



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ANTONIO BORGES DE AGUIAR NETO

**OCORRÊNCIAS DE MINERAIS PESADOS NA PLATAFORMA CONTINENTAL
INTERNA/MÉDIA OESTE DO CEARÁ**

FORTALEZA
2015

ANTONIO BORGES DE AGUIAR NETO

**OCORRÊNCIAS DE MINERAIS PESADOS NA PLATAFORMA CONTINENTAL
INTERNA/MÉDIA OESTE DO CEARÁ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia.

Área de Concentração: Geologia
Linha de Pesquisa: Geologia Marinha e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. George Satander Sá Freire

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

A227o Aguiar Neto, Antônio Borges de.
Ocorrências de Minerais Pesados na Plataforma Continental Interna/Média Oeste do Ceará / Antônio Borges de Aguiar Neto. – 2015.
116 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Geologia.
Orientação: Prof. Dr. George Satander Sá Freire.

1. Sedimentologia. 2. Plataforma Continental. 3. Minerais pesados. I. Título.

CDD 551

ANTONIO BORGES DE AGUIAR NETO

**OCORRÊNCIAS DE MINERAIS PESADOS NA PLATAFORMA CONTINENTAL
INTERNA/MÉDIA OESTE DO CEARÁ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia.

Área de Concentração: Geologia

Linha de Pesquisa: Geologia Marinha e Ambiental.

Aprovada em: 04/02/2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Satander Sá Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Maamar El Robrini
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Dr^a Wanessa Marques Sousa
Serviço Geológico do Brasil (CPRM – Residência de Fortaleza)

Prof^a Dr^a Diolande Ferreira Gomes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Wellington Ferreira da Silva Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais Diana e Francisco, a toda a minha família e em especial ao meu avô Antônio Borges (em memória).

AGRADECIMENTOS

A Deus por me acompanhar nessa jornada e me fortalecer a cada dia.

À minha família por todo apoio e compreensão em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. George Satander Sá Freire pela orientação nessa tese e pela presença durante toda minha vida acadêmica.

Aos membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Maâmar El Robrini, Dr^a Wanessa Marques de Sousa, Prof^a Dr^a Diolande Ferreira Gomes e Prof. Dr. Wellington Ferreira da Silva Filho, pelas contribuições e sugestões que enriqueceram o conteúdo dessa tese.

Ao Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto pela colaboração durante o doutorado e por disponibilizar o Laboratório de Microscopia de Varredura. Obrigado Alisson e Ricardo pelo apoio das análises no MEV.

Ao Prof. Dr César Ulisses Vieira Veríssimo por permitir a utilização do eletroímã no Laboratório de Geotécnica.

Ao Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Júnior pelas contribuições no exame de Qualificação.

Aos revisores das revistas Geociências da UNESP, Geologia USP – Série Científica e Pesquisas em Geociências da UFRGS pelas considerações nos manuscritos que integram essa tese.

À CAPES, pelo apoio nessa pesquisa por meio da bolsa de doutorado.

Ao meu irmão Márcio pela grande ajuda nos trabalhos de campo.

Ao meu amigo Neto pela colaboração na revisão ortográfica dessa tese.

Aos amigos do Laboratório de Geologia Marinha: Claudinha, Fernando, João, Inácio, Daniel, Isabelly, Karen e Narelle, pelos bons momentos vividos.

Aos meus amigos Sara, Raquel, Valdiana, Márcia, Rudem e Will pelos momentos de descontração e por sempre torcerem por mim.

A todos do Departamento de Geologia que me apoiaram durante esses quatro anos.

“Tentar compreender a natureza é fascinante e desafiador. Quanto mais chegamos perto de uma resposta, mais somos surpreendidos por outros acontecimentos. É o Criador regendo absoluto todas as coisas.” (Antônio B. Aguiar Neto)

RESUMO

Este estudo abrange a plataforma continental oeste do Ceará (147 amostras de sedimentos marinhos) e dois cursos fluviais (4 amostras de sedimentos dos rios Curu e São Gonçalo) para determinar a distribuição dos minerais pesados com suas possíveis proveniências e potencial econômico. Distinguiram-se as fácies sedimentares da plataforma continental pela granulometria e teor de carbonato de cálcio. Os minerais pesados foram investigados pelos seus teores totais (%), abundâncias relativas (%) de cada espécie mineral, teores em Kg/ton das espécies predominantes, índices mineralógicos (RZi e ZRT) e imageamento dos grãos por MEV-EDS. No geoprocessamento obteve-se a espacialização dos dados pelo Arcgis 10.1 e informações da morfologia de fundo da plataforma continental com o Surfer 10. Incluíram-se análises multivariadas por meio do Statistica 7.0 para auxiliar na interpretação dos resultados. Os minerais pesados se concentraram na folha Fortaleza (teores de até 4,54%) em até 20 m de profundidade e nos domínios das areias litoclásticas e litobioclásticas. Dentre as 18 espécies minerais identificadas, a ilmenita e a turmalina foram as que abrangeram a maior parte da plataforma continental e juntamente com epídoto e monazita apresentaram teores > 1 Kg/ton próximo à costa de São Gonçalo do Amarante. Foram identificados paleocanais e antigas linhas de praia. A ocorrência da paragênese mineral típica de metamorfismo regional de rochas ricas em alumínio sugere a proveniência das rochas do Complexo Ceará (fonte primária) que ocorrem tanto próximo à costa como afloram diretamente na plataforma continental. Sedimentos retrabalhados da Formação Barreiras, areias pretas praias e sedimentos de deriva litorânea (fontes secundárias) contribuem regionalmente no aporte de minerais pesados. O Rio Curu exerce influência no aporte de ilmenita, turmalina e epídoto. As análises multivariadas e as variações de RZi e ZTR corroboraram com a proveniência de natureza dual (primária e secundária) dos sedimentos plataformais, além de expor uma mistura de sedimentos recentes com sedimentos retrabalhados mais antigos.

Palavras-chave: Pláceres marinhos. Proveniência. Sedimentologia. Plataforma Continental

ABSTRACT

This study embraces the west continental shelf of Ceará (147 samples of marine sediments) and two fluvial courses (4 sediment samples of Curu and São Gonçalo rivers) to determine heavy minerals distribution with their possible provenances and economic potential. Sedimentary facies on the continental shelf were distinguished through the particle size and calcium carbonate content. Heavy minerals were investigated for their total content (%), relative abundance (%) of each mineral species, concentration in Kg/ton of predominant species, mineralogical index (RZi and ZRT) and grains imaging by SEM-EDS. In geoprocessing obtained the spatial distribution of data by Arcgis 10.1 and Surfer 10 got informations about bottom morphology of the continental. Multivariate analysis were included using Statistica 7.0 to aid in the interpretation of results. Heavy minerals were concentrated in Fortaleza chart (contents reached to 4.54%) at depths until 20 m in the litoclastic and litobioclastic sands. Among the 18 mineral species identified, ilmenite and tourmaline were embracing most of the continental shelf and with epidote and monazite presented content > 1 Kg/ton near São Gongação do Amarante coast. Paleochannels and ancient beach-ridge were identified. The occurrence of typical regional metamorphic mineral paragenesis of rocks rich in aluminum suggests the provenance of Ceará Complex rocks (primary source) that occur both near the coast and outcrops directly on the continental shelf. Reworked sediments of Barreiras Formation, beach black sands and longshore drift sediments (secondary sources) contribute regionally in heavy mineral supply. Curu river influences ilmenite, tourmaline and epidote supply. Multivariate analyzes and RZi/ZTR variations corroborated with the dual nature provenance (primary and secondary) of the continental shelf sediments and expose a mixture of recente sediments with older reworked ones.

Keywords: Marine placers. Provenance. Sedimentology. Continental Shelf

LISTA DE FIGURAS

Figura 1A -	Processos que controlam a assembleia de minerais pesados durante o transporte e a deposição dos sedimentos.....	11
Figura 1B -	Mapa de localização e de pontos da área de estudo.....	14
Figura 1.2 -	Modelo empírico do processo de acumulação de minerais pesados.....	18
Figura 2.3 -	Locais de coleta dos sedimentos fluviais nos rios Curu (A – montante e B – jusante) e São Gonçalo (C – montante e D – jusante).....	20
Figura 3.1.2 -	Área da Plataforma Continental Oeste Cearense com articulação das cartas e pontos de amostragem.....	29
Figura 3.1.2.3 A -	Variograma ajustado na modelagem da morfologia de fundo da plataforma continental estudada.....	33
Figura 3.1.2.3 B -	Malha amostral para geração do MDT da plataforma continental estudada.....	33
Figura 3.1.3.1 -	Mapa de fácies da plataforma continental estudada	35
Figura 3.1.3.2 -	Modelo Digital do Terreno da plataforma continental estudada.....	36
Figura 3.1.3.3 A -	Mapa geológico continental e percentual total de minerais pesados na plataforma continental oeste cearense.....	37
Figura 3.1.3.3 B -	Distribuição de minerais pesados da folha Bitupitá..	39
Figura 3.1.3.3 C -	Distribuição de minerais pesados da folha Acaraú..	39
Figura 3.1.3.3 D -	Distribuição de minerais pesados da folha Itarema.	39
Figura 3.1.3.3 E -	Distribuição de minerais pesados da folha Fortaleza.....	40
Figura 3.1.4 A -	Sismograma próximo ao Porto do Pecém onde os refletores indicam o topo do embasamento com camadas de areias calcíferas.....	42
Figura 3.1.4 B -	Grãos de minerais pesados imageados em MEV....	43
Figura 3.1.4 C -	Dendograma da assembleia de minerais pesados da plataforma continental oeste do Ceará.....	45
Figura 3.1.4 D -	ACP da assembleia de minerais pesados da plataforma continental oeste do Ceará.....	46
Figura 3.1.4 E -	Zircão eudral (A) e arredondado (B), ao longo do litoral de São Gonçalo do Amarante.....	47
Figura 3.2.1.1 -	Geologia continental e localização da área de estudo.....	57
Figura 3.2.2.2 -	Sedimentação plataformal na área de estudo e seu entorno.....	59
Figura 3.2.4.1 -	Distribuição dos sedimentos pelo diâmetro médio dos grãos na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	62
Figura 3.2.4.2 -	Modelo digital de fundo da plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	63

Figura 3.2.4.3 -	Distribuição dos pláceres na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	65
Figura 3.2.5 A -	Entalhes na plataforma continental e perfil paralelo à costa evidenciando o paleovale do Rio Curu.....	66
Figura 3.2.5 B -	Grãos de ilmenita, turmalina, monazita e epidoto. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	67
Figura 3.2.5 C -	Grãos de ilmenita enriquecidos em titânio. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e composição química por sistema de dispersão de energia (EDS).....	68
Figura 3.2.5 D -	Pláceres marinhos com teores de ilmenita, turmalina, epidoto e monazita acima de 1 Kg/ton....	69
Figura 3.3.1 A -	Processos que controlam a assembleia de minerais pesados durante o transporte e deposição.....	77
Figura 3.3.1 B -	Mapa geológico e pontos de amostragem de sedimentos plataformais e fluviais entre Caucaia e Trairi.....	78
Figura 3.3.2.2 -	Locais de coleta dos sedimentos fluviais nos rios Curu (A – montante e B – jusante) e São Gonçalo (C – montante e D – jusante).....	81
Figura 3.3.3.1 -	Mapa faciológico da área da plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	85
Figura 3.3.3.2 -	Modelo digital de fundo da plataforma continental entre Caucaia e Trairi, CE.....	86
Figura 3.3.3.3.1 A	Distribuição dos pláceres na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	87
Figura 3.3.3.3.1 B	Distribuição dos minerais pesados na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	89
Figura 3.3.4 A -	Sismograma próximo ao Porto do Pecém onde os refletores indicam o topo do embasamento com camadas de areias calcíferas.....	93
Figura 3.3.4 B -	Grãos de minerais pesados imageados em MEV....	95
Figura 3.3.4 C -	Variação do RZi na plataforma continental e nos sedimentos fluviais entre Caucaia e Trairi.....	96
Figura 3.3.4 D -	Zircão euedral (A) e arredondado (B), que ocorrem em amostras bem próximas ao longo do litoral de São Gonçalo do Amarante.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.2 -	Principais ocorrências mundiais de pláceres.....	16
Tabela 3.1.3.3 -	Dados estatísticos (%) das espécies minerais identificadas na plataforma continental oeste do Estado do Ceará.....	38
Tabela 3.1.4 -	Análise de fatores das espécies minerais identificadas na plataforma continental oeste do Estado do Ceará.....	48
Tabela 3.2.4.1 -	Parâmetros granulométricos dos sedimentos plataformais em Caucaia e Trairi.....	61
Tabela 3.2.4.3 -	Assembleia de minerais pesados na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	64
Tabela 3.3.3.1 A -	Parâmetros granulométricos dos sedimentos plataformais entre Caucaia e Trairi.....	84
Tabela 3.3.3.1 B -	Parâmetros granulométricos dos sedimentos fluviais dos rios Curu e São Gonçalo.....	84
Tabela 3.3.3.3.1 -	Percentuais de minerais pesados na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.....	88
Tabela 3.3.3.3.2 -	Assembleia de minerais pesados nos sedimentos fluviais entre Caucaia e Trairi.....	90

SUMÁRIO

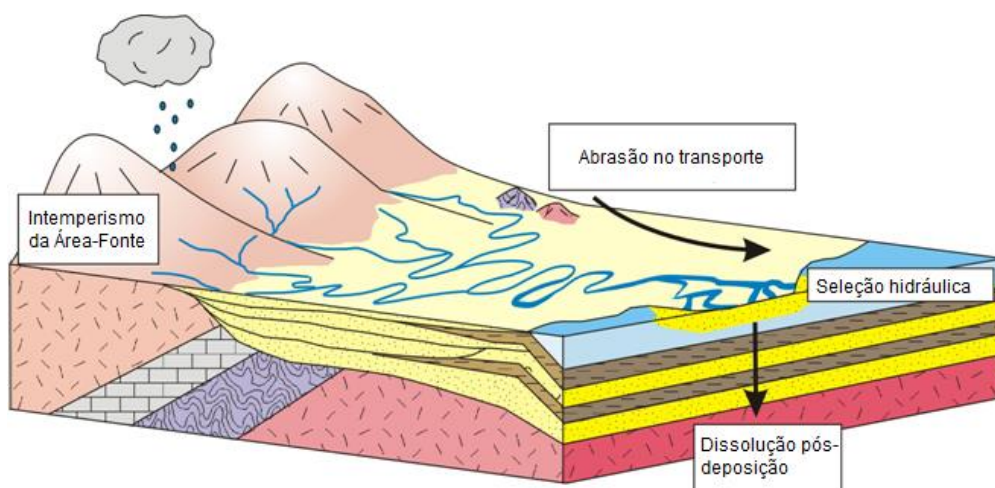
1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	15
1.1.1 <i>Geral</i>	15
1.1.2 <i>Específicos</i>	15
1.2 Estado da Arte	16
2. MATERIAIS E MÉTODOS	19
2.1 Levantamento bibliográfico	19
2.2 Aquisição das amostras de sedimento plataformais	19
2.3 Etapa de campo	19
2.4 Etapa de laboratório	20
2.5 Etapa de escritório	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1 Primeiro Artigo	25
3.1.1 <i>Introdução</i>	26
3.1.2 <i>Área, materiais e métodos</i>	28
3.1.3 <i>Resultados</i>	34
3.1.4 <i>Discussão dos resultados</i>	40
3.1.5 <i>Conclusões</i>	48
3.2 Segundo Artigo	53
3.2.1 <i>Introdução</i>	54
3.2.2 <i>Caracterização da área de estudo</i>	57
3.2.3 <i>Materiais e métodos</i>	59
3.2.4 <i>Resultados</i>	61
3.2.5 <i>Discussões</i>	65
3.2.6 <i>Conclusões</i>	70
3.3 Terceiro Artigo	75
3.3.1 <i>Introdução</i>	76
3.3.2 <i>Materiais e métodos</i>	80
3.3.3 <i>Resultados</i>	83
3.3.4 <i>Discussões</i>	91
3.3.5 <i>Conclusões</i>	99
4. CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES	103
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE A – PONTOS COLETADOS AO LONGO DA PLATAFORMA CONTINENTAL OESTO DO CEARÁ	109
APÊNDICE B – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS MINERAIS PESADOS	113
ANEXOS – COMPROVANTES DE ACEITE/SUBMISSÃO DOS ARTIGOS	114

1. INTRODUÇÃO

A distribuição mundial desigual de recursos minerais no continente, a constante demanda por matéria-prima na indústria e a importância crescente na proteção e conservação dos ambientes impulsiona o conhecimento dos depósitos minerais marinhos, aumentando o significado futuro dos mesmos. Os recursos minerais em terra tendem a escassez, dessa forma, é necessário um avanço nas pesquisas com depósitos minerais marinhos no intuito de conhecer sua distribuição, gênese, abundância e potencialidades.

