se que foram estudados, além de sedimentos recentes, sedimentos reliquiais, presentes ao longo da plataforma continental nordeste do Brasil.

No sentido de definir as paragêneses mineralógicas dos sedimentos plataformais, com suas afinidades e oposições geoquímicas, de acordo com o ambiente de proveniência, ficou evidenciada a oposição entre os minerais carbonáticos, de origem biogênica, sedimentados *in situ*, em relação aos minerais de origem continental, com evidente contribuição pedogênica. Do ponto de vista estatístico, essas oposições separam definitivamente os grupamentos Ca-Mg-Sr e Si-Al-K, tanto em interpretação a partir de matrizes de correlação quanto no diagrama ACP.

Aparentemente, as relações do grupo de filiação terrígena Si-Al-K com Fe-Ti-Mn são dependentes dos fatores climáticos e hidrodinâmicos vigentes durante o processo de entrada fluvial na plataforma. Foi constatada a possível presença de óxidos/hidróxidos de ferro e de fração pesada como titânio em granulação certamente muito fina, acompanhando os argilominerais, em direção ao mar aberto. Entretanto, na plataforma, entre os estados da Paraíba e Pernambuco, esses minerais se concentram em fácies proximais, considerando a posição atual da linha de costa.

Indicações de diagênese meteórica foram comprovadas em sedimentos de fundo da plataforma continental do estado do Ceará, em batimetrias onde existiriam sedimentos relíquia, correspondentes a retrabalhamento de antigas linhas de costa 20-25m, 45m e 80m. Estas evidências incluem, nestes níveis de profundidade, teores médios mais elevados de sílica livre (% de quartzo), Mn e Fe, em sedimento total, associados a valores isotópicos mais baixos em $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, a partir de carapaças carbonáticas de

foraminíferos bentônicos das espécies *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*. Ao conjunto dessas características geoquímicas também se associa, eventualmente, uma paragênese de Mg-calcitas com distintos graus de diadocia de Ca^{++} por Mg^{++} , particularmente no domínio batimétrico dos 80m. A combinação de todos esses parâmetros geoquímicos e mineralógicos não é sempre completa, em razão de mistura de sedimentos contemporâneos e reliquiais, uma vez que os primeiros estão sendo formados em condições ambientais diferenciadas em relação aos últimos, em razão da evolução da transgressão flandriana, que continua em progressão nos tempos atuais. Evidências de diagênese meteórica certamente existirão nas plataformas de outros estados do nordeste do Brasil.

5. REFERÊNCIAS

- Allan J.R. and Matthews R.K. 1982. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. *Sedimentology*, 29:797-817.
- Allen J. R. L. 2000. Late Flandrian (Holocene) tidal palaeochannels, Gwent Levels (Severn Estuary), SW Britain: character, evolution and relation to shore. *Marine Geology*, 162:353-380.
- Amaral C.A.B 1979. (Ed). Recursos minerais da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Projeto REMAC. Vol.10. Cenpes/Dintep. Rio de Janeiro. 111p
- Angulo R.J., Lessa G.C. and Souza M.C. 2006. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25:486-506.
- Behling H., Arz W.H., Pätzold J., Wefer G. 2000. Late quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB3104-1. *Quaternary Science Reviews*. 19:981-994
- Bilal U.HAQ and Boersma A. 1998. (Eds). Introduction to marine micropaleontology. Elsevier. Netherlands. 376p
- Brand U. and Veizer J.1981. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system- 2: stable isotopes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(03):987-997.
- Brownlow A.H. 1996. *Geochemistry* (2nd Edition). Prentice-Hall. United States of America. 580p.
- Caldas L.H.O., Stattegger K. and Vital H. 2006. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, 228: 39-53
- Cícero A.D. and Lohmann. 2001. Sr/Mg variation during rock-water interaction: Implications for secular changes in the elemental chemistry of ancient seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 65:741-761.
- Chester R. 2000. *Marine Geochemistry*. London, Blackwell Sci., 491 p.
- Craig, H. 1957. Isotope standard for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometry analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12:133-149.
- Coutinho P.N. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. Fortaleza, Univ. Fed. Ceará, *Revista de Geologia*, 6: 65-73.
- Dana - Hurlbut. 1959. *Manual de mineralogia*. Livros técnicos e científicos S.A. São Paulo. USP. 640p
- Dabrio C.J., Zazo C., Goy J.L., Sierro F.J., Borja F., Lario J., González J.A. and Flores J.A. 2000. Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression (Gulf of Cadiz, SouthernSpain). *MarineGeology*, .162:381-404.

- Edwards A.C., Hoz L.R., Fucugauchi J.U., Fortanel A.S., Garza E.M., Cruz R.L.S. 2005. Geochemical distribution pattern of sediments in an active continental shelf in Southern México. *Continental Shelf Research*. 25:521-537
- Foster I.D.L., Boardman J. and Bright K. 2007. Sediment tracing and environmental history for two small catchments, Karoo Uplands, South Africa. *Geomorphology*. 90: 126-143
- França A.M.C. 1979. Geomorfologia da margem continental leste brasileira e da bacia oceânica adjacente. Projeto Remac. Vol. 7. Rio de Janeiro. Petrobrás/Cenpes/Dintep. 177p.
- França A.M.C., Coutinho P.N., Summerhayes C.P. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. 6:71-88.
- Freire G.S.S. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. Recife, Univ. Fed. Pernambuco, Dissertação de mestrado em Geociências, 132p
- Gingele F., Deckker P.D. and Norman M. 2007. Late Pleistocene and Holocene climate of SE Australia reconstructed from dust and river loads deposited offshore the River Murray mouth. *Earth and Planetary Science Letters*. 255: 257-272.
- Goldsmith J.R., Donald L.G. and Heard H.C. 1961. Lattice constants of the calcium-magnesium carbonates. *American Mineralogist*, 46: 453-457
- Goldsmith J.R. and Graf D.L. 1958. Relations between lattice constants and compositions of the Ca-Mg carbonates. *American Mineralogist*. 43: 84-101.
- Hodgson W.A. 1966. Carbon and oxygen isotope ratios in diagenetic carbonates from marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 30:1223-1233
- Kuhnert H. e Rathmann S. In press. Carbonate ion effect on Mg/Ca, Sr/Ca and stable isotopes on the benthic foraminifera *Oridorsalis umbonatus* off Namibia. *Marine micropaleontology*.
- Landing W.M. e Bruland K.W. 1987. The contrasting biogeochemistry of iron and manganese in the Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 51:29-43.
- Li J.W., Vasconcelos P., Duzgoren-A.N., Yan D.R., Zhang W., Deng X.D., Zhao X.F., Zeng Z.P. and Hu M.A. 2007. Neogene weathering and supergene manganese enrichment in subtropical South China: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ approach and paleoclimatic significance *Earth and Planetary Science Letters*, 256:389-402.
- Maloof A.C., Kopp R.E., Grotzinger J.P., Fike D.A., Bosak T., Vali H., Poussart P.M., Weiss B.P. and Kirschvink J.L. 2007. Sedimentary iron cycling and the origin and preservation of magnetization in platform carbonate muds, Adros Island, Bahamas. *Earth and Planetary Science Letters*. 259:581-598.
- Manso V.A.V., Corrêa I.C.S., Barros C.E., Baitelli R. 1997. Sedimentologia da Plataforma Continental entre Aracaju (SE) e Maceió (AL). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 69:505-520.
- Martin R.E., Leorri E. and McLaughlin P.P. 2007. Holocene sea level and climate change in the Black Sea: Multiple marine incursions related to freshwater discharge events. *Quaternary International*, 167-168:61-72.
- Marin B. e Giresse P. 2001. Particulate manganese and iron in recent sediments of the Gulf of Lions continental margin (north-western Mediterranean Sea) deposition and diagenetic processes. *Marine Geology*. 172:147-165.
- Mataragas M., Skandamis P., Nychas G.J.E. and Drosinos E.H. 2007. Modeling and predicting spoilage of cooked, cured meat products by multivariate analysis. *Science*. 77:348-356.
- McArthur J.M., Doyle P., Leng M.J., Reeves K., Williams C.T., Sanchez R.G., Howarth R.J. 2007. Testing palaeo-environmental proxies in Jurassic belemnites: Mg/Ca, Sr/Ca, Na/Ca, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 252:464-480.

- Meireles A.J.A. e Silva V.E. 2002. Abordagem geomorfológica para a realização de estudos integrados para o planejamento e gestão em ambientes fluvio-marinhos. *Scripa Nova- Revista Eletrônica de Geografia e Ciências Sociais*. VI:118
- Morse W.J. and Mackenzie F.T. 1990. *Geochemistry of sedimentary carbonates*. Amsterdam, Elsevier, 679p.
- Montalverne A.A.F. 1982. Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco. Recife, Univ. Fed. Pernambuco. Dissertação de mestrado em Geociências. 197p.
- Nagarajan R., Sial A.N., Altrin J.S.A., Madhavaraju J., Nagendra R. 2008. Carbon and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima basin, Karnataka, southern India. *Revista Mexicana de Ciências Geológicas*. 25 (02): 225-235.
- Okamura M. & Kitano Y. 1986. Coprecipitation of alkali metal ions with calcium carbonate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50:49-58.
- Polat K. and Günes S. 2008. Computer aided medical diagnosis system based on principal component analysis and artificial immune recognition system classifier algorithm. *Expert Systems with Applications*. 34: 773-779.
- Siegel S. 1975. *Estatística não paramétrica para Ciências do Comportamento*. S. Paulo, MacGraw-Hill do Brasil, p. 228-240.
- Silva, J. B. P. da, Malvestiti, I., Hallwass, F. *et al*, 2005. Principal component analysis for verifying ^1H NMR spectral assignments: the case of 3-aryl (1,2,4)-oxadiazol-5-carbohidrazide benzylidenes. *Química Nova*, vol.28, no.3, p.492-496.
- Shouye Yang e Jiung-Su Youn. 2007. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments. *Marine Geology*. 243: 229-241.
- Summerhayes C.R., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil - Salvador to Fortaleza - Constructions to Sedimentology. 4: 44-78
- Timireva S.N. and Velichko A.A. 2006. Depositional environments of the Pleistocene loess-soil series inferred from sand grain morphoscopy—A case study of the East European Plain. *Amsterdam, Quaternary Intern.*, 152-153:136-145.
- Tucker M. & Wright V.P. 1990. *Carbonate Sedimentology*. Oxford, Blackwell Sci. Publ., 421 p.
- Weaver C.E.& Pollard L.D. 1973. *The chemistry of clay minerals*. Amsterdam. Elsevier. Dev. Sedim. 15, 187p.
- Wynn T. C and. Read J. F. 2007. Carbon-oxygen isotope signal of Mississippian slope carbonates, Appalachians, USA: A complex response to climate-driven fourth-order glacio-eustasy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 256 (6): 254-272.
- Zecchin M. *In Press*. The architectural variability of small-scale cycles in shelf and ramp clastic systems: The controlling factors. *Earth-Science Reviews*.



INFLUENCE OF TERRIGENOUS FRACTION IN RECENT BIOGENIC CARBONATE SEDIMENTATION IN THE ORIENTAL SHELF OF NORTHEASTERN BRAZIL

Manuscrito: AE 086-2006

Submetido em 22 de maio de 2007

Aceito em 01 de dezembro de 2007

Publicado em:

Revista Brasileira de Geociências, volume 37 (4), 2007

**INFLUENCE OF TERRIGENOUS FRACTION IN RECENT BIOGENIC CARBONATE
SEDIMENTATION IN THE ORIENTAL SHELF OF NORTHEASTERN BRAZIL**

Número de palavras: 3.006

Número de tabelas: 2

Número de figures: 4

Índice

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUCTION

STUDY AREA

METHODS

X-Ray Fluorescence Analyses

X-Ray Diffractometry Analyses

Statistical Analysis

RESULTS AND DISCUSSION

CONCLUSIONS

Acknowledgements

References

INFLUENCE OF CONTINENTAL FRACTION IN RECENT BIOGENIC CARBONATE SEDIMENTATION IN THE ORIENTAL SHELF OF NORTHEASTERN BRAZIL

Wanessa Sousa Marques¹, Eldemar de Albuquerque Menor¹, Alcides Nobrega Sial¹, Valderez Pinto Ferreira¹, George Satander Sá Freire² and Valdir do Amaral Vaz Manso¹

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

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

wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br, menor@terra.com.br, valderez@ufpe.br, freire@ufc.br, vazmanso@uol.com.br

INFLUÊNCIA DE FRAÇÕES CONTINENTAIS NA SEDIMENTAÇÃO DE CARBONATOS BIOGÊNICOS RECENTES NA PORÇÃO ORIENTAL DA PLATAFORMA CONTINENTAL NORDESTE BRASILEIRA

RESUMO

A influência do aporte continental na formação de carbonatos biogênicos recentes é estudada a partir de dados mineralógicos e geoquímicos nos sedimentos totais do assoalho plataformar. A área estudada corresponde à plataforma do Nordeste Oriental do Brasil, entre as isóbatas de 10 e 80m, adjacente a uma porção continental dominada por clima tropical semi-árido a úmido. Foram selecionadas 47 amostras contendo, em sua maioria, sedimentos carbonáticos, que são dominantes nessa plataforma, para análises XRD e análises químicas. Os resultados definiram dois tipos de fácies, ou sedimentos de composição diferente: os de dominância terrígeno-quartzosa e os de dominância francamente carbonática. Nos sedimentos terrígenos, que ocorrem desde isóbatas de 10m, até isóbatas entre 25 e 55m, predominam quartzo, feldspato potássico e calcita de alto magnésio, com teores em Sr geralmente < 2.200 ppm. Nos sedimentos carbonáticos, predominam e coexistem calcita de alto magnésio e aragonita, com teores em Sr geralmente >2.600 ppm, chegando a mais de 6.400 ppm. Em ambos os casos, não foi identificável a presença de calcita com alto magnésio. Mesmo quando a fração terrígena é acessória (<3%), a assinatura geoquímica, marcada por fortes intercorrelações $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{Rb}$ mantém fatores de correlação $(r) \geq 0.9$, refletindo a fonte félsica, de origem continental desses sedimentos terrígenos. As análises estatística (correlação $\text{Mg}/\text{Ca} - \text{SiO}_2$), química e mineralogia dos sedimentos indicam que a natureza

mineralógica do substrato é fator preponderante de controle da biota (dominantemente bentônica nessa plataforma) e que, nessas condições, as fácies mais terrígeno-quartzosas favorecem espécies preserváveis em calcita com alto magnésio em detrimento de espécies preserváveis em aragonita. Essa tendência mostrou-se independente da isóbata da amostragem desde os 10 até os 55 m.

Palavras chave: carbonatos biogênicos, calcitas magnesianas, fluorescência de raios X.

ABSTRACT

The influence of continental sediments on formation of recent marine sediments, has been mineralogically and geochemically studied using shelf-floor whole sediments (WS). The studied area corresponds to the oriental shelf of northeastern Brazil between the 10 to 80m isobaths, adjacent to a continental area dominated by semi-arid to humid tropical climate. 47 representative samples from the dominating facies in this shelf have been analyzed by X-ray diffraction (XRD) and chemical analysis and results allowed identification of two types of floor sediments of: (a) quartz-terrigenous dominance and (b) carbonate dominance, whose fraction present distinct mineralogical and geochemical characteristics. In the terrigenous facies, that occur from 10 to 25-55m depths, quartz, potassic feldspar and high Mg-calcite predominate, with Sr generally <2,200 ppm. In the carbonate facies, high Mg-calcite and aragonite coexist and predominate, with Sr concentrations up to 6,400 ppm and ranging >2,600 ppm. In both cases, low-Mg calcite is absent. Even when the terrigenous fraction is found in accessory amounts (< 3% WS), geochemical signatures, marked by strong intercorrelations SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O - Rb, exhibit correlation coefficients with $r \geq 0.9$, reflecting a continental felsic source. The statistical analyses (co-variation between Mg/Ca and SiO_2), chemistry and mineralogy of the sediments indicate that textural and mineralogical nature of the substratum is the main factor controlling the biota (dominantly benthonic in this shelf) and that, in these conditions, quartzous terrigenous facies favor species that are preserved in high Mg-calcite instead of those preserved in aragonite. This tendency showed to be independent of depth of sampling between 10 and 55 m.

Keywords: biogenic carbonates, Mg-calcite, X ray fluorescence.

INTRODUCTION

Biogenic carbonates occur habitually in shallow marine water of tropical regions. Due to the metabolism of the species that compose them, biogenic carbonates are chemically heterogeneous, presenting a variety of chemical elements tied to their crystalline structure (Brownlow 1996). Many factors influence their mineralogy and spatial distribution, being the type of biota one of them. For example, the major part of the foraminifers precipitate Mg-calcite

in their tests, while marine algae of the genus *Halimeda* precipitate exclusively aragonite (Bilal and Boersma 1998).

Environmental factors as temperature, pH, CO₂ partial pressure, light penetration and availability of oxygen are also determining factors for the distribution of these sediments in the continental shelves. Morse and Mackenzie (1990) pointed to a relationship between shape and complexity of the carbonatic skeleton of different organisms and water temperature, emphasizing that aragonite-producer organisms are, many times, confined to warmer waters. These authors indicated a relationship between growth rate (or calcification) of skeletons and magnesium content in the carbonate structure.

Brownlow (1996) emphasized that organisms could precipitate calcite in either undersaturated or oversaturated in calcium carbonate waters, and that nucleation rate and crystal growth, as well as their dissolution, are delayed by the presence of Mg⁺⁺ in seawater. He also stated that carbonates precipitated in shallow-marine waters are formed mainly by high Mg-calcite (11 to 19% Mg) while low Mg-calcite (Mg<11%) and aragonite are usually subordinate in these facies.

X-ray diffraction analysis (XRD) is a satisfactory method of analysis for telling how much magnesium is in the structure of carbonates (Goldsmith et al. 1961) once its presence decreases the distance between the atomic planes in the crystalline structure of calcite.

Aragonite exhibits distinct behavior with respect to magnesium, because the growth of this carbonate mineral is not affected by presence of this element, since its orthorhombic structure does not admit magnesium in amount large enough to form solid solution, as it happens in calcite. On the contrary, its atomic structure favors the admission of atoms with ionic radius larger than that of calcium (e.g. strontium). In aragonite, calcium is replaced by strontium, lead and, less often, by zinc (Dana 1959).

The scope of this study is to focus on the influence of the continent derived facies in the mineralogy and geochemistry of the carbonatic sedimentation in the continental shelf of the oriental northeastern Brazil, recognized as one of the richest shelves in biogenic carbonates in the Brazilian coast.

STUDY AREA

The continental shelf of oriental northeastern Brazil, particularly in the state of Ceará (Fig. 1), receives reworked sediments from the Barreiras Formation and from the crystalline basement, by means of rivers of little to intermediate importance (Freire 1985). Rocks of the crystalline basement are predominantly felsic and according to Freire (1985) this basement is covered by Neogene sediments of the Barreiras Formation along the coast. Sediments of the Barreiras Formation are constituted by red clayey sands and conglomerates. Sedimentary limestones also crop out in relatively extensive areas (e.g. Potiguar Basin) in the state of Rio Grande do Norte.

Almost all rivers that transport sediments to the continental shelf have hydrographic basins localized in the semi-arid climate domain (Meireles and Silva 2002).

According to Summerhayes et al. (1975) and Coutinho (1992), this continental shelf (Fig. 1) is relatively narrow (60-80 km), has a gentle slope (about de 1m/km, in average), warm water (25-30°C), and high salinity (30-38‰). In general, its intermediate and external domains are entirely covered by biogenic carbonatic sediments, characterized by predominating algalic rests and mollusks, small amount of corals, and total absence of ooids or other forms of carbonatic inorganic precipitation. The depth of shelf break, or the beginning of the continental slope, is between 60 and 70m isobaths. These characteristics extend along the continental shelf of other states in northeastern Brazil, like Pernambuco, studied by Montalverne (1982).

Among the studied samples from greater depths (>80 m) carbonate nodules have been observed in dark buff color, identified by Amaral (unedited) as being Eocene-Oligocene phosphatic limestones of the continental margin, formed by diagenetic phosphatization of carbonate rocks, due to upwelling currents.

FIGURE 1- Sample localities (adapted from Amaral, unedited)

METHODS

The sampling was carried out by oceanographic dredging and 47 samples have been selected between isobaths from 10 through 80 m, from the continental shelf of Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba and Alagoas states. This sampling includes essentially superficial Holocene sediments, composed of biogenic carbonates and subordinate terrigenous sediments. It was done during the operations of the GEOMAR XVIII (November, 1981) and GEOMAR XXI (November, 1983), on board of the Almirante Câmara oceanographic ship of the Brazilian Navy.

Each sample of whole sediment (WS) was washed and dried out in room temperature, put in plastic recipients and stored in the Marine Geology Laboratory (LGMA), Federal University of Ceará. The preliminary laboratory procedure consisted in homogenizing and quartering and two grams was ground down to 100 meshes in porcelain crucible and were analyzed by X-ray fluorescence, at the Stable Isotope Laboratory (LABISE), Department of Geology and by X-ray diffraction analysis, Physics Department of the Federal University of Pernambuco.

X-ray Fluorescence Analyses

Powdered samples (WS), after dried at 110°C during 6 hours, were calcinated in a muffle at 1000°C during a couple of hours, for loss on ignition (loi) determination. Fused bead was prepared from each calcinated sample, using lithium tetraborate flux, for X-ray fluorescence analyses. These analyses were performed in a Rigaku unit model RIX 3000 equipped with Rh tube, by the

calibration curve method prepared with international reference materials. Major elements are reported in weight percent and trace elements, in parts per million (ppm, Table 1).