Os minerais pesados (densidade $> 2,65$) podem formar acumulações sedimentares de valor econômico. A partir da decomposição e erosão de rochas-fonte, quer sejam ígneas, metamórficas ou sedimentares, esses minerais são concentrados mecanicamente originando os depósitos do tipo plácer. Os grãos que se originaram no continente podem ser transportados para os oceanos por processos glaciais, fluviais e eólicos, onde sofrem retrabalhamento e concentração por processos marinhos (energia de ondas, transgressões e regressões, etc). Segundo Morton e Hallsworth (1994) há quatro processos que são capazes de modificar a assembleia de minerais pesados durante o transporte e deposição: intemperismo da área-fonte, abrasão durante o transporte, selecionamento hidráulico dos grãos e dissolução pós-deposição de minerais instáveis em profundidade pelos processos diagenéticos (Figura 1A).

Figura 1A – Processos que controlam a assembleia de minerais pesados durante o transporte e a deposição dos sedimentos.



Fonte: Modificado de Morton e Hallsworth (1994).

Os pláceres marinhos têm íntima relação com as variações eustáticas do nível do mar que abrangeram todo o período Quaternário, oscilando entre exposição das plataformas continentais e afogamento das mesmas (Kudrass, 2000; Silva, 2000; Lalomov & Tabolitch, 2000; Gent *et al.*, 2005; Cascalho *et al.*, 2007; Tomazzoli *et al.*, 2007; Corrêa *et al.*, 2008; Addad, 2010; Cavalcanti, 2011).

Durante as glaciações ocorreu exposição de plataformas continentais devido ao rebaixamento do nível do mar. Rios foram capazes de esculpir canais e depositar sedimentos nas plataformas continentais expostas. Nos períodos de degelo, o nível do mar elevou-se e os sedimentos fluviais foram retrabalhados formando os depósitos onde se concentraram minerais pesados originando os pláceres.

Como resultado uma notável quantidade de pláceres foram formados em períodos de nível de mar baixo, em locais classificados como vales fluviais afogados e antigas linhas de praias. Alguns desses depósitos, especialmente os ocorrentes na plataforma continental interna, são retrabalhados e redistribuídos pela hidrodinâmica atual.

O destaque para pláceres de valor econômico vai para os de ilmenita, rutilo, zircão, monazita, magnetita, cassiterita, ouro e diamante. Ferro, titânio, tório, zinco e outros metais estratégicos associam-se a esses pláceres que podem ser passíveis de exploração (SOUZA e ABREU, 2005, p.1).

Segundo Santana (1997), ocorrem sítios com elevadas concentrações de minerais pesados em depósitos emersos desde a costa do Pará até a do Rio Grande do Sul, contudo, nos depósitos imersos, como a plataforma continental, a literatura ainda é insuficiente para detalhar as espécies minerais predominantes, suas concentrações e áreas de distribuição no ambiente marinho.

A plataforma continental do Ceará já foi objeto de estudo de vários autores (Barreto *et al.*, 1975; França *et al.*, 1976; Freire, 1985; Tintelnot, 1996; Lacerda e Marins, 2006; Aguiar *et al.*, 2007; Marques *et al.*, 2008; Nascimento *et al.*, 2009; e outros), contudo poucos trabalhos abordam os minerais pesados. Alguns dos trabalhos pioneiros sobre esses depósitos na plataforma continental cearense (França *et al.*, 1976; Barreto *et al.*, 1975) constataram locais com ocorrência abundante de minerais pesados, sendo denominados de províncias: a província da

cianita até o delta do rio Jaguaribe; a província da hornblenda para o restante das praias e dunas de Fortaleza, predominando entre os opacos nas duas províncias a ilmenita; e na região entre a fronteira do Estado do Piauí e a foz do rio Acaraú, foi encontrado uma predominância de granada, hornblenda, turmalina e epídoto.

Segundo Palma (1979), quando as concentrações dos minerais pesados são maiores que 1% em relação à fração granulométrica estudada, podem se tornar economicamente viáveis para a exploração. Um trabalho mais recente de Almeida *et al.* (2011) na plataforma continental oeste do Ceará revelou concentrações de até 9% de minerais pesados com predominância de ilmenita.

De acordo com o sumário mineral do DNPM (2013) cerca de 88% da produção mundial de titânio provém da ilmenita, mineral de titânio mais comum, enquanto que o restante vem do rutilo. As reservas lavráveis brasileiras de ilmenita e rutilo representam menos de 0,3% das reservas mundiais, um outro agravante para a economia brasileira foi as exportações corresponderem a menos de 10% do valor das importações desse minério para o ano de 2012. Esse fato ocasionou um déficit na balança comercial de titânio e derivados de US\$ 584,5 milhões.

A pesquisa com minerais pesados tem grande relevância na exploração dos recursos geológicos, principalmente na mineração, contudo, os desafios a serem vencidos no aproveitamento de pláceres marinhos são consideráveis. Reduzir os custos de produção e as restrições ambientais dessa atividade são uns dos principais obstáculos que dificultam a competição desses recursos com os minerais extraídos no continente.

Além da finalidade econômica o estudo dos minerais pesados tem outras aplicabilidades como exemplificou Suguio (2003): importante ferramenta em estudos de proveniência sedimentar, correlação paleogeográfica e histórias do intemperismo e transporte. Addad (2010) relata ainda a capacidade dos minerais pesados como indicadores diretos de mudança climática. Durante alternâncias climáticas ficam marcadas as variações populacionais desses minerais pela diluição ou resistência a esses eventos.

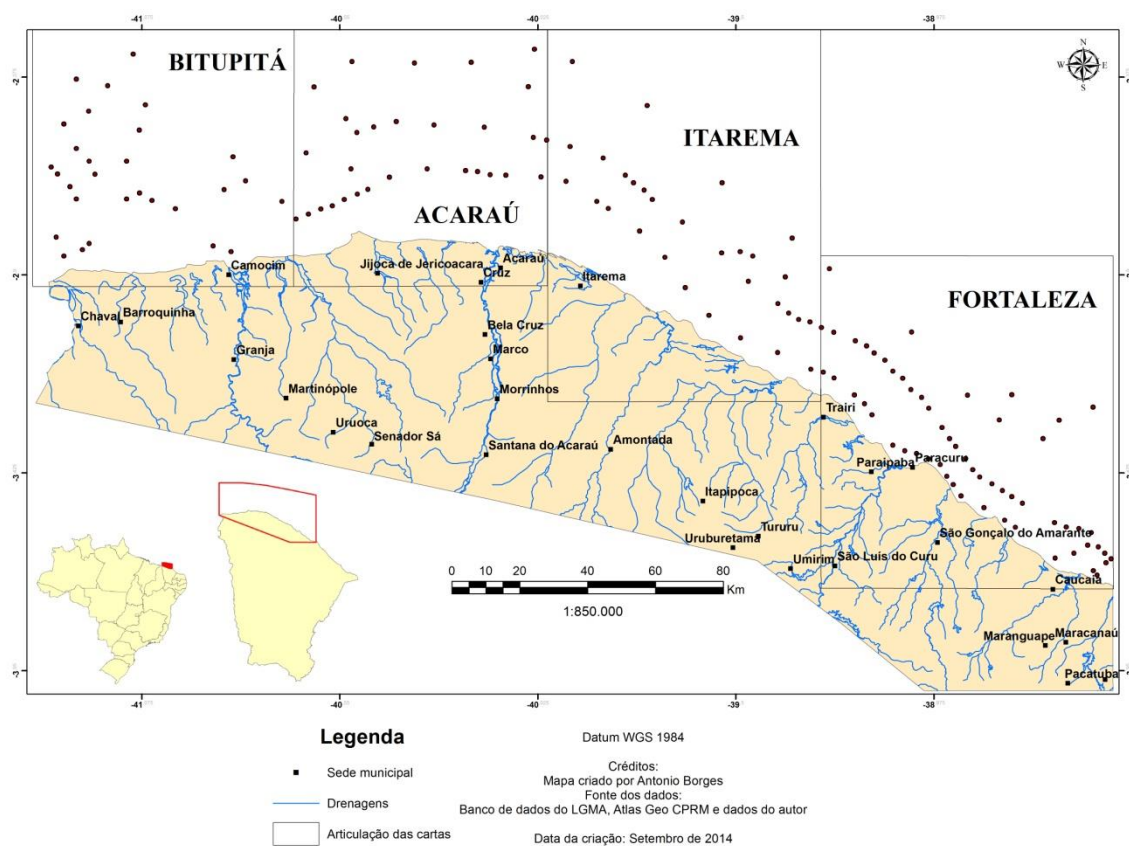
A presente tese fez parte do Projeto Granulados Marinhos (GRANMAR), que foi desenvolvido na costa Oeste do Estado do Ceará (Figura 1B), no âmbito de uma cooperação técnica entre o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, através da Residência de Fortaleza, e o Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada – LGMA, da Universidade Federal do Ceará – UFC. Considera-se que os pláceres marinhos

ocorrem na área de estudo e que os mesmos estão relacionados às possíveis fontes potenciais no continente e que podem apresentar valor econômico.

O foco desse estudo é a distribuição de minerais pesados até a profundidade de 30m, com ênfase na avaliação da potencialidade desses recursos minerais marinhos e das possíveis proveniências desses depósitos. Pretende-se com os dados obtidos gerar informações técnicas que permitam o conhecimento do ambiente marinho e o dimensionamento das suas limitações, para um uso sustentável desse meio.

A tese está estruturada na forma de artigos científicos submetidos a revistas nacionais, com os manuscritos inseridos no capítulo de resultados e discussões. Esse formato obedece às normas do Regimento Interno do Programa de Pós Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, segundo Art. 33º, § 1º.

Figura 1B – Mapa de localização e de pontos da área de estudo.



Fonte: Atlas GEO CPRM (2002), Banco de dados LGMA e Aguiar Neto (2014).

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Determinar a distribuição espacial e possível fonte dos minerais pesados de cobertura sedimentar da plataforma continental rasa oeste do Ceará.

1.1.2 Específicos

Caracterizar a faciologia da área de estudo pela granulometria e teor de CaCO_3 dos sedimentos;

Calcular a concentração total (%) de minerais pesados nos sedimentos de fundo da plataforma continental rasa, identificando as espécies minerais para estimar suas respectivas abundâncias relativas (%) e acrescentar os teores (Kg/t) das espécies predominantes;

Delimitar os possíveis pláceres pela distribuição espacial dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da plataforma continental;

Descrever a morfologia de fundo da área da plataforma continental estudada;

Analisar as amostras de sedimento fluviais em rios próximos a ocorrência dos possíveis pláceres marinhos para correlacionar a assembleia mineral continental com a do ambiente marinho;

Identificar a proveniência dos depósitos com potencial para pláceres pela associação mineralógica e cálculo dos índices Zircão/Turmalina/Rutilo (ZTR) e Rutilo/Zircão (RZi).

Obter imagens de alta resolução e composição química das amostras dos pláceres para otimizar a identificação dos minerais pesados.

Verificar correlações entre as espécies minerais que possam inferir as paragêneses minerais e suas possíveis proveniências.

Contribuir para a avaliação da potencialidade dos recursos minerais marinhos da plataforma continental do Estado do Ceará.

1.2 Estado da Arte

Os pláceres de minerais pesados foram, provavelmente, um dos primeiros depósitos marinhos explorados pelo homem. Lewis (1924) relata que os fenícios transportavam depósitos praias de cassiterita na região de Cornwall (Inglaterra) para o porto de Cadiz (Espanha) no período entre 1000 a 200 anos antes de Cristo, fornecendo estanho às margens do Mar Mediterrâneo que era transportado possivelmente até a Índia.

As coberturas sedimentares quaternárias mais favoráveis à concentração de minerais pesados são as areias retrabalhadas de plataforma continental e as areias fluviais retrabalhadas (Emery e Noakes, 1968). Atualmente os pláceres são explorados em praias e plataformas continentais de vários países como Alasca, Austrália, Sri Lanka, Namíbia, África do Sul, Japão, Nova Zelândia, Índia, Estados Unidos, Tailândia, Malásia e Indonésia (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 – Principais ocorrências mundiais de pláceres.

Bem Mineral	Utilização Principal	Ocorrência
Ouro	Ornamento	Alaska, Nova Zelândia, Gana, Filipinas, Chile e Argentina.
Diamante	Jóias, Corte	África do Sul, Namíbia, Austrália e Indonésia.
Cassiterita	Cobertura metálica	Indonésia, Malásia, Tailândia, Austrália, Tasmânia, Inglaterra e Mianmar.
Rutilo	Pigmento, metal	Austrália, Sri Lanka, Índia, China e EUA.
Ilmenita	Pigmentos	África do Sul, Índia, Austrália, Sri Lanka, Senegal, Flórida, Madagascar, Moçambique, Brasil, EUA e China.
Magnetita e Zircão	Aço, Refratários, opacificante cerâmico	Nova Zelândia, Indonésia, Filipinas, Japão, Austrália, Índia, EUA, Brasil e Sri Lanka.
Granada	Abrasivos	Austrália e Índia
Monazita	Catalizadores	Austrália, Índia, China, Madagascar e Brasil.
Silimanita	Refratários	Índia
Apatita	Fertilizantes	Perú e Chile
Cromita	Refratários	Indonésia, Sri Lanka e Austrália.
Scheelita	Ligas metálicas	Sri Lanka e Austrália.

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2011).

No Brasil há ou já houve exploração de minerais pesados associados a terraços marinhos elevados situados acima ou adjacentes a falésias da Formação Barreiras, nos estados da Paraíba, da Bahia, do Espírito Santo e do Rio de Janeiro. Em Barra de Itabapoana (RJ) e Mataraca (PB) esses depósitos estão em processo

de lavra e beneficiamento industrial com produção de concentrados de ilmenita, monazita, rutilo e zircão (Silva, 2000; Cavalcanti, 2011).

A evolução do conhecimento sobre a plataforma continental do Ceará teve início com o primeiro mapa de sedimentos plataformais entre Recife e Cabo Orange por Coutinho e Moraes (1968). Porém, dentre os trabalhos pioneiros, se destaca o projeto de Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira – REMAC, iniciado em 1972. Segundo Silva Filho (2004) tratou-se do mais abrangente levantamento da margem continental brasileira com a participação de vários órgãos e entidades: PETROBRÁS, DNPM, CPRM, DHN, CNPQ, universidades brasileiras (USP, UFC, UFPE, UFRGS), além da Universidade de Columbia – EUA. Seguiram-se os trabalhos de Barreto *et al* (1975) e França *et al* (1976) que categorizaram a plataforma continental cearense em províncias de acordo com a assembleia de minerais pesados.

Arthaud *et al.* (1976), estudando a distribuição de minerais pesados na plataforma continental do Maranhão e o extremo oeste da plataforma do Estado do Ceará, classificaram a porção cearense em província da cianita. Os mesmos autores constataram ainda concentrações de ilmenita acima de 1 Kg/t.

O Programa de Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma Continental Jurídica Brasileira (REMPLOC) foi criado pela Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), por meio da Resolução nº 04 da CIRM de 03 de dezembro de 1997. Esse programa deu continuidade aos estudos já efetuados nos cerca de 4,2 milhões de Km² de plataforma continental jurídica brasileira (PCJB), efetuando levantamentos geológico-geofísicos básicos sistemáticos na PCJB e visando avaliar sua potencialidade mineral.

Ramos e Santos (2005), investigando a porção leste dessa plataforma continental, obtiveram teor médio de 1,8% de minerais pesados em relação ao volume de sedimentos amostrados com predomínio de ilmenita e turmalina. Foi atribuída uma provável origem ígnea para esses dois minerais sob influência do retrabalhamento dos sedimentos da Formação Barreiras. Zircão, monazita e epídoto também se destacaram. Os autores enquadraram as ocorrências de minerais pesados em duas fácies distintas, baseadas no índice zircão/turmalina/rutilo (ZTR): o primeiro com ZTR < 45% com predominância de ilmenita seguida de monazita, localizada no trecho entre os rios Choró e Pirangi e próximo à região do Iguape; o

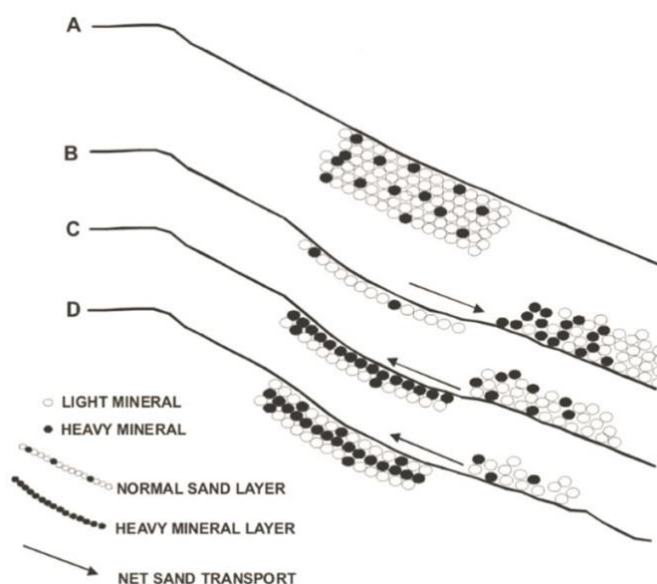
segundo com ZTR > 45% que ocorre em áreas onde há acentuado transporte sedimentar devido à influência estuarina e de antigos canais de drenagem.

Maia (2005), pesquisando parte da porção oeste da plataforma continental interna cearense (entre os municípios de Jijoca de Jericoacoara e Camocim), encontrou um teor médio de 0,22% (variando de 0,03 a 1,19%) de minerais pesados. Os principais minerais encontrados foram ilmenita e hornblenda e que juntos corresponderam a quase 70% de todos os pesados no local. Os demais que se destacam foram: turmalina, monazita e andaluzita. A distribuição desses minerais revelou um aumento do teor para NE da área estudada, correlacionada com o efeito da descarga do Rio Acaraú.

Almeida *et al.* (2011) analisaram 56 amostras na plataforma continental oeste cearense e calcularam um teor médio de minerais pesados de 1,4%, variando entre 0,1% e 9,0%. A ilmenita e turmalina predominaram, seguido por monazita, hornblenda, silimanita, estaurolita, epídoto, rutilo, andaluzita e zircão. De acordo com a distribuição espacial foi constatada uma maior concentração próximo à foz do Rio Curu (entre os municípios de Paracuru e Paraipaba) e as amostras do seu entorno apresentaram também concentrações elevadas (3,7%, 4,4%, 4,5%, 5,1% e 5,2%).

Os pláceres podem ser originados no ambiente costeiro associados à variação do regime de ondas, gerando intercalações entre camadas quartzosas claras e camadas escuras, ricas em minerais pesados (Figura 1.2).

Figura 1.2 – Modelo empírico do processo de acumulação de minerais pesados.



Fonte: Cascalho e Taborda (2006).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Levantamento bibliográfico

Teve por base reunir as pesquisas com depósitos marinhos de minerais pesados no Estado do Ceará e em outros locais do país e do mundo a fim de se obter suporte bibliográfico do tema.

2.2 Aquisição das amostras de sedimentos plataformais

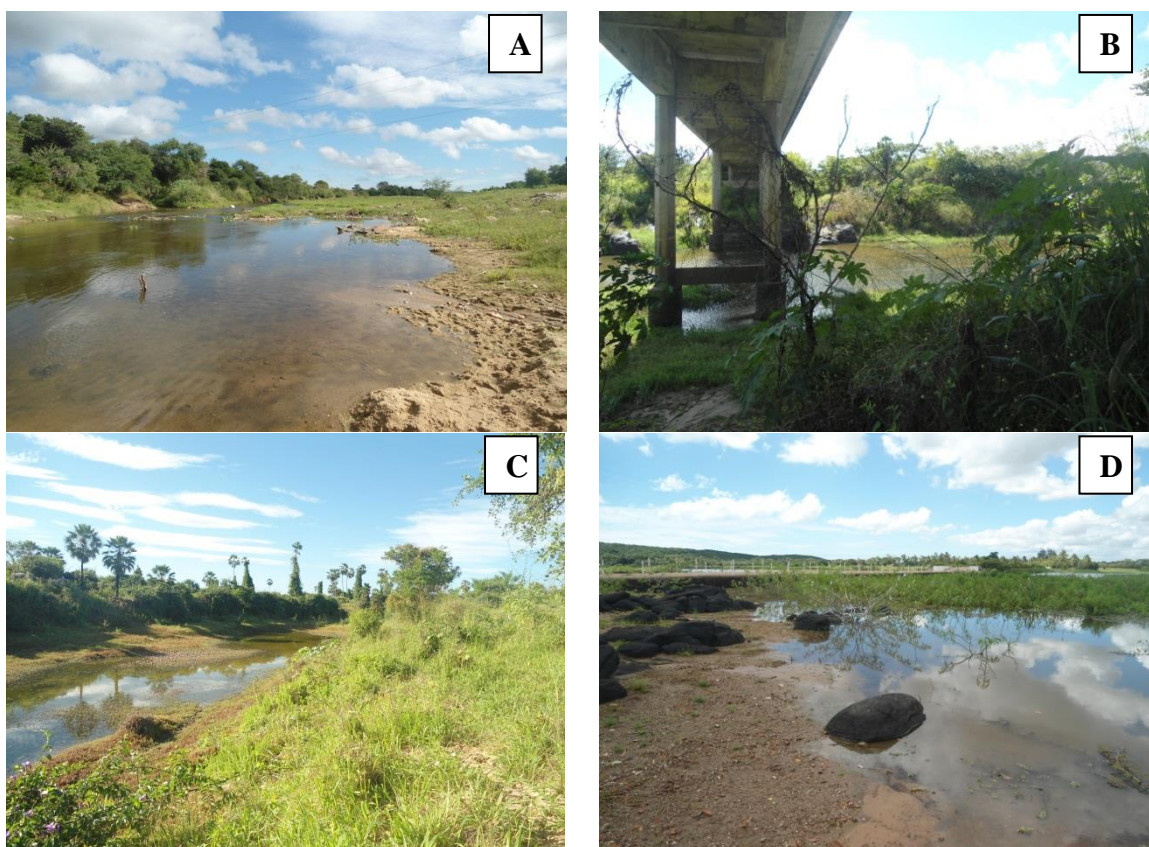
Foram selecionadas amostras do Banco de Amostras (Litoteca) do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) coletadas nas campanhas oceanográficas Geomar XVIII (1981), Geocosta II (1994) e GRANMAR/CE (2008). A seleção foi feita de forma a preencher o máximo da área e de acordo com a disponibilidade dessas amostras no arquivo. Os sedimentos de fundo da plataforma continental foram coletados com amostrador pontual do tipo “Van-Veen” da linha de costa de Fortaleza à divisa do Estado do Piauí até aproximadamente a isóbata de 30 m. As embarcações utilizadas foram o Barco de Pesquisa “Professor Martins Filho” pertencente à UFC e o Navio Balizador “Comandante Manhães” pertencente à Marinha do Brasil.

Foi possível obter um total de 147 amostras de sedimentos de fundo da plataforma continental oeste do Ceará para o estudo dos minerais pesados (Figura 2.2, Apêndice A). Os dados de Almeida *et al.* (2011) estão inclusos nesse estudo.

2.3 Etapa de campo

Foram coletadas 4 amostras de sedimentos fluviais a montante (amostras Curu 1 e São Gonçalo 1) e jusante (amostras Curu 2 e São Gonçalo 2) dos rios Curu e São Gonçalo (Figuras 2.3A-D) para correlacionar com a área-fonte dos pláceres marinhos identificados. Foram selecionados os locais favoráveis à acumulação de minerais pesados (zonas internas de meandros pré-determinadas por imagens de satélite) que foram localizados em campo com auxílio de um aparelho de GPS portátil da marca Garmim. O material foi coletado durante a estação seca (junho de 2013) com auxílio de pás, colheres, balde de 20 l e sacola plástica.

Figura 2.3 – Locais de coleta dos sedimentos fluviais nos rios Curu (A – montante e B – jusante) e São Gonçalo (C – montante e D – jusante).



Fonte: Aguiar Neto (2014)

2.4 Etapa de laboratório

2.4.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada segundo o método tradicional de peneiramento úmido, seco e pipetagem. Após a obtenção das várias frações que compõem os sedimentos, prosseguiu-se com a classificação textural das amostras com o programa ANASED, proposto por Lima *et al.*, (2001) e geração das medidas estatísticas dos parâmetros granulométricos: média, mediana, curtose, assimetria e grau de seleção.

2.4.2 Teor de carbonato de cálcio (CaCO₃)

O teor de CaCO₃ foi determinado pelo método do Calcímetro de Bernard (Lamas *et al.*, 2005, modificado). Esse dado é integrado à análise granulométrica para definir as fácies dos sedimentos segundo a classificação de Larssonneur (1977).

2.4.3 Descrição quali-quantitativa dos minerais pesados

A separação dos minerais pesados seguiu os procedimentos metodológicos estabelecidos por Parfenoff *et al.* (1970) com separação densimétrica utilizando líquido denso bromofórmio (CHBr₃, d= 2,89) e separação magnética com ímã de mão para discriminação das magnetitas. A identificação e quantificação das espécies minerais foram realizadas utilizando lupa binocular, pela contagem de 300 grãos de minerais pesados de acordo com Galehouse (1971), observando as características intrínsecas de brilho, clivagem, cor e hábito de cristalização. Foram analisadas as frações correspondentes à areia muito fina a areia fina (0,062 a 0,250 mm).

2.4.4 Índice Rutilo e Zircão (RZi)

Foi calculado o RZi (Equação 1) pela contagem de 200 grãos dos minerais rutilo e zircão contidos na amostra (Morton e Hallsworth, 1994). Os minerais citados apresentam densidade, estabilidade química e comportamento hidráulico similares, portanto, as variações desse índice são decorrentes de modificações na proveniência sedimentar. Acrescenta-se ainda que o rutilo é indicador de fonte metamórfica e o zircão indicador de origem ígnea (Suguió, 2003; Pereira *et al.*, 2005; Remus *et al.*, 2008; Sevastjavona *et al.*, 2012; Klein e Dutrow, 2012).

$$RZi = 100 \times \frac{R}{R + Zi} \quad (1)$$

O RZi foi determinado nos locais onde ocorreram os depósitos com potencial para plácemes marinhos e nos sedimentos de corrente, a fim de discriminar mudanças nas áreas-fonte de suprimento sedimentar.

2.4.5 Índice Zircão, Turmalina e Rutilo (ZTR)

O ZTR foi calculado pela somatória das porcentagens de zircão, turmalina e rutilo nas mesmas amostras onde se aplicou o RZi. Esse índice reflete o grau de maturidade mineralógica dos sedimentos, pois combina minerais resistentes à dissolução química, dessa forma, um alto índice ZTR está associado a vários ciclos sedimentares. No entanto esses minerais apresentam densidades relativamente distintas, por isso suas variações podem ser resultado do efeito combinado da dissolução pós-deposicional e do transporte sedimentar (Nóbrega *et al.*, 2008; Corrêa *et al.*, 2008; Ochoa *et al.*, 2013).

2.4.6 Imageamento e composição química dos grãos de minerais pesados

As amostras dos minerais pesados foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) com sistema de detecção de raios X por dispersão em energia (EDS – *Energy Dispersive System*) para obter imagens de alta resolução e aperfeiçoar a identificação das espécies minerais.

Um MEV tem muitas aplicações na mineralogia e quando combinado com EDS, permite informações topográficas, cristalográficas e composicionais que podem ser obtidas rapidamente e simultaneamente da mesma área. (KLEIN & DUTROW, 2012, p.350).

2.5 Etapa de escritório

2.5.1 Geoprocessamento

Foram elaborados mapas faciológico e de distribuição de minerais pesados com o Arcgis 10.1. Foi ainda gerado o modelo digital do terreno (MDT) utilizando o Surfer 10 para auxiliar na interpretação da morfologia da plataforma continental oeste do Ceará.

2.5.2 Tratamento estatístico

Aplicaram-se técnicas de estatística multivariada para interpretação dos dados gerados pela Análise de Componentes Principais, Análise de Agrupamento e Análise de Fatores utilizando o Statistica 7.0. Essas técnicas permitem descrever o comportamento da distribuição da maior parte dos sedimentos, representar processos geológicos atuantes e ocorrências de paragêneses minerais (Andriott, 1997; Landim, 2000; Corrêa *et al.*, 2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo é composto pelos 3 artigos científicos que forneceram dados sobre a distribuição dos minerais pesados e avaliou o potencial econômico e possíveis proveniências desses depósitos na plataforma continental rasa/média oeste cearense até a profundidade de 30 m.

O primeiro artigo intitulado “Distribuição de Minerais Pesados ao longo da Plataforma Continental Interna/Média Oeste do Ceará, Nordeste do Brasil”, submetido à Revista Pesquisa em Geociências da UFRGS (Anexos), contemplou toda a área da plataforma continental estudada, a fim de delimitar os domínios com maior concentração dos pláceres marinhos e aplicação de técnicas de análises multivariadas para gerar interpretações.

O segundo artigo intitulado “Pláceres Marinhos entre Caucaia e Trairi, Estado do Ceará, Nordeste do Brasil”, aceito para publicação na Revista de Geociências da UNESP (Anexos), enfocou a potencialidade econômica dos pláceres marinhos da Folha Fortaleza, área da plataforma continental estudada com maior concentração de minerais pesados.

O terceiro artigo intitulado “Proveniência dos Minerais Pesados da Cobertura Sedimentar da Plataforma Continental entre Caucaia e Trairi, Ceará, Nordeste Do Brasil”, submetido à Revista de Geologia da USP – Série Científica (Anexos), analisou as possíveis proveniências dos pláceres marinhos da Folha Fortaleza integrando a assembleia de minerais pesados de sedimentos fluviais das drenagens mais próximas.

3.1 Primeiro Artigo. Submetido à Revista Pesquisas em Geociências da UFRGS

DISTRIBUIÇÃO DE MINERAIS PESADOS AO LONGO DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA/MÉDIA OESTE DO CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL

Antonio Borges de Aguiar NETO *, Wanessa Sousa MARQUES ² & George Satander Sá FREIRE ³

* Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGG) da Universidade Federal do Ceará (UFC). tonygeoufc@hotmail.com

Vila Carlos Vasconcelos, nº 2445A, Joaquim Távora, Fortaleza – CE, CEP: 60.135-182, Brasil, Tel: (85) 9634-2188/8201-9960

² Pesquisadora em Geociências no Serviço Geológico do Brasil. wsmarq@yahoo.com.br

³ Professor Adjunto do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (DEGEO/UFC). freire@geologia.ufc.br

Resumo

Foram realizadas investigações sobre os parâmetros granulométricos, conteúdo de CaCO₃, minerais pesados e morfologia de fundo da cobertura sedimentar da plataforma continental interna/média oeste do Ceará. Incluiu-se estatística multivariada aos dados mineralógicos para auxiliar na interpretação da proveniência dos minerais pesados. A plataforma continental oeste cearense apesar da predominância da sedimentação carbonática, apresenta concentrações importantes de minerais pesados (4,54%) originando depósitos do tipo plácer nas areias litoclásticas e litobioclástica situadas mais a leste da área estudada (Folha Fortaleza). Foram identificadas cavas no fundo submarino que favorecem a concentração dos minerais pesados. A assembleia mineral (ilmenita, turmalina, epidoto, hornblenda, monazita, estauroлита, sillimanita, rutilo, magnetita, zircão, andaluzita, cianita, granada, leucoxênio, diopsídio, apatita, espinélio e cassiterita) sugere contribuições regionais do retrabalhamento dos sedimentos da Formação Barreiras e local das rochas metamórficas do Complexo Ceará. Afloramentos do embasamento cristalino na plataforma continental próximos ao Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) contribui diretamente no aporte de sedimentos terrígenos e foram nesses locais que os plácemes marinhos se concentraram. A estatística multivariada discriminou os dois tipos de proveniências anteriormente descritos, contudo devem-se levar em consideração outras contribuições como das areias pretas costeiras, aporte fluvial atual (continental) e pretérito (vales fluviais afogados) e sedimentos marinhos de deriva litorânea.