X-Ray Diffraction Analysis

Analyses by XRD were performed by the powder method (Figures 2a, b, c, d, e) using a Siemens D5000 unit, with the following standard conditions: scanning θ /min, from 5 to 50. $KCu\alpha$ emission, and drift correction from the peak $I=100$ of quartz α (3.34 Å) to determining the magnesium quantity tied to the calcite structure, according to Goldsmith et al. (1961).

Statistical Analysis

The statistical treatment of the data included a regression analysis by means of correlations among 14 variables by Spearman's correlation coefficients (r), (Table 2), at confidence level of 95%, suitable for the type of population to be analyzed ($n=47$), following suggestions in Siegel (1975).

RESULTS AND DISCUSSION

The XRD analyses (Figs. 2a, b, c, d, e) have evidenced the predominance of the high Mg-calcite in proximal sediments of the continental shelf or in those characterized by fraction siliciclastic dominant ($> 60\%$ WS), even when they correspond to deep sediments ($>25m$). Quartz and subordinate quantities of potassic feldspar are the main component of this siliciclastic fraction, with muscovite and clay minerals (kaolinite) only identifiable sporadically as accessory phases. Low Sr contents ($< 2,200$ ppm. in general) and Mg/Ca ratios (WS) ≥ 0.12 (Fig. 3) characterize proximal facies, and place in evidence the reduced participation, or even absence of aragonite and of low Mg-calcite in total analyzed sediment (WS).

FIGURE 2- Diffractograms of samples collected at different depths. (a) sample rev52, collected from 40 m depth; (b) sample rev95, from 30 m depth; (c) sample vh3157, from 10 m deep; (d) sample vh3147, from 20 m deep; (e) sample rev 12, from 25m deep.

FIGURE 3- Sr (ppm) and Mg/Ca ratios, respectively for terrigenous and carbonatic sediments, in the continental shelf in the oriental northeastern Brazil.

In more distal conditions of the continental shelf, deeper sediments ($>25m$) where there is absolute predominance of the carbonatic fraction, high Mg-calcite (sometimes more than one type) coexist with large amount of aragonite. The siliciclastic fraction, frequently accessory in this environment, sometimes is not identifiable by X-ray diffraction of whole sediment (WS). High Mg-calcite with Ca:Mg ratios of 85:15 to 80:20 predominate but at deeper isobath ($> 35m$), Ca:Mg ratios of 70:30 can occur associated. High Sr contents ($>2,500$ ppm) and Mg/Ca (WS) ratios <0.12 (Fig. 2) characterize this paragenesis.

The predominance of high Mg-calcites is ratified by strong contents of MgO (2.78 a 6.89%) for WS with $\text{CaCO}_3_{\text{total}} > 95\%$. Low Mg-calcites have not been identified. Samples with high Sr contents ($>3,000$ ppm) had the presence of aragonite systematically confirmed in XRD analyses.

The results of statistical analyses attest, at a first instance, to the anticipated geochemical duality of shelf sedimentary systems, that is, the opposition between chemical species related to the supply of continental terrigenous sediments and those associated to carbonate precipitations that occur in situ. In this sense, it is aligned with terrigenous continental source the strong inter-correlations among SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O - Rb (Table 2), generally with correlation coefficients ($r \geq 0.9$) to which somehow are also associated the set of inter-correlations Fe_2O_3 -Mn- TiO_2 ($r = 0.4$ a 0.8). The set of inter-correlations between SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O -Rb marks the main siliciclastic constitution, composed by quartz associated to potassic feldspar, apparently with absence (or in non-detectable amounts) of sodic plagioclase in XRD analysis. The set Fe_2O_3 -Mn- TiO_2 ($r = 0.7$ to 1.0) point to the presence of a residual fraction of pedogenic origin, composed of Fe and Mn oxides, besides heavy minerals containing Ti (e.g. ilmenite and/or rutile). Although in non-systematic way, the highest contents of Fe_2O_3 , TiO_2 and Mn, use to occur in more terrigenous facies, independently of the depth of sampling.

TABLE 1

TABLE 2

On the contrary, biogeochemical sedimentation, marked by integrated inter-correlations CaO - MgO - P_2O_5 ($r = 0.7$, systematically), is invariably opposed (negative r) to the terrigenous set as a whole. The diadochy of Ca^{++} for Mg^{++} in the Mg-calcites composition and partition of Ca^{++} in the composition of aragonite and Ca phosphates (probably apatite group) explain why the integrated correlations of the biochemical set are not so strong. An essentially benthonic bioclastic association, composed mainly by algae, mollusks, echinoids and corals, besides sporadic presence of scales, spines and fecal pellets. support the geochemical signatures of this set. The diversity of this biota and its corresponding mineralogical preservation allow a reasonable correlation between CaO - MgO ($r = 0.7$), but weak between Sr- MgO ($r = 0.2$) on account of the competition between Sr and Mg ($r = -0.8$ for Ca/Mg -Sr) in the carbonate composition.

The Mg/Ca- SiO_2 correlation ($r = 0.8$) evidence the geochemical competition between Sr and Mg in the integration to the crystallographic structure of the carbonates. By itself, it could indicate the influence of the depth in the Mg content of calcites, that is, the preferential formation of high Mg-calcites occur in facies proximal to the shelf, where the terrigenous fraction use to be stronger. However, in the studied sampling there are quartzous siliciclastic sediments ($\text{SiO}_2 > 60\%$ and Al_2O_3

< 3%) from 10 to 55 m, and the Mg/Ca-SiO₂ correlation is more sensitive where the quartzous siliciclastic fraction is greater (Fig. 4), independently on depth of sampling. This way, it seems more evident that the mineralogical and chemical compositions of these sediments are directly related to the nature of the benthonic biota and this one with the type of substratum they are tied to.

It is possible that such distal siliciclastic sediments observed in these deep isobaths (> 25m) correspond to ancient reworked coastal zones, not covered by more recent sediments, marking periods of stabilizations of coastline during the rising of sea level from the peak of the latest glacial period.

FIGURE 4- Scattering diagram (SiO₂ versus Mg/Ca) for samples collected among 10 and 80m depth. The ratio Mg/Ca is high in samples with more quartz, independent of depth.

Original records should be certainly covered by subsequent process of sedimentation. In this sense, regarding the gentle gradient of the shelf and the order of magnitude of the sedimentation rates of the shallow carbonatic platforms (0.5-1.5 m 1000 yr⁻¹, Tucker and Wright 1990) in few thousand years these deposit could be sufficiently covered by more recent sediments precluding their sampling by oceanic dredgers. Alternatively, these deeper quartzous terrigenous facies could correspond to active axes of currently submerge paleo-channels still receiving continental detritic materials by means of plumes of the present-day drainage systems. In any of these alternatives, the siliciclastic nature of these substrata seem as important as the hydrodynamic conditions or temperature of the water to the mineralogy and geochemistry of the associated carbonates. Therefore, among the possibilities pointed out by Morse and Mackenzie (1990) it is suggested to discard the temperature effect, since the expected difference between 10 and 55 meters of depth would be of the order of a few degrees centigrades, retaining the conception of “biota differences”.

In the case of Na₂O, there is an undefined behavior with weak negative correlations with all of the terrigenous set, in concordance with the absence of sodic plagioclase. Its co-variance with CaO (r = 0.3) and mainly that with Sr (r = 0.6) suggest that, as already pointed out by Okamura and Kitano (1986) and Tucker and Wright (1990) that sodium can be tied to the crystallographic structure of carbonates.

CONCLUSIONS

The analytical results revealed two types of bottom sediments:

(a) Terrigenous sediments: with predominance of quartz and residual quantities of potassic feldspars and heavy minerals (probably: ilmenite, goethite and Mn oxides). In these sediments the terrigenous fraction is stoichiometrically, superior to 65% WS, and the carbonatic fraction (<35%) uses to be

represented predominantly by high Mg-calcites being in general, observed Mg/Ca ratios ≥ 0.12 and Sr $< 2,200$ ppm;

b) Carbonatic sediments: with predominance shared by high Mg-calcite and aragonite and even dominance of aragonite, accompanied of accessory quantities of terrigenous fraction (generally $< 5\%$). In these sediments, it is usually observed Mg/Ca ratios < 0.12 and Sr $> 2,600$ ppm.

Even with low amounts of Al_2O_3 ($< 3\%$ in 95.5% of the cases; average of 0.8%) strong integrated correlations among SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O - Rb have shown to be preserved confirming the quartz and potassic feldspar paragenesis in accordance with the felsic nature of the crystalline basement on which the costal drainage system has been established.

The quantity of Mg inserted in crystallographic structures of calcite in the studied shelf is statistically associated to a greater participation of the quartzous-terrigenous fraction in the bulk sediments of the substratum that govern the development of the benthonic biota kept in high Mg-calcite instead of the biota kept in aragonite. This tendency has proven to be independent on the depth of sampling from 10 to 55 m.

Acknowledgements

We thank the Department of Physics of the Federal University of Pernambuco (UFPE) for XRD analyses. Wanessa S. Marques wants to express her gratitude to the Brazilian CAPES Agency for a doctoral scholarship granted to her during her stay at the UFPE. This is the NEG-LABISE contribution n. 246.

REFERENCES

- Brownlow A.H. 1996. Geochemistry (2nd Edition). Prentice-Hall, United States of America, 580pp.
- Bilal U.H. and Boersma A. (Eds) 1998. Introduction to marine micropaleontology. Elsevier, Netherlands, 376pp.
- Coutinho P.N. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. Rev.Geologia UFC, **6**: 65-73.
- Dana H. 1959. Manual de Mineralogia. Livros técnicos e científicos S.A. Universidade de São Paulo, São Paulo, 640pp.
- Freire G.S.S. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. Dissertação de mestrado em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 132p.
- Goldsmith J.R., Donald L.G. and Heard H.C. 1961. Lattice constants of the calcium-magnesium carbonates. Amer. Mineralogist., **46**: 453-457.

- Morse W.J. and Mackenzie F.T. 1990. *Geochemistry of sedimentary carbonates*. Elsevier, Amsterdam, 679 pp.
- Montalverne A.A.F. 1982. *Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco*. Dissertação de mestrado em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 197p.
- Meireles A.J.A., Silva V.E. 2002. Abordagem geomorfológica para a realização de estudos integrados para o planejamento e gestão em ambientes flúvio-marinhos. *Scripta Nova- Rev Electr Geografía y Ciencias Sociales*, **VI**:118
- Okamura M. & Kitano Y. 1986. Coprecipitation of alkali metal ions with calcium carbonate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**: 49-58.
- Siegel S. 1975. *Estatística não paramétrica para Ciências do Comportamento*. MacGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 500p.
- Summerhayes C.P., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil. *Contrib Sedimentology*, **4**:44-78.
- Tucker M. & Wright V.P. 1990. *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Sci. Publ, Oxford 421 pp.



Principal Component Analysis (PCA) and Mineral Associations of Litoraneous Facies of Continental Shelf Carbonates from Northeastern Brazil

Manuscrito: CSR1184R1

Submetido em: 11 de fevereiro de 2008

Aceito em 04 de setembro de 2008.