Palavras-chave: transporte sedimentar, pláceres, geologia marinha, depósitos quaternários.

Abstract

Investigations of particle size parameters, content of CaCO_3 , heavy minerals and morphology were executed in bottom sedimentary cover inner/mean continental shelf west of Ceara. Multivariate statistics analyses were added for mineralogical data to aid interpretation of heavy mineral provenance. The western Ceará continental shelf despite the predominance of carbonate sedimentation, it presents significant concentrations of heavy mineral (4.54%) resulting in placer deposits in lithoclastic and litobioclastic sands located further east of the study area (Fortaleza Chart). It was possible take notice cavities in the submarine bottom which support heavy minerals concentration. The mineral assemblage (ilmenite, tourmaline, epidote, hornblende, monazite, staurolite, sillimanite, rutile, magnetite, zircon, andalusite, kyanite, garnet, leucosene, diopside, apatite, spinel and cassiterite) propose regional contributions of the reworking of sediments Barreiras Formation and local contribution of metamorphic rocks of Ceará Complex. Crystalline basement outcrops on the continental shelf near Pecém Port (São Gonçalo do Amarante) contributes directly to sediment supply of terrigenous, hence the marine placers were concentrated in these places. Multivariate statistics distinguish two types of sources which were described above, however it should take attention to other contributions as coastal black sands, present fluvial supply (continental), past fluvial supply (drowned river valleys) and marine sediments from longshore drift.

Keywords: sedimentary transport, placers, marine geology, quaternary deposits.

3.1.1. Introdução

Os depósitos de minerais pesados ($d > 2,89$), com densidade superior aos dos minerais feldspato e quartzo, foram, provavelmente, um dos primeiros recursos minerais marinhos explorados pelo homem. Lewis (1924) relata que os fenícios transportavam depósitos praias de cassiterita na região de Cornwall (Inglaterra) para o porto de Cadiz (Espanha) no período entre 1000 a 200 anos antes de Cristo, fornecendo estanho às margens do Mar Mediterrâneo que era transportado possivelmente até a Índia.

As coberturas sedimentares quaternárias mais favoráveis à concentração de minerais pesados são as areias retrabalhadas de plataforma continental e as areias fluviais retrabalhadas (Emery & Noakes, 1968). Geralmente, os minerais pesados não excedem a concentração 0,1% a 0,5% das frações terrígenas e a assembleia desses minerais constitui grande aplicabilidade como: proveniência dos sedimentos, histórias do intemperismo e transporte, e correlação paleogeográfica (Suguio, 2003). A partir da decomposição e erosão de rochas-fonte quer sejam ígneas, metamórficas ou sedimentares, os minerais pesados são concentrados mecanicamente originando os depósitos do tipo plácer, que podem formar acumulações sedimentares de valor econômico.

Os pláceres marinhos têm íntima relação com as variações eustáticas do nível do mar que abrangeram todo o Quaternário, oscilando entre exposição das plataformas continentais e afogamento das mesmas (Kudrass, 2000; Silva, 2000; Lalomov & Tabolitch, 2000; Gent *et al.*, 2005; Cascalho *et al.*, 2007; Tomazzoli *et al.*, 2007; Corrêa *et al.*, 2008; Addad, 2010; Cavalcanti, 2011). Como resultado destas oscilações, uma notável quantidade de pláceres foi formada em períodos de nível de mar baixo, localizando-se em locais como vales fluviais afogados e antigas linhas de praias. Alguns desses depósitos, especialmente os ocorrentes na plataforma continental interna, são retrabalhados e redistribuídos pela hidrodinâmica atual.

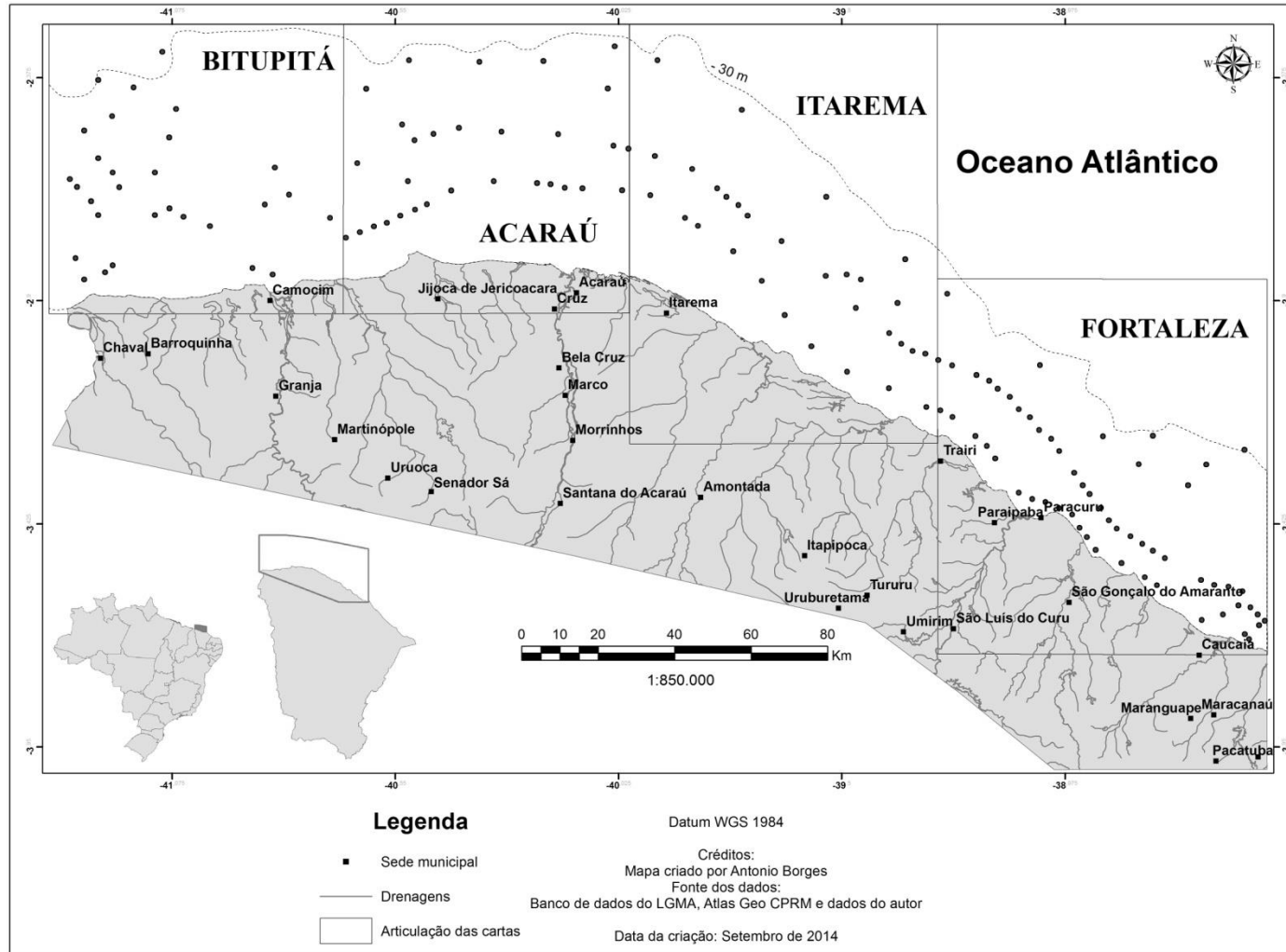
Alguns dos trabalhos pioneiros sobre esses depósitos na plataforma continental cearense (França *et al.*, 1976; Barreto *et al.*, 1975) constataram locais com ocorrência abundante de minerais pesados, denominados de províncias: a província da cianita até o delta do rio Jaguaribe; a província da hornblenda para o restante das praias e dunas de Fortaleza, predominando entre os opacos nas duas províncias a ilmenita; e na região entre a fronteira do Estado do Piauí e a foz do rio Acaraú foi encontrado uma predominância de granada, hornblenda, turmalina e epídoto.

Essa pesquisa se desenvolveu ao longo da plataforma continental oeste do Estado do Ceará, tendo como foco a discriminação dos domínios com concentrações de minerais pesados e suas respectivas espécies. Nessa análise utilizaram-se a assembleia mineral predominante, técnicas de análise de dados multivariada, possíveis proveniências desses depósitos, além de informações da morfologia e faciologia da área.

3.1.2. Área, materiais e métodos

A área objeto dessa pesquisa abrange parte da plataforma continental interna/média cearense, limitando-se a isóbata de - 30 m, entre os municípios de Caucaia e a divisa com o Estado do Piauí, pela articulação das cartas Bitupitá, Acaraú, Itarema e Fortaleza (Figura 3.1.2). A plataforma continental cearense possui uma largura média de 63 Km, com máxima de 101 Km no extremo oeste do Estado e mínima de 41 Km no extremo leste.

Figura 3.1.2 – Área da Plataforma Continental Oeste Cearense com articulação das cartas e pontos de amostragem.



Fonte: Banco de dados do LGMA, Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

3.1.2.1 Caracterização climática e oceanográfica da área

A zona costeira do Estado do Ceará é influenciada pelos regimes climáticos Tropical Quente Semi-Árido Brando e Tropical Quente Subúmido (IPECE, 2007), onde também atua o sistema atmosférico Zona de Convergência Intertropical. A área apresenta altas taxas de insolação, temperatura média anual de 26,9° C com variações inferiores a 5° C e umidade relativa do ar variando de 83,9% em março a 74% em setembro. A pluviosidade concentra-se em 4 meses consecutivos, geralmente de fevereiro a maio, com média anual de 1440 mm.

As velocidades médias dos ventos variam de 3,40 a 9,57 m/s de acordo com a estação anemográfica em Pecém (São Gonçalo do Amarante – CE). As direções dominantes são de Leste, representando 46,3% das medidas, seguida das direções ENE com 22,3% e ESE com 16,0% das ocorrências e estão relacionadas à ação do Anticiclone Sul que diminui no Norte e Nordeste do Brasil, passando para a atuação da Zona de Convergência Intertropical. As correntes apresentam velocidade média entre 0,23 e 0,24 m/s de direção geral NW na superfície e 0,21 m/s de direção W no fundo. São responsáveis pelo transporte de sedimentos que atinge a costa em um determinado ângulo que de acordo com Silva (2005) o ângulo de incidência dessas correntes determina a velocidade e trajetória do transporte de sedimentos. As marés são de caráter semidiurno, podendo variar entre 0,75 e 3,23 m.

3.1.2.2 Contexto geotectônico e geológico da área

A margem continental ao largo do Estado do Ceará apresenta um contexto que remonta do Cretáceo, embora possua influência de uma importante herança tectônica pré-cambriana (Silva Filho, 2004). As bacias sedimentares da região costeira do Nordeste oriental brasileiro e da margem equatorial atlântica tem como embasamento estruturas da Província Borborema. A Província Borborema é caracterizada como um complexo mosaico, separado por falhas ou altos do embasamento, resultado da convergência dos crátons de São Luís-Oeste Africano, São Francisco-Congo e Amazônico, que estiveram envolvidos na amalgamação e consequente formação do Supercontinente Gondwana. A Província Borborema e a porção oriental da margem equatorial adjacente englobam uma série de bacias inicialmente intracontinentais, submetida a um estiramento difuso durante o

Eocretáceo. Essa deformação foi caracterizada pelos principais fenômenos tectono-sedimentares e magmáticos, que culminaram com a abertura do Oceano Atlântico Sul (Conceição *et al.*, 1988).

A bacia marginal que engloba a área de estudo é a bacia do Ceará, limitada a leste pelo Alto de Fortaleza e a oeste pelo Alto de Tutóia com uma área de 35.000 Km². Três segmentos são reconhecidos na bacia de oeste para leste: as sub-bacias de Piauí-Camocim, Acaraú-Icaraí e Mundaú que caracterizam diferentes domínios separados por importantes feições transversais positivas, correspondentes a altos do embasamento, a grandes corpos ígneos ou a anticlinais em ampla escala produzidos por inversão tectônica sin-sedimentar. A fase rifte acomodou mais de 4.000 m de sedimentos siliciclásticos continentais naquele segmento da margem, correspondentes a fácies de rochas aluviais, fluviais e lacustres da Formação Mundaú. A partir do Albiano, passaram a dominar condições francamente marinhas. Entre o Eoceno e o Recente, uma sedimentação arenosa grossa acomodou-se junto às áreas proximais da bacia, a Formação Tibau, que grada para os carbonatos da Formação Guamaré e aos folhelhos da Formação Ubarana no sentido das porções mais distais da bacia (Milani *et al.*, 2001).

A plataforma continental cearense é recoberta por sedimentos predominantemente bioclásticos (composição carbonática algálica), com contribuições de até 75%, os sedimentos siliciclásticos estão mais presentes na plataforma continental interna e defronte a Fortaleza chegam até a borda da plataforma (Martins & Coutinho, 1981; Freire, 1985; Silva Filho, 2004).

3.1.2.3 *Materiais e Métodos*

Foram analisadas 147 amostras de sedimentos de fundo da plataforma continental (Figura 3.1.2) oriundas da Litoteca do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Essas amostras foram coletadas nas campanhas oceanográficas: Geomar XVIII (1981), Geocosta II (1994) e GRANMAR/CE (2008) com amostrador pontual do tipo “Van-Veen” da linha de costa de Fortaleza até a fronteira do estado do Piauí, limitando-se a isóbata de 30 m. As embarcações utilizadas foram o Barco de Pesquisa “Professor Martins Filho” pertencente à UFC e o Navio Balizador “Comandante Manhães” pertencente à

Marinha do Brasil. Os dados de minerais pesados de Almeida *et al.*, 2011 estão inclusos neste estudo.

A análise granulométrica foi realizada, segundo o método tradicional de peneiramento úmido, seguido por peneiramento seco e pipetagem. Após a obtenção das várias frações que compõem os sedimentos, prosseguiu-se com a classificação textural das amostras com o programa ANASED, proposto por Lima *et al.* (2001).

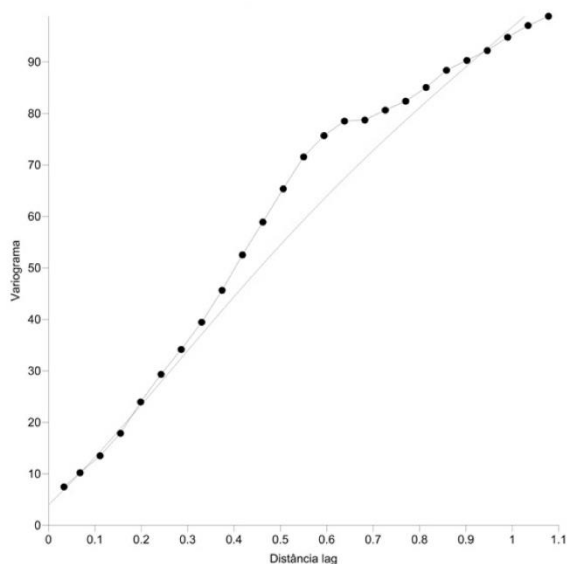
O teor de CaCO_3 foi determinado pelo método do Calcímetro de Bernard (Lamas *et al.*, 2005, modificado). Esse dado é integrado à análise granulométrica para definir as fácies dos sedimentos segundo a classificação de Larssonneur (1977).

A separação dos minerais pesados seguiu os procedimentos metodológicos estabelecidos por Parfenoff *et al.* (1970) com separação densimétrica da fração entre 0,250 mm a 0,062 mm (faixa granulométrica com maior concentração de minerais pesados) utilizando líquido denso bromofórmio (CHBr_3 , $d= 2,89$) e separação magnética com ímã de mão para discriminação das magnetitas. A identificação e quantificação dos minerais pesados foram realizadas utilizando lupa binocular pela contagem de 300 grãos de minerais de acordo com Galehouse (1971), observando as características intrínsecas de brilho, clivagem, cor e hábito de cristalização.

As amostras dos possíveis depósitos de pláceres foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) com sistema de detecção de raios X por dispersão em energia (EDS – *Energy Dispersive System*) para obter imagens de alta resolução desses grãos e otimizar a identificação dos minerais.

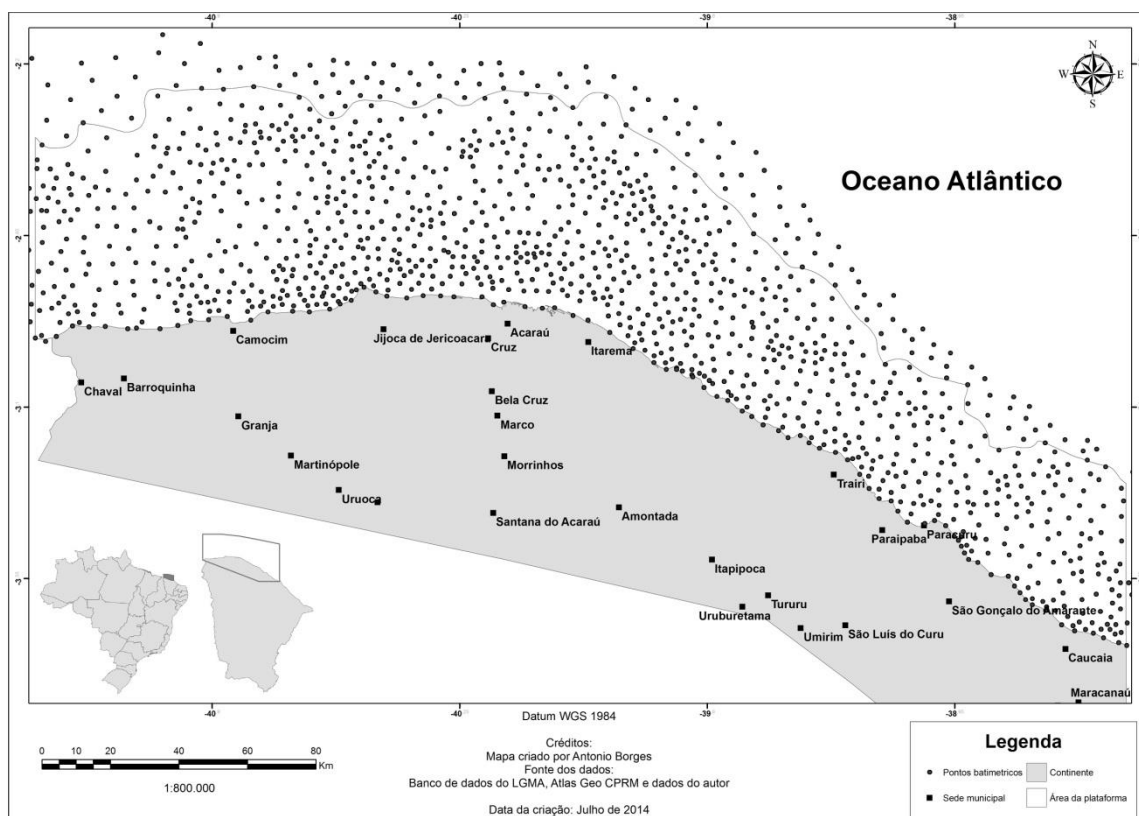
Foi gerado o mapa faciológico com Arcgis 10.1 a partir dos dados granulométricos e conteúdo de CaCO_3 nos sedimentos, delimitando as diversas fácies sedimentares na plataforma continental. O modelo digital do terreno (MDT) foi elaborado utilizando o Surfer 10 pelo método de Krigagem e ajuste de variograma (Figura 3.1.2.3 A) através de 1687 cotas batimétricas (Figura 3.1.2.3 B).

Figura 3.1.2.3 A – Variograma ajustado na modelagem da morfologia de fundo da plataforma continental estudada.



Fonte: Aguiar Neto (2014)

Figura 3.1.2.3 B – Malha amostral para geração do MDT da plataforma continental estudada.



Fonte: Aguiar Neto (2014)

Os teores de 14 espécies de minerais pesados foram comparados utilizando as técnicas estatísticas multivariadas Análise de Componentes Principais (ACP), de Agrupamento e de Fatores utilizando o software Statistica 7.0. Essas técnicas permitem descrever o comportamento da distribuição da maior parte dos sedimentos, representar processos geológicos atuantes e ocorrências de paragêneses minerais (Andriott, 1997; Landim, 2000; Corrêa *et al.*, 2008).

3.1.3. Resultados

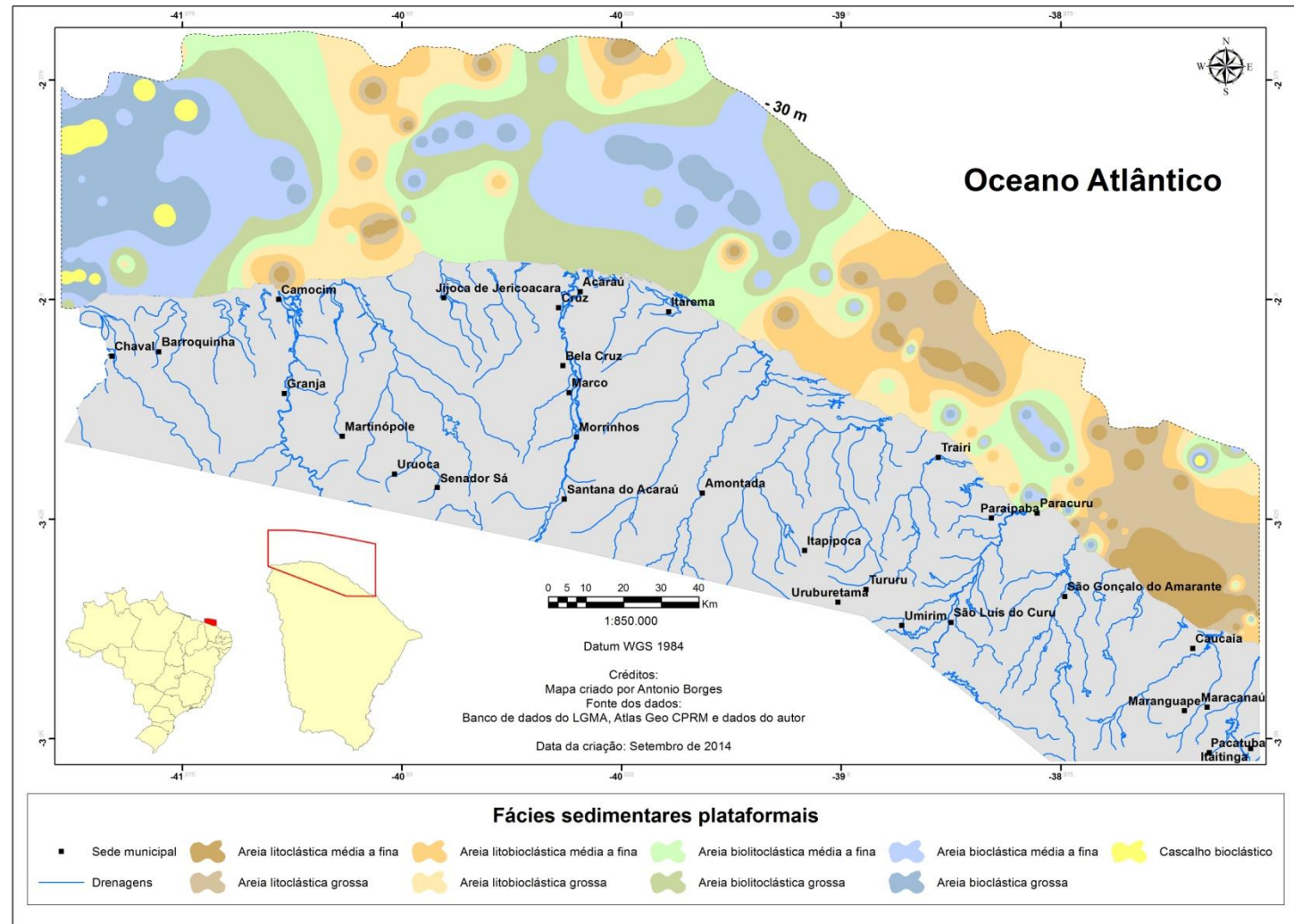
3.1.3.1 Caracterização faciológica

Foram discriminadas 9 fácies na plataforma continental oeste do Ceará: areia litoclástica média a fina, areia litoclástica grossa, areia litobioclástica média a fina, areia litobioclástica grossa, areia biolitoclástica média a fina, areia biolitoclástica grossa, areia bioclástica média a fina, areia bioclástica grossa e cascalho bioclástico (Figura 3.1.3.1). É observada uma maior contribuição terrígena na porção mais a leste e biotritada a oeste. A heterogeneidade marca a distribuição do tamanho dos grãos, ocorrendo ilhas tanto para os terrígenos (litoclásticos e litobioclásticos) grossos e finos, como para os biotritados (bioclásticos e biolitoclásticos), relevando o efeito da hidrodinâmica no ambiente plataformal.

3.1.3.2 Modelo Digital do Terreno (MDT)

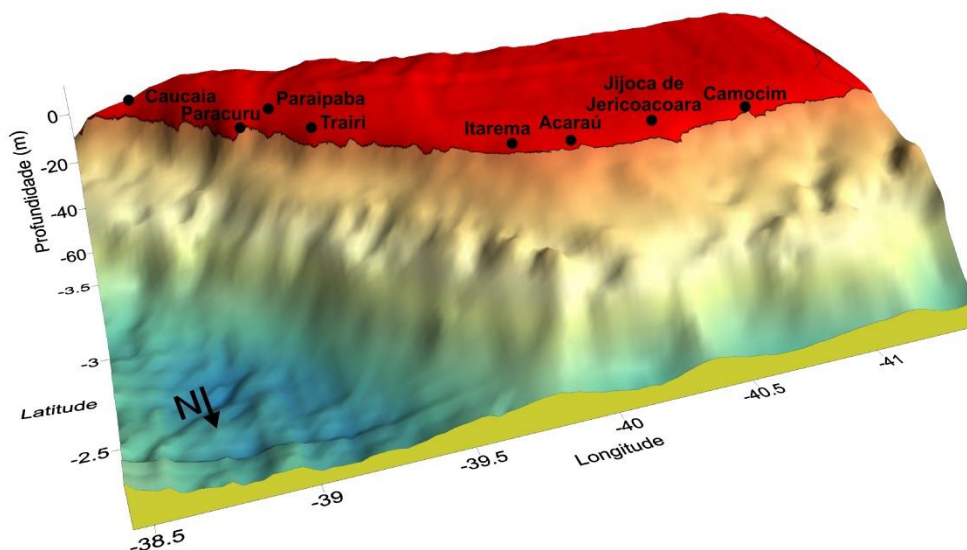
O MDT (Figura 3.1.3.2) revelou a ocorrência de cavas/depressões na morfologia de fundo, principalmente a partir de 20 m de profundidade, assim como uma tendência de alargamento da plataforma continental de leste para oeste. Essas feições abruptas no fundo marinho propiciam o aprisionamento de minerais pesados e caracterizaram níveis de mar mais baixo (antigas linhas de praia e paleocanais).

Figura 3.1.3.1 – Mapa de fácies da plataforma continental estudada.



Fonte: Banco de dados do LGMA, Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

Figura 3.1.3.2 – Modelo Digital do Terreno da plataforma continental estudada.

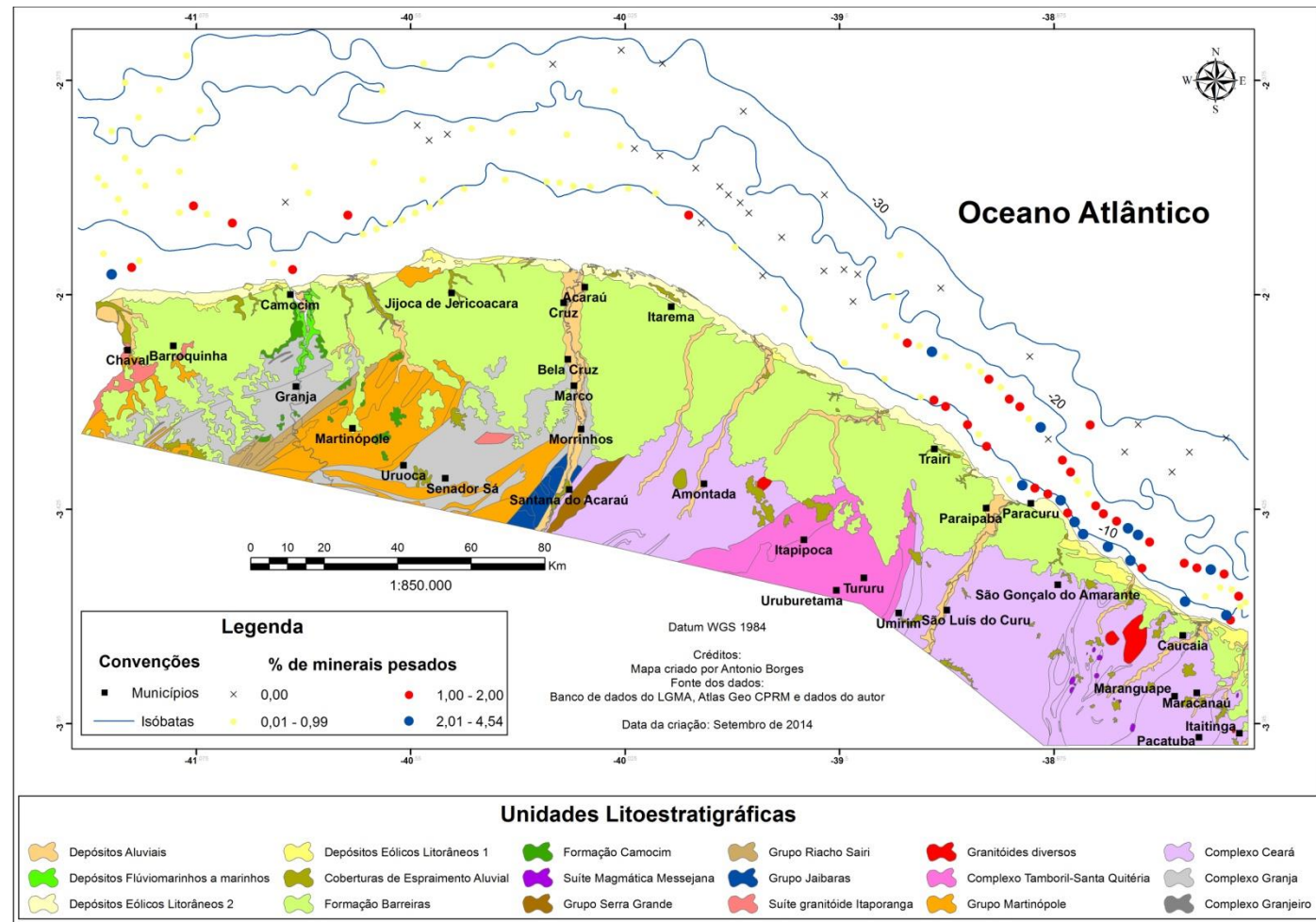


Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.1.3.3 Minerais Pesados

Os teores de minerais pesados variaram de 0,00% a 4,54% na fração granulométrica analisada (0,250 a 0,062 mm, areia média a areia muito fina), com notável concentração desses depósitos na carta Fortaleza e em profundidades inferiores a 20 m (Figura 3.1.3.3 A). Foram identificadas 18 espécies de minerais pesados na seguinte ordem de abundância: ilmenita, turmalina, epídoto, hornblenda, monazita, estauroлита, sillimanita, rutilo, magnetita, zircão, andaluzita, cianita, granada, leucóxênio, diopsídio, apatita, espinélio e cassiterita (Tabela 3.1.3.3). A ilmenita (40,23%) e turmalina (25,59%) são as únicas espécies que ocorrem em todas as amostras analisadas, exceto naquelas com 0,00% de minerais pesados, e juntas, representam mais da metade da assembleia mineral ocorrente na plataforma continental, exceto na carta Fortaleza onde ocorre um decréscimo dessas espécies, tornando a aumentar na direção leste (Figuras 3.1.3.3 B a 3.1.3.3 E). É perceptível o aumento de epídoto, hornblenda, monazita, sillimanita e andaluzita na direção leste. Leucóxênio, apatita e diopsídio ocorrem de maneira muito restrita nas folhas Bitupitá e Acaraú. Estauroлита, rutilo e cianita apresentam maiores distribuições nas cartas Bitupitá e Fortaleza. A magnetita e o zircão têm suas ocorrências mais bem marcadas nas cartas Acaraú e Fortaleza. Granada tem maior contribuição na assembleia da carta Fortaleza, enquanto espinélio e cassiterita não são representados graficamente devido seus baixos teores e distribuição.