Em edição na gráfica de: Continental Shelf Research

Prof. Michael B. Collins
Editor-in-Chief of Continental Shelf Research
University of Southampton, Southampton Oceanography Centre, School of Ocean and Earth
Science SO14 3ZH, UK.

Recife, June 18, 2008

Dear Prof. Collins,

We would like to resubmit the new version of our co-authored manuscript “Principal Component Analyses (PCA) and Faciological Discrimination of Continental-Shelf Carbonates from Northeastern Brazil” to Continental Shelf Research.

We are thankful for the careful work of two anonymous reviewers on an early version of this manuscript that certainly contribute for improving it.

We almost incorporated to the manuscript one hundred percent of what has been suggested by both reviewers.

In the hope that this manuscript in its present form meets the high level standards of this prestigious Journal and can finally be accepted for publication, we avail this opportunity to send you our regards.

Yours faithfully

Wanessa Sousa Marques

CSR1184R2 - Editor decision - accepted

Quinta-feira, 4 de Setembro de 2008 9:02

De:

"Continental Shelf Research" <csr-ee@elsevier.com>

[Adicionar remetente à lista de contatos](#)

Para:

wsmarq@yahoo.com.br

Dear Geologist Marques,

I am pleased to inform you that the manuscript "Principal Component Analysis (PCA) and Mineral Associations of Litoraneous Facies of Continental Shelf Carbonates from Northeastern Brazil" (Geologist Wanessa Marques) **has now been accepted by the editor for publication.**

Your manuscript will soon be passed to the production department for further handling. Then you will receive further notice.

Thank you for considering our journal for the publication of your research.

Kind regards,

Peggy Tan
Journal Manager
Continental Shelf Research

EDITORIAL COMMENTS

The authors have met with the minor revision comments.

Michael Collins UK EDITOR

Principal Component Analysis (PCA) and Mineral Associations of Litoraneous Facies of Continental Shelf Carbonates from Northeastern Brazil

Wanessa Sousa Marques¹, Alcides Nobrega Sial¹, Eldemar de Albuquerque Menor¹, Valderez PintoFerreira¹, George Satander Sá Freire², Enjolras de Albuquerque Medeiros Lima³ and Valdir do Amaral Vaz Manso¹

1 *NEG-LABISE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, C.P. 7852, Recife, Pernambuco, Brazil, 50670-000, Brazil; wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br, menor@terra.com.br, valderez@ufpe.br, vazmanso@uol.com.br*

2 *DEGEO, Department of Geology, Federal University of Ceará, C.P. 6011, Fortaleza, Ceará. 60455-970, Brazil; freire@ufc.br*

3 *Geological Survey of Brazil (CPRM), Av. Sul, 2291, Afogados, Recife, Pernambuco, Brazil, 50770-011; enjolras@re.cprm.gov.br*

Abstract

The distribution of mineral phases according to the provenance of carbonate and terrigenous facies of carbonate sediments from a large area of the continental shelf of northeast Brazil was investigated using a major element multivariate analysis approach. Heavy minerals such as ilmenite are restricted to the litoraneous facies of the continental shelf of the states of Paraíba and Pernambuco, and clay minerals are found in distal facies of the continental shelf of the State of Ceará. In the carbonate fraction, composed essentially by Mg-calcite and aragonite, there is co-variation between CaO/MgO and bathymetry in part of the studied continental shelf from depths between 15 and 20m, apparently due to influence of the seawater temperature, degree of oxygenation and luminosity. The terrigenous facies are mainly composed of quartz, clay minerals, K-feldspars and micro-micaceous minerals, having Fe and Ti oxide and hydroxide minerals as major accessory phases. Major element behavior attests to the presence of arenaceous quartz-rich relict sediments in the 35, 60 and 80m isobaths of the continental shelf of the state of Ceará which is here interpreted as a proxy of ancient coast lines during the Flandrian transgression.

Keywords: principal component analysis (PCA), carbonates, relict sediments, continental shelf, northeastern Brazil, geochemical composition.

Corresponding author: Wanessa Sousa Marques; e-mail: wsmarq@yahoo.com.br;

Phone/fax: 55-81-2126-8242

1. Introduction

Principal component analysis (PCA) is a method of multivariable analysis used in the interpretation of a many-variable data matrix by many authors (e.g. Silva et al., 2005; Jolliffe, 2002; Sass Kiss et al., 2008; Gil et al., 2008). The basic statistic procedure is based on the construction of new variables and reduction of large initial matrix. This simplification of data is done using linear combinations of the variables of the original matrix, which allow adequate visualization of the results that are grouped according to their similarities. This way, in a matrix of geochemical data, the chemical species are combined according to their provenance in the formation environment.

Therefore, new data from these linear combinations are derived, forming the principal components (PC) which can be displayed as scores and weights in bi- or tridimensional diagrams as pointed out by several authors (e.g. Silva et al., 2005; Mataragas et al., 2007; Polat and Günes, 2008; Azevedo et al., 2008). The scores and weights represent, respectively, sample distribution and influence of variables. The PC graph is formed by vectors that represent the variance coordinates.

PCA is broadly used in geochemical studies (e.g. Azevedo et al., op cit; Fernandes et al. 2008; Tavares et al. 2008; Cancès et al., 2008; Jartun et al. 2008 to mention a few). In the case of a geochemical data matrix, each vector shows that the data spread according to their geochemical affinity and provenance. This way, these affinities can provide information about the provenance of the groups of oxides. For example, Yang and Youn (2007) and Foster et al. (2007) have pointed out that geochemistry is effective in the investigation of the origin of marine sediments, whose chemical variations depend on the nature of sediments dumped by rivers into the sea and lakes. Besides, according to Maloof

et al. (2007) and Gingele et al. (2007), it can also help inferring climate conditions during sedimentary deposition.

Detailed geochemical studies of continental shelf carbonates of northeastern Brazil are still limited. With the scope of investigating major oxide distribution and their geochemical affinities according to the provenance of the carbonate and terrigenous facies, principal component analysis (PCA) was applied to 208 chemical analyses of carbonate sediments from a large area of the continental shelf of northeastern Brazil.

2. Study Area

The study area is located in the eastern portion of the Brazilian continental shelf (Fig. 1) which encompasses sediments of the states of Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba and Pernambuco, northeastern Brazil. The continental shelf, relatively narrow and shallow in this area, is 30km wide, 50 to 80m deep and has a steep continental slope (Behling et al., 2000). Its surface is slightly irregular and cut by well-developed channels (França et al., 1976). Sediments in this area are mainly in-situ biogenic carbonates and, at a less extent, continental terrigenous and relict sediments as reported by Coutinho (1992) and Summerhayes et al. (1975). The carbonate facies is mainly represented by Mg-calcite and aragonite. There is a lack of riverine sediment input in this area due to the fact that almost no small river-transported sediment reaches the ocean. Approximately 90% of the sediments transported by the São Francisco river, the major one in the region, is retained in its bottom (França et al., 1976).

The terrigenous facies is composed by reworked sediments from the Tertiary Barreiras Formation, a widespread continental to shallow-marine sedimentary cover. This formation is composed by sand, red clays and conglomerates (Bezerra et al., 2008). The terrigenous facies of the continental shelf is also formed by Precambrian basement rock fragments predominantly of felsic composition, transported by rivers to the continental shelf (Freire, 1985).

FIGURE 1

3. Methods

This study includes a total of 208 bulk chemical analyses of platform sediments grouped into three sets: (1) one set from Mont'alverne (1982), from the state of Pernambuco, collected by dragging at depths from 0.5 to 56 m; (2) a second set (Freire, 1985) from the various states of northeastern of Brazil (Ceará, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Alagoas), who analyzed samples collected by dragging during operations of the GEOMAR XVIII-Vitor Hense project (1981); GEOMAR XXI-REVISEE project (1983) in the oceanographic ship Almirante Câmara of the Brazilian Navy; and (3) a third set from the continental shelf of the state of Ceará, ceded by the Marine Geology Laboratory (LGMA) of the Federal University of Ceará.

All three set of samples have been collected by dragging with a van veen collector (device constituted by two articulated and open stainless steal shells, that lock themselves as they touch the ground, storing sediments in its core). The three sets of samples have been washed using de-ionized water, dried at room temperature and stored in plastic bags. Before chemical analysis, they have been homogenized and split into four fractions, one of them ground in porcelain mortar and sieved in an 100-mesh sieve.

A five-gram aliquot from each LGMA samples was analyzed by X-Ray fluorescence, at the Department of Geology, Federal University of Pernambuco. The other two sets of samples were analyzed by X-ray fluorescence at the Mineral Analyses Laboratory of SUDENE at Recife.

For determination of volatiles by loss in ignition (LOI), samples were dried at 110°C during 6 hours and placed into an oven at 1000°C during 2 hour. (LOI data are not available for Freire's samples). Each dried sample was fused using Li-tetraborate as flush

and fused discs were analyzed in a XRF Rigaku model RIX 3000, equipped with Rh tube, using the calibration curve method, prepared with certified reference materials and results are displayed in Table 1.

4. Results and Discussion

4.1 Principal Component Analysis (PCA)

In PC1 versus PC2 diagram (Fig. 2), a clear distinction is made by PC1 values in relation to in-situ components (carbonates; PC1 values greater than +0.2) and allochthonous components (continental terrigenous facies; PC1 values, lower than -0.1).

FIGURE 2

4.1. a. Controlling factors of PCA in the study area

The data matrix used for the principal component analysis (PCA) include twelve parameters (major oxides, Mn and Sr). The first principal component (PC1), or first auto-vector, is an axis in which the elements had maximum variance, or maximum scattering, but keeping chemical affinities. The second principal component (PC2), orthogonal to PC1, represents the second largest variance axis, or the axis with maximum variance not explained by the first auto-vector. Matrix correlation of all data was done to look for correlation factors among the variables and provide supplementary data to those of PCA.

CaO, MgO and Sr are of carbonate affiliation and associated with them is P₂O₅, probably due to presence of autochthonous organic matter in the platform environment. Association of P with carbonate facies has been observed by Edward et al. (2005), in the continental shelf of Mexico.

The terrigenous components are SiO₂, K₂O, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃ and Mn. Among these components, PCA allows identification of those related to coarser-grained detrital sediments, SiO₂ and K₂O (quartz and K-feldspar), and those related to finer-grained

terrigenous sediments, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , and Mn, which are related to clay minerals, pedogenic Mn and Fe, and ilmenite/rutile from the accessory fraction of heavy minerals.

Presence of K-feldspar in the inner platform is suggested by positive correlation between SiO_2 and K_2O , which indicates preferential paragenesis quartz and K-feldspar rather than quartz and clay minerals. The PCA statistical configuration shown in Fig. 2, probably reflects the dominance of a semi-arid climate of the continental area adjacent to the studied shelf, considering that climate plays an important role to the type of sediment transported to the continental shelf (Zecchin, in press). Behling et al. (2000) have shown that a semi-arid climate has predominated in northeastern Brazil during the Late Quaternary, based on the study of pollens of oceanic sediments from the continental shelf of this area.