Figura 3.1.3.3 A – Mapa geológico continental e percentual total de minerais pesados na plataforma continental oeste cearense.



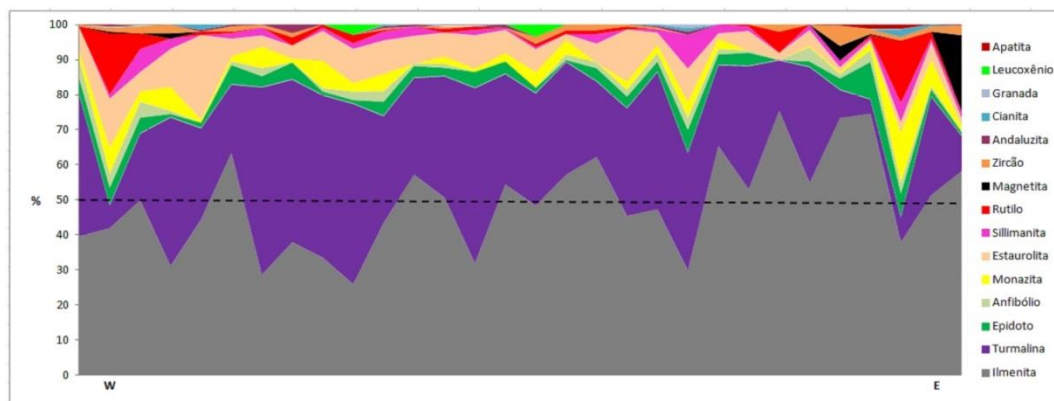
Fonte: Banco de dados do LGMA, Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

Tabela 3.1.3.3 – Dados estatísticos (%) das espécies minerais identificadas na plataforma continental oeste do Estado do Ceará.

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Ilmenita	6,50	77,00	40,05	18,64
Turmalina	3,00	62,00	25,59	13,32
Epídoto	0,00	37,30	6,53	5,73
Hornblenda	0,00	36,00	5,93	7,44
Monazita	0,00	28,90	5,30	6,13
Estauroлита	0,00	24,00	4,77	4,49
Sillimanita	0,00	27,50	4,51	6,29
Rutilo	0,00	19,10	2,37	4,21
Magnetita	0,00	24,62	1,80	4,69
Zircão	0,00	8,00	1,27	1,67
Andaluzita	0,00	10,00	1,22	2,17
Cianita	0,00	6,70	0,18	0,76
Granada	0,00	6,00	0,16	0,72
Leucoxênio	0,00	3,50	0,11	0,49
Diopsídio	0,00	9,20	0,10	0,96
Apatita	0,00	1,33	0,09	0,28
Espinélio	0,00	0,61	0,02	0,11
Cassiterita	0,00	0,50	traços	0,05

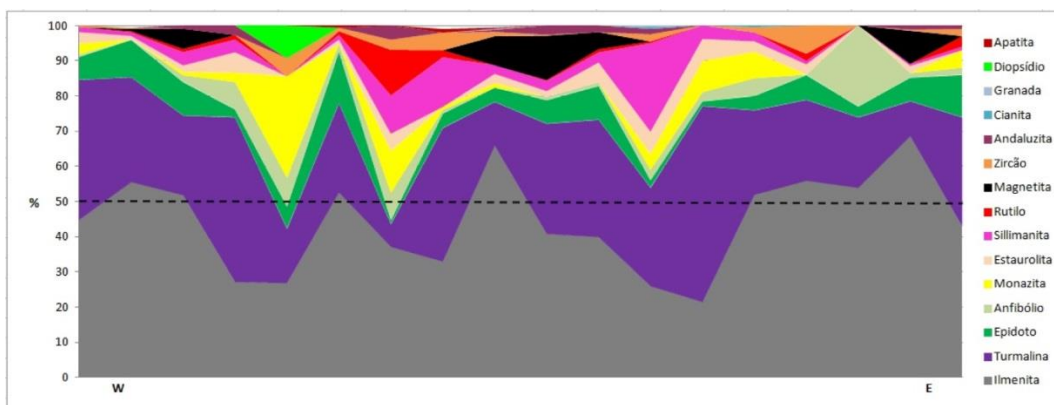
Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.1.3.3 B – Distribuição de minerais pesados da folha Bitupitá.



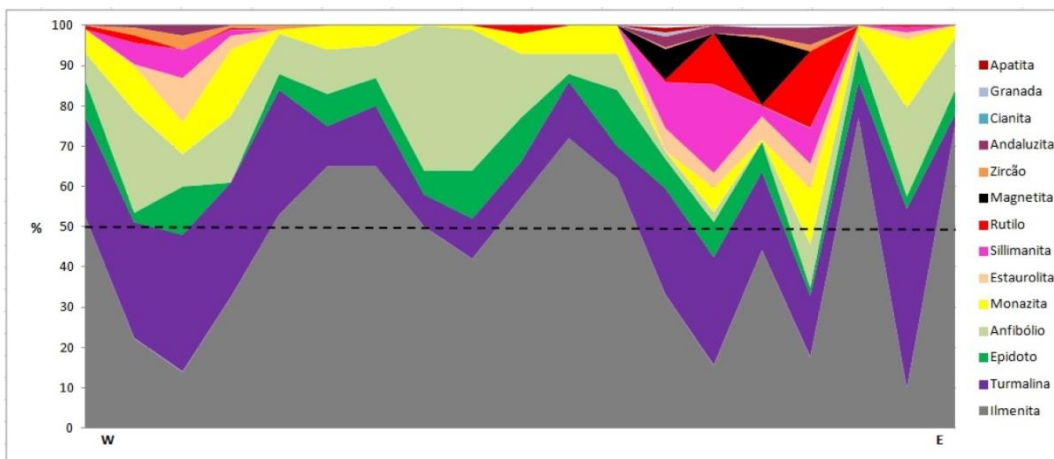
Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.1.3.3 C – Distribuição de minerais pesados da folha Acaraú.



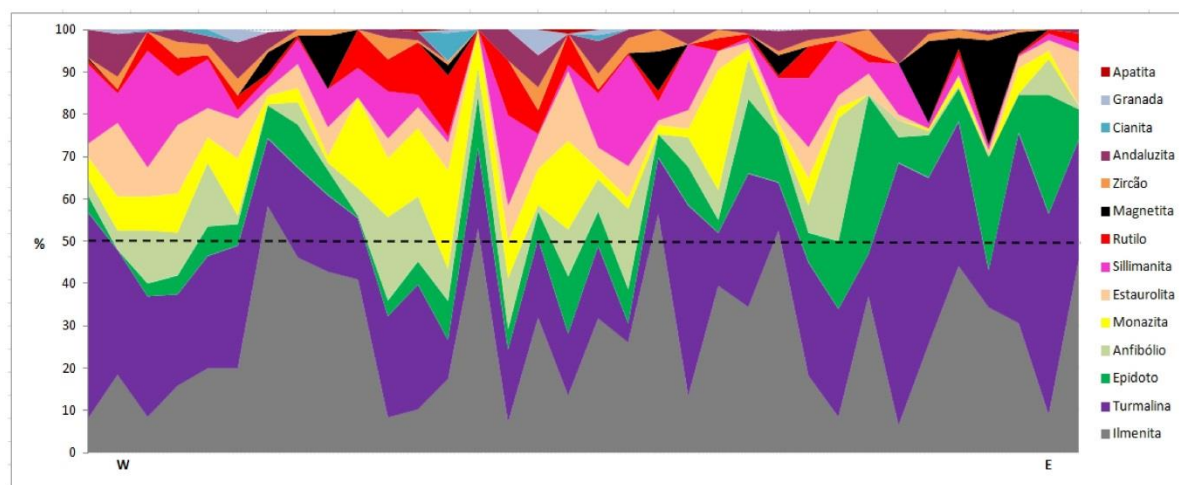
Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.1.3.3 D – Distribuição de minerais pesados da folha Itarema.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.1.3.3 E – Distribuição de minerais pesados da folha Fortaleza.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.1.4. Discussão dos Resultados

Na plataforma continental oeste cearense constatou-se a predominância de sedimentos biodetríticos (teores de $\text{CaCO}_3 > 50\%$, bioclásticos e biolitolásticos de acordo com Larsonneur, 1977), obedecendo o padrão de sedimentação da plataforma continental do nordeste brasileiro, exceto para a carta Fortaleza e parte da carta Itarema, onde dominaram os sedimentos siliciclásticos (teores de $\text{CaCO}_3 < 50\%$, litoclásticos e litobioclásticos pela classificação de Larsonneur, 1977). Freire (1985) já relatava que a plataforma continental cearense é a que apresenta maior contribuição de sedimentação terrígena de todas as plataformas continentais nordestinas, pois este aporte terrígeno predomina em toda a plataforma interna e defronte a Fortaleza chega a alcançar trechos da plataforma continental externa. Esses sedimentos foram retrabalhados e reorganizados em novas feições morfológicas em equilíbrio com o regime hidrodinâmico plataformal durante a transgressão holocênica e são nesses sedimentos que tendem a se concentrar os depósitos de pláceres. Na plataforma continental de Fortaleza as areias terrígenas retrabalhadas cobrem quase toda a largura da plataforma continental e areia fluvial retrabalhada ocorre ao largo da foz do rio Coreaú, existindo áreas de concentrações anômalas de minerais pesados (Palma, 1979). Particularmente na área de estudo, as maiores concentrações estão na carta Fortaleza (Figura 3.1.3.3 A), locais onde predominam os sedimentos litoclásticos e litobioclásticos (areias quartzosas médias

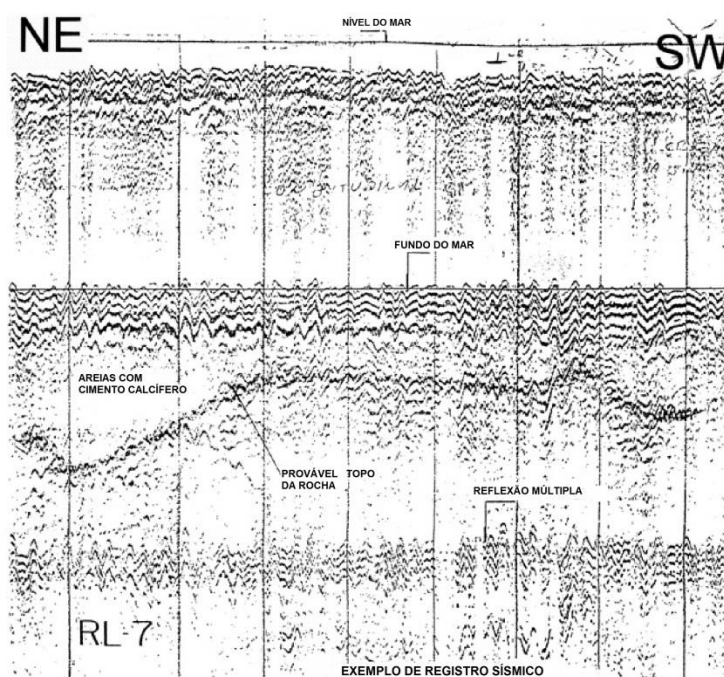
a finas), com ilhas esparsas de sedimentos bioclásticos, algas e lamas. A influência continental exerce relação direta com esses sedimentos, os quais assumem um caráter reliquiar pelas suas características de retrabalhamento na plataforma continental durante as variações do nível do mar no Quaternário.

A plataforma continental cearense caracteriza-se pelo baixo gradiente de declividade que é característico e constante, Silva e Morais (2013) a define como uma região de homogeneidade geomorfológica até aproximadamente a profundidade de 30 m, sendo interrompida por irregularidades nas formas de fundo. Esse declive é o gradiente de passagem do domínio emerso para a plataforma continental, sendo normalmente estreito entre Fortaleza e Pecém, onde a largura é mínima (Ceará, 1996). O MDT (Figura 3.1.3.2) exibiu essas discontinuidades na morfologia do fundo, diferenciando-se do padrão de rampa da plataforma continental. Essa quebra na monotonia morfológica é explicada pela atuação pretérita de cursos fluviais que interceptavam a costa em níveis de mar mais baixo (Quaternário). Vale salientar a relevância dessas feições na gênese dos pláceres marinhos, assim como dos bancos arenosos que ocorrem na plataforma interna e favorecem a concentração de minerais pesados nas cavas entre esses bancos. Vales e depressões são comuns na plataforma continental cearense e podem ser resultado também da erosão atual realizada por correntes de turbidez, ou colmatados por sedimentos marinhos (Ceará, 1996).

A proximidade do embasamento cristalino em áreas da zona costeira influencia no aporte de minerais pesados para a plataforma continental estudada e esse fato é perceptível na folha Fortaleza onde há predominância dos pláceres (Figura 3.1.3.3 A). No litoral cearense o embasamento cristalino aflora de forma pontual em Jericoacorara, Pecém, Ponta do Mucuripe e Iguape que por vezes se projetam para o mar na forma de pontas ou promontórios, tem certa resistência litológica e desempenham papel relevante no balanço de sedimentos (Morais *et al.*, 2006). As rochas pertencentes ao Complexo Ceará podem ser as principais responsáveis pelo aporte de minerais pesados concentrados na folha Fortaleza. Essas rochas são constituídas essencialmente por rochas paraderivadas, predominando metapelitos (biotita gnaisses geralmente com granadas e com cianita e/ou sillimanita) associadas a quartzitos e metacarbonatos em quantidade subordinada, podendo ocorrer raras intercalações de rochas metavulcânicas básicas e ácidas (Garcia e Arthaud, 2004).

O embasamento cristalino (Figura 3.1.4 A) aflora entre as cotas batimétricas de -14 e -28 metros nas proximidades do Porto do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante (Ceará, 1996), sendo uma importante fonte direta de sedimentos terrígenos onde se originam os pláceres pelo carreamento dos minerais leves e concentração dos pesados pela hidrodinâmica. A constatação desses afloramentos rochosos na plataforma continental foi possível pela análise de sismogramas (Figura 3.1.4 A), identificando elevações do topo do embasamento onde a espessura do pacote sedimentar nas proximidades da costa é praticamente zero. Esses afloramentos são constituídos por quartzitos, gnaisses, entre outros litótipos do Complexo Ceará, revelando a contribuição do aporte de terrígenos para a plataforma continental tanto em domínio emerso como submerso.

Figura 3.1.4 A - Sismograma próximo ao Porto do Pecém onde os refletores indicam o topo do embasamento com camadas de areias calcíferas.

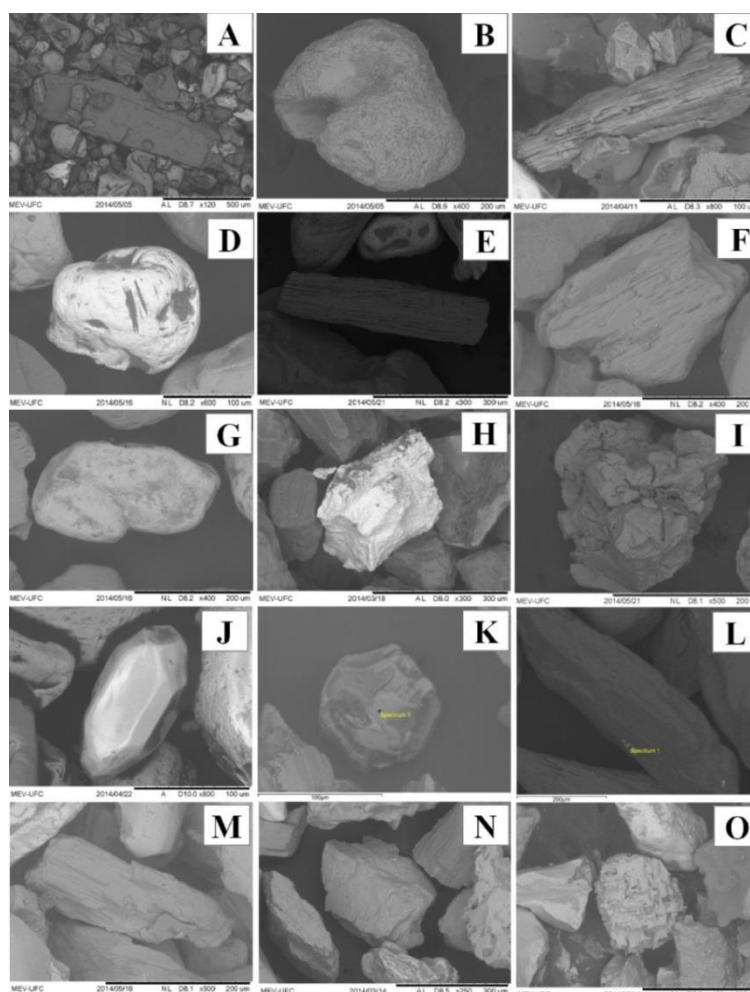


Fonte: Ceará, 1996

A ilmenita e a turmalina são os minerais pesados com maior aporte para a plataforma continental (Tabela 3.1.3.3, Figuras 3.1.3.3 B a 3.1.3.3 E) das cartas Bitupitá e Acaraú (distribuição com as maiores variações acima de 70%), Itarema (distribuição com as maiores variações acima de 50%) e Fortaleza (cuja distribuição é bem variável, tendo um incremento no extremo leste). Provavelmente um fator

determinante para a presença de ilmenita é seu teor nas áreas fontes, já que é um mineral presente em rochas ígneas, metamórficas, areias pretas costeiras e está amplamente distribuída (média 40,05%) nos sedimentos da área estudada. A ilmenita comporta-se como um mineral instável quando submetida ao intemperismo químico (Suguio, 2003), contudo o clima predominante na área de estudo, favorece o intemperismo físico nas áreas fonte, não comprometendo a concentração efetiva desse mineral nos sedimentos estudados. A assembleia dos pesados na plataforma continental estudada reflete proveniências regional (retrabalhando da Formação Barreiras) e local (intemperismo direto das rochas do Complexo Ceará), com contribuições mistas e heterogeneidade intrínseca dos sedimentos pela diversidade mineralógica (Figura 3.1.4 B).

Figura 3.1.4 B – Grãos de minerais pesados imageados em MEV (A – Cianita, B – Rutilo, C – Hornblenda (hornblenda), D – Monazita, E – Silimanita, F – Turmalina, G – Ilmenita, H – Cassiterita, I – Epídoto, J – Zircão, K – Granada, L – Andaluzita, M – Diopsídio, N – Estaurolita e O – Apatita).



Fonte: Aguiar Neto (2014).

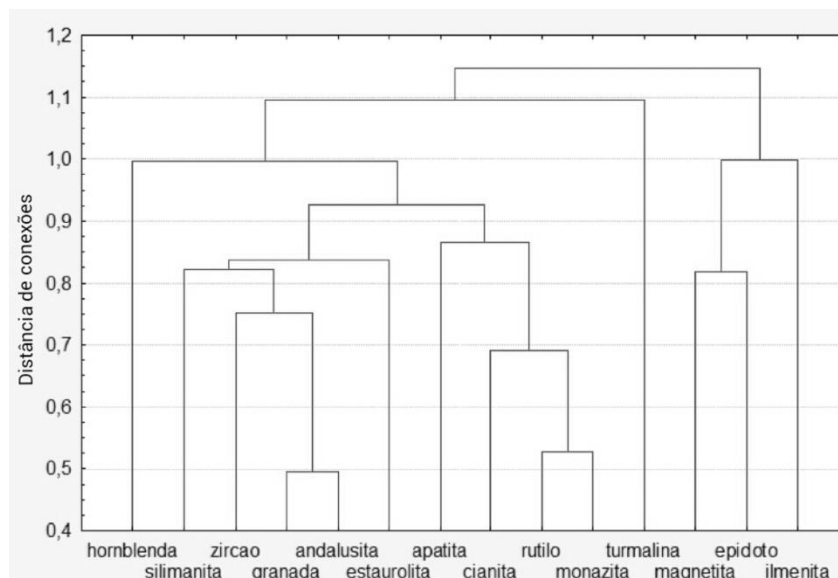
Os minerais pesados: epídoto, hornblenda, diopsídio, espinélio, granada (almandina), andaluzita, cianita, silimanita, estaurolita, rutilo são espécies indicativas de metamorfismo regional. As seis últimas são comuns em amostras de aluviões, considerando que a cianita e o rutilo também são comuns em depósitos litorâneos. A granada, andaluzita, cianita, silimanita, estaurolita e rutilo é uma assembleia típica de rochas ricas em alumínio; epídoto, diopsídio e espinélio são típicos de calcários metamorfizados; o epídoto pode ser também indicativo de hidrotermalismo e de metamorfismo de rochas básicas, além de ocorrer também em rochas ígneas (Klein e Dutrow, 2012; Pereira *et al.*, 2005). Essa assembleia é compatível com as rochas paraderivadas do Complexo Ceará, Unidade Canindé.

Os minerais pesados: monazita, zircão, turmalina, magnetita, apatita, cassiterita, ilmenita são espécies predominantes em rochas ígneas. A ilmenita associa-se com magnetita, monazita, zircão e rutilo constituindo as areias pretas que ocorre em áreas costeiras (Klein e Dutrow, 2012). A turmalina além de ser um mineral típico de pegmatitos graníticos, ocorre também em sedimentos marinhos e aluvionares, além de calcários metamórficos. A abundância em turmalina e zircão podem também sugerir retrabalhamento sucessivo de sedimentos antigos (Pereira *et al.*, 2005; Suguio, 2003). A presença de cassiterita numa amostra defronte a São Gonçalo do Amarante (Figura 3.1.4 B) fortalece a ideia de área-fonte bastante próxima (0,5 – 1 Km) devido a alta densidade ($\sim 7,15 \text{ g/cm}^3$) dificultar seu deslocamento para longas distâncias.

A análise de agrupamento forneceu as primeiras constatações sobre as paragêneses minerais através das associações lineares entre os minerais presentes na plataforma continental estudada. O dendograma (Figura 3.1.4 C) mostrou claramente essas associações entre minerais quimicamente estáveis e menos estáveis, como por exemplo zircão, granada e andaluzita; rutilo, monazita, apatita e cianita. Uma explicação seria a deposição e transporte de sedimentos atuais juntamente com o retrabalhamento de sedimentos antigos na área de estudo, todos tendo sua dispersão mecânica influenciada pela densidade de cada mineral e energia de ondas e correntes oceânicas. A maioria dos minerais pesados revelou proveniência de rochas metamórficas, próximas ou afastadas do ambiente de deposição pela paragênese hornblenda, silimanita, granada, andalusita, estaurolita, cianita, rutilo e epídoto. Vale ressaltar a ocorrência de afloramentos do embasamento (Complexo Ceará) na plataforma continental próximo ao Porto do

Pecém, contribuindo diretamente como fontes de minerais pesados para os plácemes nesses locais.

Figura 3.1.4 C – Dendograma da assembleia de minerais pesados da plataforma continental oeste do Ceará.



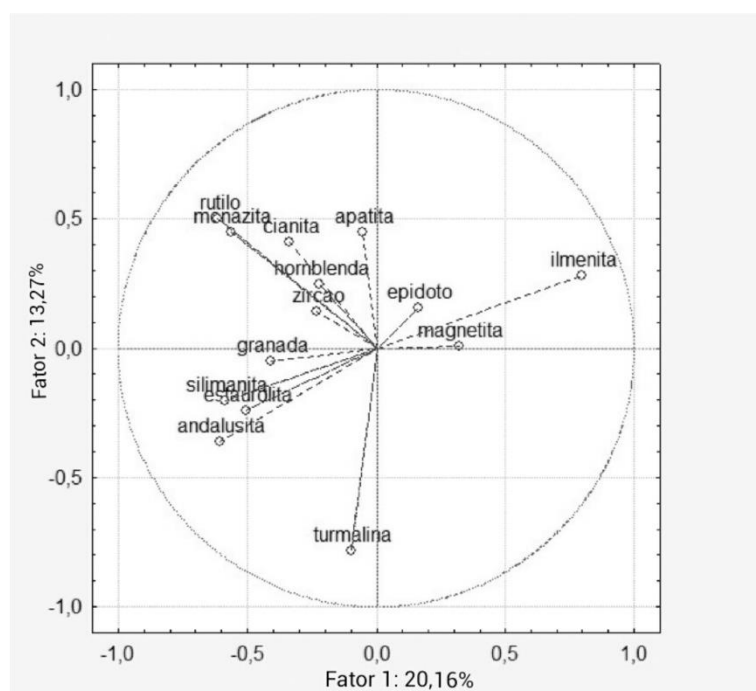
Fonte: Aguiar Neto (2014).

Na Análise de Componentes Principais (Figura 3.1.4 D), observou-se que os minerais de maior variância no eixo principal com 20,16% do total das variâncias são ilmenita, magnetita e epidoto. Esses minerais não necessariamente apresentam correlações entre si, provavelmente isso se deva à dinâmica do ambiente. O epidoto é um mineral indicador de condições hidrotermais cristalizado em todas as condições de metamorfismo regional (Pereira *et al.*, 2005). Magnetita e ilmenita são minerais cristalizados em variados tipos de rochas, contudo podem ocorrer associados em um mesmo sedimento (Suguió, 2003). Na segunda componente principal, com 13,27% da variância total das amostras os minerais pesados de maior variância são: rutilo, monazita, cianita, apatita. Graficamente, as duas primeiras componentes representam variabilidade suficiente que possa indicar um padrão a ser interpretado (Landim, 2000).

A associação estauroлита, cianita, silimanita, granada e rutilo reflete metamorfismo regional de médio a alto grau na fácies anfíbolito em ambiente químico aluminoso (Coimbra *et al.*, 1995), reforçando essa paragênese como

diagnóstico das rochas pertencentes ao Complexo Ceará. Os minerais pesados: rutilo, monazita, cianita e zircão reunidos no componente 2 caracterizam areias negras praias, onde é comum essa associação mineralógica.

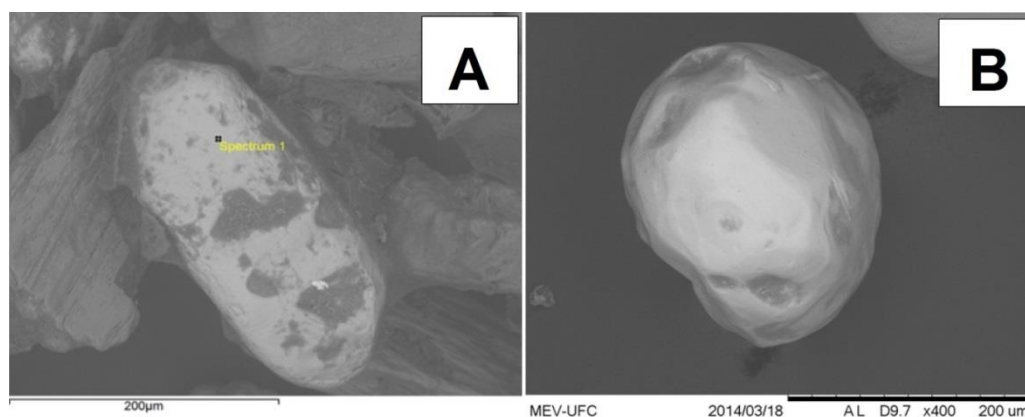
Figura 3.1.4 D – ACP da assembleia de minerais pesados da plataforma continental oeste do Ceará.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

As análises de agrupamento e de componentes principais sugeriram que a assembleia mineral que ocorre na área de estudo se comporta de acordo com o regime hidrodinâmico, caracterizado pela alta dispersão dos sedimentos e caráter de natureza dual da proveniência desses minerais (fontes de origem sedimentar e de rochas do embasamento cristalino). Corrobora com essa constatação imagens de grãos de zircão de fonte ígnea (eudral) e de alta reciclagem sedimentar (arredondado) em amostras pontuais próximas na carta Fortaleza (Figura 3.1.4 E).

Figura 3.1.4 E – Zircão eudral (A) e arredondado (B), ao longo do litoral de São Gonçalo do Amarante.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

A análise de fatores (Tabela 3.1.4) produz um número de fatores que correspondem às associações minerais que refina os limites de províncias deposicionais para as espécies minerais envolvidas (Wong, 2001). No grupo de minerais representado pelo fator 1, ilmenita e magnetita se destacam com fortes correlações, essa associação geralmente ocorre em depósitos litorâneos onde esses minerais encontram-se pré-concentrados e associados em um mesmo sedimento. No grupo representado pelo Fator 2, monazita, rutilo, cianita e apatita podem caracterizar areias pretas praias. No Fator 3 destaca-se a turmalina que pode ser compatível com rochas ígneas. No Fator 4, o grupo de minerais composto pela sillimanita, epídoto e hornblenda é indicativo de metamorfismo regional, provavelmente diagnóstico das rochas paraderivadas do Complexo Ceará, Unidade Canindé.

Uma forma de ordenar as diversas fontes que originaram os pláceres marinhos na área de estudo é considerar as rochas do Complexo Ceará como fonte primária de sedimentos, seguido por fontes secundárias (Retrabalhamento da Formação Barreiras, areias pretas dos depósitos praias e sedimentos marinhos de deriva litorânea). As intercorrelações estatísticas oriundas das análises de agrupamento, componentes principais e de fatores, juntamente com as peculiaridades do ambiente estudado (heterogeneidade, grau de dispersão dos sedimentos plataformais e dinâmica do ambiente), serviram para caracterizar a área-fonte que por sua vez possui uma natureza dual. Deve-se ainda considerar o aporte fluvial pretérito (paleocanais) e atual na origem desses pláceres marinhos e a forma

como todos os fatores anteriormente descritos interagem num ambiente extremamente dinâmico que revela a complexidade e diversidade mineralógica na gênese desses depósitos.

Tabela 3.1.4 – Análise de fatores das espécies minerais identificadas na plataforma continental oeste do Estado do Ceará.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
ilmenita	0,797144	0,282732	-0,195766	-0,286681
turmalina	-0,099976	-0,784730	0,292839	-0,186600
monazita	-0,564040	0,448949	0,268644	-0,151127
estauroлита	-0,505047	-0,241636	-0,092336	-0,441634
andalusita	-0,608409	-0,360298	-0,412970	0,175865
silimanita	-0,586627	-0,204047	0,026508	0,406134
epídoto	0,158508	0,154632	-0,201267	0,615981
hornblenda	-0,221935	0,247473	0,521557	0,535776
zircao	-0,230912	0,143551	-0,586446	0,116301
rutilo	-0,614108	0,500503	0,031394	-0,132303
cianita	-0,336418	0,412037	0,046073	-0,258280
apatita	-0,056521	0,450033	-0,166023	-0,085443
granada	-0,409376	-0,049873	-0,593383	-0,130374
magnetita	0,317614	0,009465	-0,474683	0,216034

Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.1.5. Conclusões

Os minerais pesados da plataforma continental oeste cearense tendem a se concentrar na porção mais a leste da área (folha Fortaleza) com teores de até 4,54% na fração analisada e representados pelas espécies: ilmenita, turmalina, epídoto, hornblenda, monazita, estauroлита, sillimanita, rutilo, magnetita, zircão, andalusita, cianita, granada, leucoxênio, diopsídio, apatita, espinélio e cassiterita. Os pláceres marinhos localizam-se predominantemente nas areias litoclásticas e litobioclásticas,

em profundidades inferiores a 20 metros, levando-se em consideração as irregularidades do fundo marinho e com significativa deposição de ilmenita e turmalina, que juntamente com as demais espécies forneceram informações sobre as áreas-fonte desses depósitos. A contribuição local (primária) é atribuída às rochas metamórficas do Complexo Ceará que tanto ocorre próximo à costa em domínio continental como aflora na plataforma continental nas proximidades do Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) em profundidades de -14 e -28 m. A Formação Barreiras, pela sua extensão ao longo da costa, contribui de forma regional pelo aporte dos sedimentos marinhos, que juntamente com as areias pretas dos depósitos praias e os sedimentos marinhos de deriva correspondem, às contribuições secundárias dos pláceres marinhos objeto desse estudo. A estatística multivariada expôs pelas análises de agrupamento e de componentes principais a existência de sedimentos atuais e retrabalhados, sendo influenciados pela dinâmica do ambiente. A análise de fatores sugeriu a discriminação de dois tipos de proveniências pelas associações das variáveis nos fatores 1 e 2 como proveniência dos sedimentos praias e fatores 3 e 4 correspondentes as rochas do Complexo Ceará. Contudo deve-se considerar como características mais marcantes a heterogeneidade e grau de dispersão dos sedimentos plataformais que se unem a dinâmica do ambiente e áreas-fonte mistas, aliados ainda o aporte fluvial pretérito (paleocanais) e atual para o ambiente plataformal.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) e os laboratórios de Microscopia Eletrônica de Varredura e de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Referências

Addad, J. E. 2010. *Minerais Pesados: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental*. São Paulo, Edição Independente, 208p.