The PC1 value of the Mg/Ca ratios is at intermediate position between the other variables taken into account, associated both to carbonate and terrigenous facies, probably due to the fact that proximal carbonates contain more magnesium than distal ones due to temperature influence. The relationship between high-Mg calcite and environmental temperature has been already pointed by (e.g. McArthur et al., 2007; Kuhnert and Rathmann, in press).

4. 2 Matrix of correlation

A correlation matrix with all available chemical data is shown in Table 1. Important factor correlations (r) are those between CaO and SiO_2 (-0.9); CaO and Al_2O_3 (-0.5); CaO and K_2O (-0.8); SiO_2 and Al_2O_3 ($r = 0.6$); Al_2O_3 and K_2O ($r=0.7$), SiO_2 and K_2O ($r=0.8$); Fe_2O_3 and TiO_2 ($r = 0.7$).

The correlation matrix for the samples from the continental shelf of the states of Paraíba and Pernambuco is shown in Table 2. From this Table, it becomes clear that there is no correlation between Fe_2O_3 and TiO_2 ($r = 0.1$).

TABLE 1

TABLE 2

4.2. a. Controlling factors of matrix of correlation in study area

This matrix shows an opposite behavior between the continental terrigenous facies and the biogenic carbonate facies in platformal environments (Fig. 3).

FIGURE 3

A positive correlation between SiO_2 , Al_2O_3 and K_2O is indicative that the terrigenous facies is mainly formed by quartz, clay minerals, and K-feldspar, and disperse muscovite. The covariation between SiO_2 and Al_2O_3 ($r = 0.6$), in particular, reflects the partition of Si between quartz and aluminosilicate minerals (K-feldspar, clay minerals and muscovite). Strong correlation between Al_2O_3 and K_2O ($r=0.7$) and SiO_2 and K_2O ($r=0.8$) confirm the presence of significant amounts of K-feldspar in terrigenous fraction, according to paleoclimatic observations on the continental area next to the continental shelf.

The relatively good co-variation between Fe_2O_3 and TiO_2 ($r = 0.7$) points to ilmenite as the major Ti-bearing heavy mineral in the terrigenous facies, although weak correlation between SiO_2 and Al_2O_3 suggests low abundance of this mineral. Landing and Bruland (1987) suggest that the mechanical dispersion of an element in the platform depends, among other factors, of fluvial sources. This would imply in presence of ilmenite with variable grain size disseminated both in the proximal and distal facies of the platform. The correlation between Al_2O_3 and Fe_2O_3 ($r = 0.6$) suggests dispersion of Fe-bearing minerals and that there is a very fine grained pedogenic terrigenous component (goethite) together with clay minerals.

Ca, Mg, and Sr show good correlation to each other, in spite of the Mg and Sr competition for carbonate minerals (Mg-calcite and aragonite), being Sr preferentially incorporated into aragonite.

The correlation matrix for the samples from the continental shelf of the states of Paraíba and Pernambuco (Table 2) where a humid and warm climate predominates as opposed to the semi-arid climate in the state of Ceará, shows some differences relative to the carbonate facies of other states of northeastern Brazil. Differences are also observed in the chemical behavior of elements of accessory terrigenous minerals from the continental shelf, as in these shelves Ti shows random distribution and is not related to clay minerals, while Fe_2O_3 and MnO show relatively good covariance ($r = 0.7$) with each other. Marin and Giresse (2001) suggested that Mn could enter into oceanic platforms through fluvial systems. In the studied continental shelf, the variation of Fe_2O_3 , Al_2O_3 and MnO is not related to the depth, suggesting that their mechanical dispersal has not reached distal facies.

In Table 2, Fe_2O_3 and TiO_2 show no covariation ($r = 0.1$) suggesting that ilmenite, mined in placers at the coast of the state of Paraíba, is coarse-grained and better sorted than in the continental shelf of the state of Ceará, but it is restricted to the littoral facies at depths of less than 5 m. CaO/MgO ratios do not exhibit a well-defined covariation with bathymetry, but there is a tendency of increasing ratios from 15-20m depth, in the platform of the state of Pernambuco (Fig. 3). This could be related to temperature, as high-Mg calcite is more abundant in shallower, warmer waters, as suggested by some authors (e.g. Mc Arthur et al., 2007; Kunhert and Hathmann, in press). Temperature, luminosity and oxygen availability imply on species distribution as low-Mg calcite and/or aragonite of skeleton of organisms predominate in deep water in this continental shelf, from 15-20 m depth. Mont'alverne (1982) has not mentioned details about phyla distribution but has

observed a decreasing number of species in distal facies in this part of the continental shelf, where planktic and benthic foraminifera predominate over other organisms.

In the continental shelf of the state of Ceará, there is an increase of silica contents in distal facies between the isobaths of 25 and 35m, 40 and 50m, and at 60 m depth, where contents are similar to those observed in the proximal facies (Tables 3, 4 and 5). On the other hand, in these distal facies, TiO_2 and Fe_2O_3 contents are low.

Freire (1985) reported irregular topographic relief from the 40m isobath, associated to gravel and sand, as well as to bio-detrital mud, suggesting the existence of relict sediments as proxy of ancient coastal lines. This author had called, inappropriately, “shelf-border terrace” to the irregularities in the bottom topographic relief, between the isobaths of 20 and 30m, 40 and 50, and 60 and 70m. Finally, Behling et al. (2000) emphasized the presence of terrigenous matter in distal environment of the continental shelf of northeastern Brazil, as a proximal record of the latest post-glaciation period, when the sea level was well below its present level.

FIGURE 4

TABLE 3

TABLE 4

TABLE 5

5. Conclusions

The PCA method together with matrix of correlation are useful tools in the study of continental shelf of northeastern Brazil, as they allowed defining mineral associations, geochemical affinity, as well as in the provenance and partition of major elements and Sr in the sediments. In these environments of sedimentation on the continental shelf, biogenic carbonate minerals, of in-situ sedimentation are well distinguished from

terrigenous continental minerals, which display an evident pedogenic contribution. The behavior of the chemical elements under consideration has defined two groups, Ca-Mg-Sr and Si-Al-K, in both, correlation matrix and PCA.

In the arrival of sediments transported by the rivers to the continental shelf, the relationship of groups of continental origin such as Si-Al-K and Fe-Ti-Mn is, apparently, governed by climate and hydrodynamics.

The presence of Fe oxide and hydroxide minerals, a very fine-grained Ti-bearing heavy fraction, and clay minerals towards open sea, are suggested by these statistical methods. In the platform of the states of Paraíba and Pernambuco, however, these minerals are more abundant in the proximal facies.

Mg-calcite producer organisms are inferred in the external continental shelf of the state of Pernambuco, as suggested by CaO/MgO ratios of the sediments. This may be due to the presence of planktic and benthic foraminifera in this area, as pointed out by Mon'alverne (1982) and Freire (1985).

Acknowledgements

WSM wants to express her gratitude to CAPES for a scholarship. Comments from two anonymous reviewers helped to improve the original manuscript. All statements here, however, are of the entire responsibility of authors. This is the contribution n. 246 of the NEG-LABISE, Federal University of Pernambuco, Brazil.

References

- Amaral, C.A.B., 1979. (Ed). Recursos minerais da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Projeto REMAC, v.10, CENPES/Dintep, Rio de Janeiro, 111p
- Azevedo D.A., Tamanqueira J.B., Dias J.C.M., Carmo A.P.B., Landau L., Gonçalves F.T.T. 2008. Multivariate statistical analysis of diamondoid and biomarker data from Brazilian basin oil samples. *Fuel* 87, 2122-2130.
- Bezerra F.H.R., Neves B.B.B., Corrêa A.C.B., Barreto A.M.F., Suguio K., 2008. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin- The Cariatá trough, northeastern Brazil. *Geomorphology* 97, 555-582.
- Behling H., Arz W.H., Pätzold J., Wefer G., 2000. Late quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB3104-1. *Quaternary Sci. Reviews* 19, 981-994
- Cancès B., Juillot F., Morin G., Laperche V., Polya D., Vaughan D.J., Hazemann J-L., Proux O., Brown G.E.Jr., Calas G., 2008. Changes in arsenic speciation through a contaminated soil profile: A XAS based study. *Science of The Total Environment* 397, 178-189.
- Coutinho P.N., 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. *Revista de Geologia UFC* 6, 65-73.
- Edwards A.C., Hoz L.R., Fucugauchi J.U., Fortanel A.S., Garza E.M., Cruz R.L.S., 2005. Geochemical distribution pattern of sediments in an active continental shelf in Southern México. *Continental Shelf Research* 25, 521-537
- Fernandes P.G., Carreira P., Silva M.O. 2008. Antropogenic sources of contamination recognition-Sines coastal aquifer (SW Portugal). *Journal of Geochemical Exploration* 98, 1-14.
- Foster I.D.L., Boardman J. and Bright K., 2007. Sediment tracing and environmental history for two small catchments, Karoo Uplands, South Africa. *Geomorphology* 90, 126-143
- França A.M.C., Coutinho P.N., Summerhayes C.P. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências* 6, 71-87.
- Freire G.S.S., 1985. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. Dissertação de mestrado em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Recife, 132pp.

- Gingele F., Deckker P.D. and Norman M., 2007. Late Pleistocene and Holocene climate of SE Australia reconstructed from dust and river loads deposited offshore the River Murray mouth. *Earth and Planet. Sci. Letters* 255, 257-272.
- Gil M.V., Calvo L.F., Blanco D., Sanches M. E. 2008. Assessing the agronomic and environmental effects of the application of cattle manure compost on soil by multivariable methods. *Bioresource Technology* 99, 5763-5772.
- Jolliffe I.T. 2002. *Principal component analysis*. 2 ed. New York. Springer Verlag. 502pp.
- Kuhnert H. and Rathmann S. (in press). Carbonate ion effect on Mg/Ca, Sr/Ca and stable isotopes on the benthic foraminifera *Oridorsalis umbonatus* of Namibia. *Marine micropaleontology*.
- Landing W.M. and Bruland K.W., 1987. The contrasting biogeochemistry of iron and manganese in the Pacific Ocean. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 51, 29-43
- Maloof A.C., Kopp R.E., Grotzinger J.P., Fike D.A., Bosak T., Vali H., Poussart P.M., Weiss B.P. and Kirschvink J.L., 2007. Sedimentary iron cycling and the origin and preservation of magnetization in platform carbonate muds, Adros Island, Bahamas. *Earth and Planet. Sci. Letters* 259, 581-598.
- Mataragas M., Skandamis P., Nychas G.J.E. and Drosinos E.H., 2007. Modeling and predicting spoilage of cooked, cured meat products by multivariate analysis. *Science* 77, 348-356.
- Mont'alverne A.A.F., 1982. *Estudo dos calcários na plataforma continental de Pernambuco*. Recife, Universidade Federal Pernambuco. Dissertação de mestrado em Geociências. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 197pp.
- Marin B. and Giresse P., 2001. Particulate manganese and iron in recent sediments of the Gulf of Lions continental margin (north-western Mediterranean Sea) deposition and diagenetic processes. *Marine Geology* 172, 147-165.
- McArthur J.M., Doyle P., Leng M.J., Reeves K., Williams C.T., Sanchez R.G., Howarth R.J., 2007. Testing palaeo-environmental proxies in Jurassic belemnites: Mg/Ca, Sr/Ca, Na/Ca, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 252, 464-480.
- Polat K. and Günes S., 2008. Computer aided medical diagnosis system based on principal component analysis and artificial immune recognition system classifier algorithm. *Expert Systems with Applications* 34, 773-779.
- Sass-Kiss A., Kiss J., Havadi B., Adányi, N. 2008. Multivariate statistical analysis of botrytised wines of different origin. *Food Chemistry* 110, 742-750.

- Silva, J. B. P. da, Malvestiti, I., Hallwass, F., 2005. Principal component analysis for verifying $^1\text{HNMR}$ spectral assignments: the case of 3-aryl (1,2,4)-oxadiazol-5-carbohydrazide benzylidenes. *Química Nova* 28 (3), 492-496.
- Summerhayes C.P., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil. *Contributions to Sedimentology* 4, 44-78.
- Tavares M.T., Sousa A.J., Abreu M.M. 2008. Ordinary kriging and indicator kriging in the cartography of trace elements contamination in São Domingos mine site (Alentejo, Portugal). *Journal of Geochemical Exploration* 98, 43-56
- Yang S. and Youn J.S., 2007. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments. *Marine Geology* 243, 229-241.
- Zecchin M. (in press). The architectural variability of small-scale cycles in shelf and ramp clastic systems: The controlling factors. *Earth-Science Reviews*.

CAPTIONS FOR FIGURES AND TABLES

Figure 1. Eastern Brazilian continental shelf showing sample locations. REV: samples collected in GEOMAR XXI and REVISEE projects (1983). VH: samples collected in GEOMAR XVIII and Vitor Hense project (1981).

Figure 2. PCA for sediments from the continental shelf of northeastern Brazil. PC1 shows 45% of explained variance. PC2 shows 25% of explained variance. Two vectors shows 70% of explained variance.

Figure 3. Opposite behavior between the continental terrigenous facies and the biogenic carbonate facies in platformal environment. Horizontal line separates the fields for samples from above and below 20 depth.

Figure 4. Plot of CaO/MgO ratios against depth for continental shelf carbonates, state of Pernambuco.

Table 1. Correlation matrix for major elements of all samples northeastern Brazil continental shelf in this study.

Table 2. Correlation matrix for major elements from continental-shelf sediments, states of Paraíba and Pernambuco, northeastern Brazil.

Table 3. Chemical analyses of continental-shelf sediments of the state of Pernambuco (from Mont'alverne, 1982).

Table 4. Chemical analyses for continental-shelf sediments from northeastern Brazil (Freire, 1985)

Table 5. Chemical analyses for continental-shelf sediments from northeastern Brazil. LGMA samples. REV: samples collected in GEOMAR XXI-REVISEE project (1983). VH: samples collected in GEOMAR XVIII-Vitor Hense project (1981). G: samples entitled only GEOMAR XXI.

INTERNATIONAL GEOLOGY REVIEW
 Organized in association with the American Geological Institute
 and the International Union of Geological Sciences
 (1973, 1988, 2003)

Volume 27 January 2008 Number 1

CONTENTS

Revised and Updated Geology of the Amazon and Guianas of South and Neotropical Regions	(27 pages)	1
Basins in Amazon-Congo Province: Fluvial Geology in the Amazon Basin	Richard D. Johnson	8
Provenance and Isotopic Evidence for the Amazon Basin High Plateaus: New Evidence from	J. A. de Wit, R. J. W. van der Wal, J. P. de Wit, J. P. de Wit, J. P. de Wit, J. P. de Wit	35
The Carbon and Nitrogen Isotopes in Amazonian Shale: Evidence for a High Plateau	Lisa E. Van Der Wal, Robert H. Wood, R. H. Wood, R. H. Wood, R. H. Wood	58
Trace Element Geochemistry of Amazonian Shale: Evidence for a High Plateau	Richard D. Johnson, Robert H. Wood, Lisa E. Van Der Wal, R. H. Wood	65
Evolution of the Amazon Basin: Evidence from the Amazon Basin	Richard D. Johnson	72
Trace Element Geochemistry of Amazonian Shale: Evidence for a High Plateau	J. A. de Wit, R. J. W. van der Wal, J. P. de Wit, J. P. de Wit, J. P. de Wit	80
Geochemistry of Amazonian Shale: Evidence for a High Plateau	Richard D. Johnson	87

Edited by
 W. Gary Ernst Brian K. Burgess Lawrence A. Taylor

ANCIENT COASTAL LINES IN THE CONTINENTAL SHELF OF THE STATE OF CEARÁ, NORTHEASTERN BRAZIL: EVIDENCE FROM CHEMISTRY AND STABLE ISOTOPES

Manuscrito submetido em 30 de junho de 2008

Aceito em 19 de setembro de 2008.

Em edição na gráfica de: International Geology Review

Prof. Wallace Gary Ernst
Editor-in-Chief, International Geology Review
Department of Geology and Environmental Sciences
Geocorner, Building 320, Room 118
Stanford University
Stanford, CA 94305-2115
e-mail:ernst@pangea.sanford.edu

Recife, June 30th, 2008

Dear Prof. Gary Ernst,

We would like submit the co-authored manuscript “Ancient Coastal Lines in the Continental Shelf of the State of Ceara, Noartheastern Brazil: Evidence from Chemistry and Sable Isotopes” to be published in the INTERNATIONAL GEOLOGY REVIEW.

As potential reviewers, we would like to suggest the following names:

- (1) Prof. J.D. Milliman, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester, VA, USA; email: milliman@vims.edu
- (2) Claudio Gaucher, Facultad de Ciencias, Universidad de La Prepublica, Montevideo, Uruguay; e-mail: gaucher@chasque.apc.org
- (3) Claudio Ricomini, Institute of Geosciences, University of Sao Paulo (USP), Sao Paulo, SP, Brazil; e-mail: ricomin@usp.br
- (4) Kenitiro Suguio, Institute of Geosciences, University of São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brazil; kenitirosuguio@hotmail.com
- (5) Dilce de Fatima Rossetti, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas, Divisão de Ciências Espaciais, DSR, Rua dos Astronautas 1758, Jardim da Granja, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brazil; e-mail: rossetti@dsr.inpe.br

In the hope that this manuscript meets the high level standards of this prestigious Journal, we avail this opportunity to send you our best regards.

Wanessa Sousa Marques

Department of Geology
Federal University of Pernambuco, Brazil
C.P. 7852, Recife, PE, 50670-000
e-mail: wsmarq@yahoo.com.br

Ancient coastline paper

Sexta-feira, 11 de Julho de 2008 15:26

De:

"Gary Ernst" <wernst@stanford.edu>

Adicionar remetente à lista de contatos

Para:

wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br

Cc:

abond@bellpub.com

Dr. Wanessa Sousa Marques

July 11, 2008

Prof. Alcides Nobrega Sial

Laboratório Núcleo de Estudos de Granitos

Laboratório de Isótopos Estáveis

Departamento de Geologia, UFPE

C. P. 7852, Cidade Universitaria

Recife, PE, 50732-970, BRAZIL

Dear Dr. Marques and Prof. Sial:

Thank you very much for the three paper copies and a CD of your manuscript coauthored with E. A. Menor, V. P. Ferreira, G. S. Sa Freire, E. A. M. Lima and R. L. B. de Souza, entitled "Ancient coast lines in the continental shelf of northeastern Brazil: evidence from sedimentary chemistry and stable isotopes." As you see, I slightly shortened the title for brevity and clarity. This appears to be a scientifically well-documented piece of research. Therefore, I am accepting it for publication in a regular issue of INTERNATIONAL GEOLOGY REVIEW. I did a minor amount of editing of the English exposition, but nothing important. The 10 figures and three tables are OK as is. Figures 3 and 4 are in color, but unless you want to pay for it, they can be done in half-tones without any reduction in textural information. Today I am sending the marked-up manuscript and to Bellwether Publishing. In about 6 months, you should receive PDF files as galley proofs. If you need to communicate with them before receiving proofs, here is the address of IGR:

Dr. Andrew Bond abond@bellpub.com (Andrew Bond)

INTERNATIONAL GEOLOGY REVIEW

Bellwether Publishing Co.

bhayman@bellpub.com (Brian Hayman)

8640 Guilford Road; Suite 200

Columbia, Maryland 21046; U. S. A.

Thanks for sending this interesting manuscript to me for IGR.

W. G. Ernst

U. S. MAIL: Dept. of Geological & Environmental Sciences

Geocorner, Building 320, Room 118

Stanford University; Stanford, CA 94305-2115

e-mail: wernst@stanford.edu

phone: {650} 723-0185

FAX: {650} 725-0979

office: Green Earth Sciences Room 209

<http://pangea.stanford.edu/research/hp-uhp/gary/ernst.html>

FW: Page proofs, International Geology Review

Sexta-feira, 19 de Setembro de 2008 18:01

De:

"Andrew Bond" <abond@bellpub.com>

Adicionar remetente à lista de contatos

Para:

wsmarq@yahoo.com.br

A mensagem contém anexos

Marques et al..pdf (829 KB)

Dear Dr. Marques:

Apologies for using an incorrect email address for you in my previous correspondence below.

Andrew

From: Andrew Bond

Sent: Friday, September 19, 2008 4:37 PM

To: 'smarq@yahoo.com.br'

Cc: 'sial@ufpe.br'

Subject: Page proofs, International Geology Review

Dear Drs. Marques and Sial:

Attached as a pdf file please find page proofs of your paper (with colleagues) on "Ancient Coastlines in the Continental Shelf of the State of Ceara, Northeast Brazil: Evidence from Sediment Chemistry and Stable Isotopes," which will be appearing in a forthcoming issue of International Geology Review. Please read the proofs and send me any corrections by email (indicating page number, left or right column, and line number) or fax by September 29, if possible; the issue in which your article will appear will be sent to the printer at the end of that week. (I will be away from my office and out of email contact from 21 through 28 September, but will respond to all correspondence on 29 September).

Upon publication, I will be sending you copies of the issue in which your article appears, as well as making available a pdf file of the final published version. Thanks for your help. We look forward to publishing your paper soon in International Geology Review.

Sincerely,

Andrew Bond

Managing Editor

Bellwether Publishing, Ltd.

8640 Guilford Road, Suite 200

Columbia, MD 21046

Phone: 410-290-3870

Fax: 410-290-8726

email: abond@bellpub.com

ANCIENT COASTAL LINES IN THE CONTINENTAL SHELF OF THE STATE OF CEARÁ, NORTHEASTERN BRAZIL: EVIDENCE FROM CHEMISTRY AND STABLE ISOTOPES

Wanessa Sousa Marques¹, Alcides Nobrega Sial¹, Eldemar de Albuquerque Menor¹, Valderez Pinto Ferreira¹, George Satander Sá Freire², Enjolras de Albuquerque Medeiros Lima³, Roberto Lúcio Belo de Souza¹

1- NEG-LABISE, Department of Geology, Federal University of Pernambuco, C.P. 7852, Recife,, Brazil, 50670-000, Brazil; wsmarq@yahoo.com.br, sial@ufpe.br, menor@terra.com.br, valderez@ufpe.br, ap/ace2@gmail.com

2- Department of Geology, Federal University of Ceará, C.P. 6011, Fortaleza, Ceará. 60455-970, Brazil; freire@ufc.br

3- Geological Survey of Brazil (CPRM), Av. Sul, 2291, Afogados, Recife, Pernambuco, Brazil, 50770-011; enjolras@re.cprm.gov.br

ABSTRACT

Continental shelf sediments from the state of Ceará, northeastern Brazil, have been studied to investigate meteoric diagenesis on marine sediments of previously-defined ancient coastal lines. Major elements of 131 samples of carbonate sediments and C and O isotope analyses of 51 carapaces samples of benthonic foraminifers of the *Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus* species have been analyzed. Geochemical signatures of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, SiO_2 (stoichiometrically calculated as quartz %), Sr and Mn have evidenced the action of meteoric diagenesis on total sediments from current depths of 25-30m, 45m and 80m. Morphologies of the marine shelf at these depths, interpreted from bathymetric profiles, correspond to holocenic marine terraces. In spite of a recent sedimentary cover, it was possible to confirm that these holocenic terraces possess relict detrital, biogenic and continental material, that have resulted from erosional reworking of ancient coastal lines during the Flandrian transgression.

Keywords: meteoric diagenesis, biogenic carbonates, C and O isotopes, continental shelf, Flandrian transgression

INTRODUCTION

Diagenetic changes in biogenic carbonates are in general accompanied by increase of textural maturity and changes in chemical composition (Hodgson, 1966; Brand and Veizer, 1981; Cícero and Lohmann, 2001). The changes in chemical composition are due to the dissolution-precipitation mechanism in aqueous medium, and factors that interfere the most in the redistribution of chemical species in carbonates are: (1) the stability of the original carbonate phase; (2) the degree of interaction between carbonate and water (closed system, semi-closed or open); (3) difference in chemical compositions between seawater and meteoric water; (4) temperature and salinity of the environment, and vital effects of the species.

In spite of the influence of all these factors, the general tendency of the chemical behavior of the biogenic carbonates, when affected by meteoric diagenesis, point to increase in the iron and manganese contents and decrease of strontium and sodium (Brand and Veizer, 1981). Concurrently, there is a lowering in the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values (Brand and Veizer, op.cit; Nagarajan et al., 2008) which keep positively correlated in carbonate sediments and these isotopic characteristics suggest sub-aerial surface exposure (Allan and Matthews, 1982).

Manganese and $\delta^{18}\text{O}$ values, in general, show reverse behavior in carbonate samples altered by meteoric diagenesis. This results from the fact that meteoric water is usually pedogenic manganese enriched and ^{18}O -empoverished (Li et al., 2007).

Manganese and strontium values are regarded as good indicators of meteoric diagenesis in carbonates. During the chemical changes that occur along the diagenetic stabilization, manganese values tend to increase and strontium values tend to decrease (Brand and Veizer, op.cit).

The continental shelf of northeastern Brazil display ancient coastal lines (Manso et al., 1997). These ancient coastal lines have been constructed during the Flandrian transgression and show relict sediments deposited in mixing zones between sea- and meteoric waters (Freire, op cit). The relict sediments exhibit reworked, ferruginous-stained, quartz grains (França et al. 1976).

This way, ancient coastal lines in continental shelf can be inferred from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, together with textural characteristics of bottom sediments, including its manganese, strontium, iron contents and morphological characteristics of the bottom.

The scope of this study is to detect ancient coastal lines in the continental shelf of the state of Ceará, by means of major, trace and stable isotope geochemistry of total sediments, together with indications of bottom morphology from previous studies.

STUDY AREA

The continental shelf of the state of Ceará (Fig. 1) is shallow, has reduced width (60-80 km), moderate gradient (about de 1m/km, in average), warm water (25-30°C) and high salinity: 30-38‰ (Coutinho, 1992; Behling et al., 2000; Summerhayes et al., 1975). Its geomorphology includes multiple-step ruptures that correspond to ancient coastal lines, a model that is closely associated to sea-level oscillations occurred since the latest glacial period of the Flandrian transgression (Freire, op.cit.). According to Allen (2000), Dabrio et al. (2000), Angulo et al., (2006), Caldas et al. (2006) and Martin et al. (2007), this transgression evolved in a slow and continuous way by transgressive pulses. In the continental shelf of the state of Ceará, these steps are more evident at depths of 80m, depths between 40 and 50 m, and at depths between 20 and 35 m (Freire, op.cit.).

The shelf sediments in the study area are constituted by sand and carbonate gravel formed in situ in lower proportion, by clastic terrigenous provenance and by relict sediments. The carbonate fraction ($\text{CaCO}_3 > 75\%$) predominates beyond 20m depth, in the intermediate and external shelves, being mainly composed by lithothamnium, halimeda, planktonic and benthonic foraminifers and mollusks (Coutinho, 1992; Behling et al., 2000; França et al., 1976). Relict sediments are found in larger quantities in the external shelf, beyond 40 m depth, and show textural reworking as a main characteristic. The terrigenous fraction includes sub-rounded quartz grains with shiny, lustreless or pricked surface, sometimes capped or with fractures filled by iron oxides (Freire, op.cit.).

METHODS

In this study, one hundred-thirty points of the continental shelf of Ceará have been sampled. Sampling was done with oceanographic dredging, during GEOMAR XVIII operations (November, 1981) and GEOMAR XXI (November, 1983), onboard of the oceanographic Almirante Câmara ship, of the Brazilian Navy. All samples have been washed with deionized water, dry at room temperature, and kept in plastic bags. The initial analytical procedure consisted of homogenization and splitting, and after that an aliquot of each sample was taken for grinding in a porcelain mortar, 100% going through 100-mesh sieve. From each aliquot, 5g have been taken for chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF).

For the XRF analysis, powdered samples have been previously dried at 110°C during 6 hours, and next calcined at 1000°C during couple of hours in an electrical furnace for determination of loss in ignition. A fused bead was made for each calcined sample, using lithium tetraborate as a flux. The analyses were performed with a XRF unit model Rigaku RIX 3000, equipped with Rh tube, using calibration prepared with international reference material.

Thirty X-ray diffraction analyses (XRD) of samples of total sediments have been performed using a Siemens D5000 unit, with $\text{KCu}\alpha$ emission, scanning of 2 to 45 θ , under a scan speed of

10/min. Two samples from each selected bathymetric levels (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 and 80 meters) have been chosen for XRD analyses.

The Mg contents of calcites have been calculated from XRD analysis according to Goldsmith and Graf (1958), using the positions ($I=100$) of low quartz (3.34Å) or of aragonite (3.396Å) for drift correction, and corrected peak measurements of low-Mg or high-Mg calcite.

For C and O isotope analyses, 4 mg of benthonic foraminifer tests from fifty one samples of *Amphistegina radiata* and *Peneroplis planatus* species, from the continental shelf have been selected. Each sample was left to react with orthophosphoric acid during 12 hours, at 25°C. CO₂ released from this reaction was extracted in a conventional high-vacuum extraction line, cryogenically clean, according to Craig's method (1957) and C and O were analyzed in a dual inlet, triple collector SIRA II mass spectrometer, in the stable isotope laboratory (LABISE) of the Department of Geology of the Federal University of Pernambuco. Isotopic compositions were obtained by running CO₂ samples against the Borborema skarn calcite (BSC) reference gas, previously calibrated against NBS-19 and NBS-20, with an analytical precision of 0.1‰, based on multiple analyses of the BSC standard. Results are reported in delta ‰_{PDB} notation.

Stoichiometric quartz was calculated from average compositions of kaolinites according to Weaver and Pollard (1973) assuming that kaolinite is the predominating clay mineral in soils of the coastal regions of northeastern Brazil (Summerhayes et. al., 1975). $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and quartz % have been calculated according to averages, including data with averages two meters above and two meters below in relation to the spotted depth.

RESULTS AND DISCUSSION

The presence of quartz in shelf sediments is basically due to mechanical dispersion of this mineral through fluvial plumes, or to sea water abrasion directly on the coast, being eolian erosion usually an accessory contribution. Although this may reach considerable distances, its origin can be defined by morphoscopic analysis of the grains (Timireva and Velichko, 2006).

Normally, the concentration and dimension of quartz grains in shelf sediments rapidly decrease ocean inwards. Although in the continental shelf of the state of Ceará, quartz sands (quartz \geq 80%) are found at depths of 25m and 45m (Fig. 2), coinciding with geomorphological marks recognized by Freire (op.cit). In depths beyond 25m, the presence of quartz rapidly decreases, considering samples chemically analyzed in this study. Beyond 65meter depths, the presence of quartz is merely accessory (< 2%), passing to 3% at 80 meters. In this external portion of the shelf, the presence of quartz corresponds mainly to the biogenic contribution of spicules of siliceous organisms sedimented on the submarine floor, as well as grains transported by the wind (Figs. 3 and 4).

The difficulty of locating sedimentary records of geomorphological marks of ancient coastal lines (e.g. 20,000 BP) has as an obstacle a possible total covering of these records by subsequent sedimentation, particularly if sedimentation rates are elevated in the shelf under consideration. In fact, even under regional sedimentation rate of 14cm/1000 years, defined by Behling et al. (2000) for marine shelves in northeastern Brazil, these features would be today covered by almost 3 meters of more recent sediments. However, one observes a small inflection in the variation curve of quartz % at 80m depth, influenced by one sample (n. 127) with important partition of this mineral (12%). In another samples that have not been chemically analyzed (e.g. sample GI-29), it has been detected, by XRD, expressive presence of quartz at 80m depth. These are meaningful data and suggest that, with some luck, sample dredging at this depth level can spot well-exposed, under-exposed or reworked zones of ancient coastal line.

With respect to the isotope data, the general behavior of $\delta^{18}\text{O}$ shows decreasing average values from 15 to 80m depths (Fig. 2). This, in principle, indicates a cooling of water with depth, phenomenon amply recognized in oceanography (Chester, 2000) and, in the present case, well-registered isotopically in carbonates of carapaces of benthonic species *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus*. As $\delta^{18}\text{O}$ values also suffer influence of mixing of continental water (^{16}O enriched) in marine environments (Li et.al., op.cit.), little inflections at 30 and 45m depths, displaying average $\delta^{18}\text{O}$ values slightly lower, suggesting relicts of benthonic species in these levels. These $\delta^{18}\text{O}$ values may resulted from meteoric diagenesis when, according to Brand and Veizer (1981), tend to decrease.

Likewise, $\delta^{13}\text{C}$ values decrease, in a general way, since 15m to 80m depths, with a lower average value at the 45m depth, followed by an increase at 50m depth, reaching a minimum value at the depth of 80m. The $\delta^{13}\text{C}$ values not always accompany those of $\delta^{18}\text{O}$ in cases of meteoric diagenesis, since not always meteoric waters derive uniquely from soils (Brand and Veizer, 1981).

The isotope behavior always faces a duality of interpretation: (a) for $\delta^{18}\text{O}$, water temperature and influence of continental water; (b) for $\delta^{13}\text{C}$, organic productivity and continental water influx. Interpretation can become a bit more complicated if there was a mixing of present-day sediments with relict carbonate sediments. Even so, there is a positive correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values (Fig. 5), and two groups of isotope behavior, are individualized if the benthonic species are considered: **(A)** carbonates from benthonic foraminifers, with influence of continental waters; and **(B)** carbonates from benthonic foraminifers, with influence of water temperature.

The group **A** is characterized by lower $\delta^{13}\text{C}$ values ($< 1.5 \text{ ‰}$) resulting from the mixing with continental waters, confirmed by lower $\delta^{18}\text{O}$ values ($< -1 \text{ ‰}$). This group evidences marine sedimentation environments with strong evidence of continentality. High $\delta^{13}\text{C}$ values of biogenic carbonates imply high biological productivity (Wynn and Read, 2007) and vice versa. In the case of

group A, its lower productivity is related to restrictive factors of continental waters as excessive turbidity that limits photosynthetic reactions. The group B is characterized by higher $\delta^{13}\text{C}$ values ($> 1.5 \text{ ‰}$) and $\delta^{18}\text{O}$ ($> -1 \text{ ‰}$) as a result of the association of temperature and productivity.

Regarding the behavior of strontium, this presents high concentration coefficient in carbonate minerals, especially aragonite, where values between 6,000 and 10,000 ppm may be reached (Tucker and Wright, 1990). In carbonate sediments of the continental shelf of the state of Ceará, Sr average values vary from 500 to 4,500 ppm. In these sediments, paragenesis of carbonate minerals include, besides aragonite, low-Mg calcite and high-Mg calcite (Mg diadochy in the order of 20 to 30%). Higher Sr contents are usually an indication of predominant or important aragonite fraction in the composition of the total sediment, likely a consequence of representative participation mineralogically-preserved phyla under this meta-stable form of calcium carbonate. Among these phyla figure species that have shallow-water habitat as Halimeda, an abundant alga in this area of study, but not essentially an indicator of marine terraces. In any event, the highest average Sr content is observed at 45m depth (Fig. 6) and, in fact according to XRD analyses aragonite is relatively abundant in this depth level (Fig. 7). Subordinate aragonite occurs at depths beyond 60m associated to low or high Mg-calcites and at 80m, with the presence of quartz (Fig. 8). In this case, the paragenesis suggests mixing of biota, likely non-contemporaneous, and possibility of reworked detrital quartzous material, remaining from ancient coastal terraces.

Regarding manganese, average contents are markedly more elevated (190 ppm) at 10m depth (Fig. 9) that corresponds to the influx of pedogenic particules and sedimentation of this chemical species through riverine influxes. Towards the ocean, Mn concentrations rapidly decrease and stabilize around approximately 70 ppm, with a slight decrease to 60 ppm in the isobaths of 70-80m. Apparently, the Mn contents of the studied shelf sediments do not delimit Flandrian coastal terraces, except at the level of 45m depth, where some enrichment factor has elevated its average concentration to 110 ppm. In this case, the 45m depth is distinguished, in consonance, by more elevated Sr and Mn average values, and not by divergent values, as pointed out by Brand and Veizer (1981) for cases when meteoric diagenesis occurs. This divergence is due to the fact that, with the evolution of the Flandrian transgression, the coastal terrace of the time, that is now 45m deep, is submitted to a process of sedimentary accumulation with differentiate physical-chemical conditions causing, therefore, overlapping of sediments deposited at different geochemical conditions. There is, in consequence, an accumulation of biogenic carbonates, with strong presence of aragonite (Sr-enriched carbonate) in the middle and external portions of the continental shelf.

Iron oxide average content (Fig. 10), likewise manganese, presents a marked value at 10m depth (0.6% Fe_2O_3) that, by its identical provenance, results from the contemporaneous influx of continental pedogenic sediments. Considering a 0.1% Fe_2O_3 background, several depth levels (25,

35, 45, 60 and 80m) present some Fe-enrichment, calling the attention the 35m depth (0.4 % Fe₂O₃). Although there is some agreement at some depth levels where bottom morphologies are compatible with marine terraces, or ancient coastal lines, the Fe₂O₃ content data display mechanical scattering of iron a lot ampler than for Mn.

CONCLUSIONS

Meteoric diagenesis has been evidenced in bottom sediments of the shelf of the state of Ceará, at bathymetric levels where there are relict sediments corresponding to reworking of holocenic coastal lines: 20-25m, 45m and 80m. This evidence includes, in these depth levels, more elevated average silica free contents (quartz %), Mn and Fe, in total sediment, associated to lower $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in carbonate carapaces of benthonic foraminifer of the *Amphistegina radiata* e *Peneroplis planatus* species. Associated to these geochemical features, a paragenesis of Mg-calcites with distinct degrees of Ca⁺⁺ for Mg⁺⁺ diadochy, is eventually associated particularly to bathymetric domains of 80m. The combination of all these geochemical and mineralogical parameters is not always complete, due to mixing of contemporaneous and relict sediments, the former being formed under distinct environmental conditions in relation to the latter, due to the evolution of the Flandrian transgression, still in progress today.

ACKNOWLEDGMENTS

We want to express our gratitude to Gilsa M. Santana and Vilma S. Bezerra for assistance with the stable isotope analyses in this study. Thanks are also due to the LGMA for cession of some samples used in this study. A last word of thanks goes to CAPES for a scholarship granted to WSM. This is the NEG-LABISE contribution n 250.

REFERENCES

- Angulo R.J., Lessa G.C. and Souza M.C. 2006. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25: 486-506.
- Allen J. R. L. 2000. Late Flandrian (Holocene) tidal palaeochannels, Gwent Levels (Severn Estuary), SW Britain: character, evolution and relation to shore. *Marine Geology*, 162: -380.
- Al lan J.R. and Matthews R.K. 1982. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. *S Sedimentology*, 29: 797-817.
- Behling H., Arz W.H., Pätzold J., Wefer G. 2000. Late quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB3104-1. *Quaternary Science Reviews*, 19: 981-994
- Brand U. and Veizer J.1981. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate sistem-2: stable isotopes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(03): 987-997a
- Caldas L.H.O., Statterger K. and Vital H. 2006. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, 228: 39-53
- Chester R. 2000. *Marine Geochemistry*. London, Blackwell Sci., 491 p.

- Cícero A.D. and Lohmann. 2001. Sr/Mg variation during rock-water interaction: Implications for secular changes in the elemental chemistry of ancient seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 65:741-761.
- Coutinho P.N. 1992. Sedimentos carbonáticos da plataforma continental brasileira. *Revista de Geologia UFC, Fortaleza*, 6: 65-73.
- Craig, H. 1957. Isotope standard for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometry analysis of carbon dioxide. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 12:133–149.
- Dabrio C.J., Zazo C., Goy J.L., Sierro F.J., Borja F., Lario J., González J.A. and. Flores J.A. 2000. Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression (Gulf of Cadiz, SouthernSpain). *Marine Geology*, 162: 381-404
- França A.M.C., Coutinho P.N., Summerhayes C.P. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. 6:71-88.
- Freire G.S.S. 1985. Geologia marinha da plataforma continental do Ceará. Dissertação de mestrado em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Recife, 132 p.
- Goldsmith J.R. and Graf D.L. 1958. Relations between lattice constants and compositions of the Ca-Mg carbonates. *Amer. Mineralogist*, 43: 84-101.
- Hodgson W.A.1966. Carbon and oxygen isotope ratios in diagenetic carbonates from marine sediments. *Geochimi. et Cosmochim. Acta*, 30: 1223-1233
- Li J.W., Vasconcelos P., Duzgoren-A.N., Yan D.R., Zhang W., Deng X.D., Zhao X.F., Zeng Z.P. and Hu M.A. 2007. Neogene weathering and supergene manganese enrichment in subtropical South China: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ approach and paleoclimatic significance *Earth and Plan. Sci. Letters*, 256: 389-402.
- Manso V.A.V., Corrêa I.C.S., Barros C.E., Baitelli R. 1997. Sedimentologia da Plataforma Continental entre Aracaju (SE) e Maceió (AL). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 69: 505-520.
- Martin R.E., Leorri E. and McLaughlin P.P. 2007. Holocene sea level and climate change in the Black Sea: Multiple marine incursions related to freshwater discharge events. *Quaternary International*, 167-168: 61-72.
- Nagarajan R., Sial A.N., Altrin J.S.A., Madhavaraju J., Nagendra R. 2008. Carbon and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima basin, Karnataka, southern India. *Revista Mexicana de Ciências Geológicas*. 25 (02): 225-235.
- Summerhayes C.P., Coutinho A.P.N., França M.C., Ellis J.P. 1975. Uppon continental margin sedimentation of Brazil. *Contrib Sedimentology* 4:44-78.
- Timireva S.N. and Velichko A.A. 2006. Depositional environments of the Pleistocene loess-soil series inferred from sand grain morphoscop - A case study of the East European Plain. *Amsterdam, Quaternary Intern.*, 152-153:136-145.
- Tucker M.E. and Wright V.P. 1990. Carbonate sedimentology. London, Blackwell Sci. Publ., 421 p.
- Weaver C.E. and Pollard L.D. 1973. The chemistry of clay minerals. Amsterdam. Elsevier. *Dev. Sedim.* 15, 187p.
- Wynn T. C and. Read J. F. 2007. Carbon–oxygen isotope signal of Mississippian slope carbonates, Appalachians, USA: A complex response to climate-driven fourth-order glacio-eustasy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 256 (6): 254-272.

FIGURE CAPTIONS

FIGURE 1. Location of the study area and of samples analyzed for C and O isotopes.

FIGURE 2. Variations of ΔSiO_2 (quartz %), $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ for sediments from the continental shelf according to depth.

FIGURE 3. Spicules of siliceous organisms in residual material from sample VH-3126 (80m depth) after etching with 10% N HCl. Observation under LN/40x magnification.

FIGURE 4. Angular quartz grains in residual material from sample VH-3126 (80m depth) after etching with 10% N HCl. Observation under LN/200x magnification).

FIGURE 5. Scatter diagram of $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^{13}\text{C}$. Isotopic A and B clusters for carbonates of benthonic species: *Amphistegina radiata* e and *Peneroplis planatus*.

FIGURE 6. Variation of average Sr contents in continental shelf carbonate sediments.

FIGURE 7. X-ray diffractogram for sample G2-104 (45m depth).

FIGURE 8. X-ray diffractogram for sample GI-29 (80m depth).

FIGURE 9. Variation of Mn contents in continental shelf carbonate sediments.

FIGURE 10. Variation of average Fe_2O_3 contents in continental shelf carbonate sediments.