Almeida, N. M., Lehueur, L. G. O., Freire, G. S. S., Santos, D. M. & Aguiar Neto, A. B. 2011. Assembléia de Minerais Pesados da Plataforma Continental – Porção Oeste do Estado do Ceará, Brasil. *Revista de Geologia*, 24(1): 21-27.

- Andriotti, J. L. S. 1997. Análise de Componentes Principais: Fundamentos de uma técnica de análise de dados multivariada aplicável a dados geológicos. *Acta Geologica Leopoldensia*, 20(44):27-50.
- Barreto, L. A., Milliman, J. D., Amaral, C. A. B. & Francisconi, O. 1975. Upper continental margin sedimentation off Brazil. *Contributions to Sedimentology*, 4:11-43.
- Cascalho, J., Oliveira, A., Rodrigues, A., Taborda, R., Fonseca, R. & Fernandes, C. 2007. Características Sedimentares da Plataforma SW da Ilha da Madeira. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 4, 2007, Funchal. *Anais do IV Congresso Sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Funchal, p. 1-14.
- Cavalcanti, V. M. M. 2011. *Plataforma continental: a última fronteira da mineração brasileira*. Brasília, DNPM, 104p.
- Ceará. 1996. Secretaria dos Transportes, Energia, Comunicação e Obras – SETECO. *Estudo de Impacto Ambiental – EIA: obras off-shore do Porto de Pecém*. Fortaleza, SETECO, 3 (A e B), 355p.
- Coimbra A.M., Sant'ana L.G. & Valarelli J.V. 1995. Bacia de Curitiba: estratigrafia e correlações regionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1995, Salvador. *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*, Salvador, SBG, p. 135-137.
- Conceição, J.C., Zálan, P.V. & Wolf, S. 1988. Mecanismo, evolução e cronologia do rift sul-atlântico. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 2(2/4): 255-265.
- Corrêa, I. C. S., Ayup-Zouain, R. N., Weschenfelder, J. & Tomazelli, L. J. 2008. Áreas Fontes dos Minerais Pesados e sua Distribuição sobre a Plataforma Continental Sul-brasileira, Uruguiana e Norte-argentina. *Revista Pesquisas em Geociências*, 35(1): 137-150.
- Emery, K. O. & Noakes, L. C. 1968. Economic placer deposits of the continental shelf. *Technical Bulletin Economic Commission for Asia and Far East*, 1:95-110.
- França, A. M. C., Coutinho, P. N. & Moraes, J. O. 1976. Sedimentos superficiais da margem continental Nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geologia*. 6(2): 78-88.
- Freire, G.S.S. 1985. *Geologia Marinha da Plataforma Continental do Estado do Ceará*. Recife, 108p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- Galehouse, J.S. 1971. Point counting. In: Carver, R. E. (Ed.). *Procedures in Sedimentary Petrography*. New York, Wiley-Interscience, p. 385-407.
- Garcia, M. G. M. & Arthaud, M. H. 2004. Caracterização de trajetórias P-T em nappes brasileiras: região de Boa Viagem/Madalena – Ceará Central (NE Brasil). *Revista de Geologia*, 17(2):173-191.

Gent, M. R., Alvarez, M. M., Iglesias, J. M. G. & Alvarez, J. T. 2005. Offshore Occurrences of Heavy-Mineral Placers, Northwest Galicia, Spain. *Marine Georesources and Geotechnology*, 23:39-59.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. 2007. Ceará em Mapas. In: IPECE, Fortaleza, *Ceará em Mapas*. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/126x.htm>>. Acesso em: 05 set. 2014.

Klein, C. & Dutrow, B. 2012. *Manual de ciência dos minerais; tradução e revisão técnica*. Porto Alegre, Bookman, 706p.

Kudrass, H.R. 2000. Marine placer deposits and sea-level changes. In: Cronan, D.S.(Ed.). *Handbook of Marine Mineral Deposits*. Boca Raton, CRC Press, p. 3-26.

Lalomov, A. V. & Tabolitch, S. E. 2000. Age determination of coastal submarine placer, Val'cumey, northern Siberia. *CEN Technical Journal* 14(3):83-90

Lamas, F., Irigaray, C., Oteo, C. & Chacon, J. 2005. Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls. *Engineering geology*, 81:32-41.

Landim, P.M.B. 2000. Análise estatística de dados geológicos multivariados. In: DGA, IGCE, UNESP, Rio Claro, *Texto Didático 03*, Rio Claro. 128 p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/multivariados.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2014.

Larsonneur, C. 1977. La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise en points et utilisée en Manche. *Journal de Recherche Oceanographique*, 2: 34-39.

Lewis, G. R. 1924. *The Stannaries: a study of the English Tin Miner*. Cambridge, Harvard University Press, 335p.

Lima, S. F., Silva Filho, W. F., Pinheiro, R. D., Freire, G. S. S., Maia, L.P. & Monteiro, L. H. U. 2001. ANASED – Programa de análise, classificação e arquivamento de parâmetros sedimentológicos. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8, 2001, Imbé. Anais do VIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Imbé, ABEQUA. 1 CD-ROM.

Martins, L. R. & Coutinho, P. N. 1981. The Brazilian Continental margin. *Earth Science Reviews*, Amsterdam, 17:87 –107.

Milani, E. J. , Brandão, J. A. S. L., Zalán, P. V. & Gamboa, L. A. P. 2001. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Revista Brasileira de Geofísica*. 18(3):352-396.

Morais, J. O., Freire, G. S. S., Pinheiro, L., Souza, M. J. N., Carvalho, A. M., Pessoa, P. R. & Oliveira, S. H. M. 2006. Erosão e progradação do litoral brasileiro: Ceará. *In*: Muehe, D. (Ed.). *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*, 2006, Brasília. p. 132-154. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_publicacao/78_publicacao12122008085953.pdf> Acesso em: 03 out. 2014.

Palma, J.C. 1979. *Depósitos de Minerais Pesados*. Rio de Janeiro, Série Projeto REMAC, 10, p.33-50 (Relatório Final).

Parfenoff, A., Pomerol, C. & Toureng, J. 1970. *Les minéraux en grains – Méthodes d'études et de détermination*. Paris, Masson et Cie, 578p.

Pereira R.M., Ávila C.A. & Lima P.R.A.S. 2005. *Minerais em grãos. Técnicas de coleta, preparação e identificação*. São Paulo, Oficina de Textos, 128p.

Silva, C. G. 2000. Placeres Marinhos. *Brazilian Journal of Geophysics*, 18(3): 327-336.

Silva, A. M. C. 2005. *Relações entre a dinâmica costeira e a meio fauna dos sedimentos praias do litoral da Ilha de Itamaracá, PE*. Recife, 139p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

Silva Filho, W. F. 2004 *Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental do Estado do Ceará*. Porto Alegre, 307p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Silva, M. V. C. & Moraes, J. O. 2013. Morfologia de fundo do litoral do Camocim Estado do Ceará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, p.7848-7855.

Suguio, K. 2003. *Geologia Sedimentar*. São Paulo, Edgard Blücher, 400p.

Tomazzoli, E. R., Oliveira, U. R. & Horn Filho, N. O. 2007. Proveniência dos Minerais de Óxidos de Fe-Ti nas Areias da Praia do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC), Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25 (Supl.1): 49-64.

Wong, F. L., 2001. Heavy minerals from the Palos Verdes margin, California: Data and factor analysis. *US Geological Survey Open-file Report*, 01-153.

3.2 Segundo Artigo. Aceito para publicação na Revista Geociências da UNESP PLÁCERES MARINHOS ENTRE CAUCAIA E TRAIRI, ESTADO DO CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL

Antonio Borges de Aguiar Neto¹, George Satander Sá Freire², Narelle Maia de Almeida³

^{1, 3} Doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGG) da Universidade Federal do Ceará (UFC). ¹ tonygeoufc@hotmail.com; ³ narellemaia@gmail.com.

² Professor Adjunto do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (DEGEO/UFC). freire@geologia.ufc.br

RESUMO

Neste trabalho foram realizados estudos da morfologia, classificação textural e dos minerais pesados nos sedimentos de fundo da plataforma continental interna do Ceará, entre as cidades de Caucaia (Região Metropolitana de Fortaleza) e Trairi. O modelo digital de fundo desta plataforma continental revelou um relevo suave com presença de irregularidades entre as cidades de Paracuru e São Gonçalo do Amarante, com a possível ocorrência do paleocanal do Rio Curu, constatação reforçada pelo padrão de distribuição do diâmetro médio dos grãos. Ocorrem significativas concentrações de minerais pesados de até 4,54% com a predominância de ilmenita e turmalina, que juntamente com epidoto e monazita apresentaram teores acima de 1 Kg/ton ao longo da costa de São Gonçalo do Amarante. Pela composição química de alguns grãos de ilmenita foi possível verificar o enriquecimento em titânio nesses grãos por alteração intempérica, com conteúdo de TiO₂ acima de 89%. A área de estudo apresenta condições ambientais favoráveis à acumulação de minerais pesados e os pláceres identificados são considerados recursos minerais estratégicos. Além da importância econômica desses depósitos é preciso considerar a fragilidade do ambiente onde eles ocorrem para minimizar os impactos inerentes das atividades de mineração no meio marinho.

Palavras-chave: minerais pesados, plataforma continental, pláceres marinhos, sedimentologia.

ABSTRACT

This work studies the morphology, textural classification and heavy minerals in bottom sediments of the inner continental shelf of Ceará, between the cities of Caucaia (Fortaleza Metropolitan Region) and Trairi. The digital model of bottom continental shelf exposed a smooth relief with the presence of irregularities between the cities Paracuru and São Gonçalo do Amarante, with a possible occurrence of paleochannel of the Curu River, the standard distribution of the average grain diameter reinforced this occurrence. Significant concentrations of heavy minerals up to 4.54 % are presents, ilmenite and tourmaline are the predominant species and showed contents over 1 Kg/ton along the São Gonçalo do Amarante coast together epidote and monazite. By chemical composition of some grains of ilmenite was possible to verify the enrichment of titanium in these weathered grains, with TiO₂ content over 89 %. The study area has favorable environmental conditions to the accumulation of heavy minerals and the identified placers are considered strategic mineral resources. Besides the economic importance of these deposits is necessary to consider the fragility of the environment where they occur to minimize the impacts by marine mining activities.

Keywords: heavy minerals, continental shelf, marine placers, sedimentology.

3.2.1 Introdução

A distribuição mundial desigual de recursos minerais no continente, a constante demanda por matéria-prima na indústria e a importância crescente na proteção e conservação dos ambientes impulsionam o conhecimento dos depósitos minerais marinhos, aumentando o significado futuro dos mesmos. Os minerais pesados (densidade superior a 2,89 g/cm³) podem formar acumulações sedimentares de valor econômico (Dominguez, 2010). A partir da decomposição e erosão de rochas-fonte quer sejam ígneas, metamórficas ou sedimentares, esses minerais são concentrados mecanicamente originando os depósitos do tipo plácer. O termo plácer no seu sentido original não apresenta necessariamente conotações econômicas, restringindo-se a acumulação de minerais pesados (Palma, 1979). Os grãos que se originaram no continente podem ser

transportados para os oceanos por processos glaciais, fluviais e eólicos onde sofrem retrabalhamento e concentração por processos marinhos (energia de ondas, transgressões e regressões, etc). Souza & Abreu (2005) destaca os pláceres de ilmenita, rutilo, zircão, monazita, magnetita, cassiterita, ouro e diamante pelo valor econômico dos mesmos, além de possuírem metais estratégicos associados passíveis de exploração: ferro, titânio, tório, zinco, dentre outros.

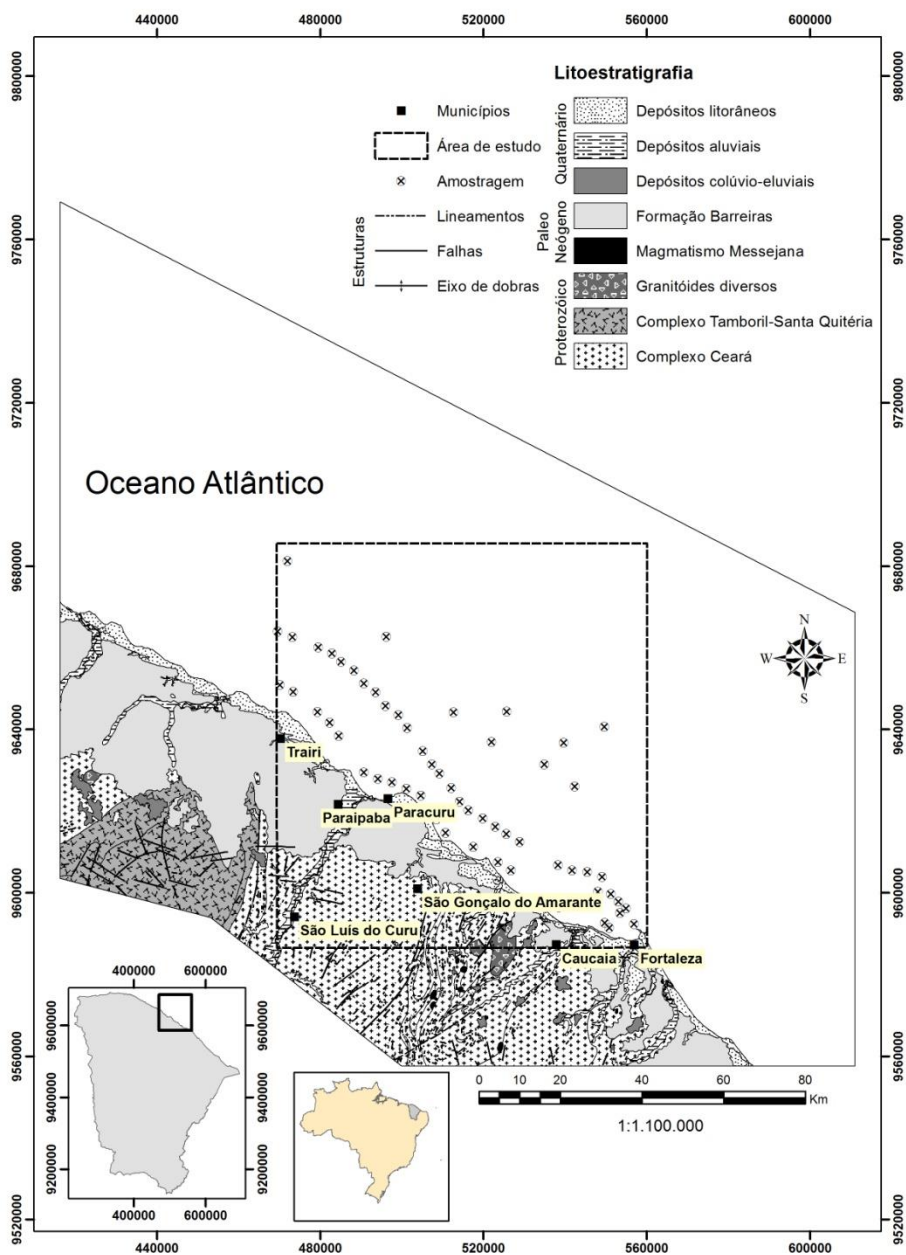
Segundo Santana (1997) desde a costa do Pará até a do Rio Grande do Sul, encontram-se sítios com elevadas concentrações de minerais pesados em depósitos emersos. Contudo, nos depósitos submersos, a exemplo da plataforma continental, existe uma carência de estudos sobre essas espécies minerais, suas concentrações e áreas de distribuição. A evolução do conhecimento sobre a plataforma continental do Ceará teve início com o primeiro mapa de sedimentos plataformais entre Recife (PE) e Cabo Orange (AP) por Coutinho & Morais (1968). Trabalhos pioneiros na plataforma continental cearense constataram locais com ocorrência abundante de minerais pesados além de concentrações de ilmenita acima de 1 Kg/t no extremo oeste (Barreto et al., 1975; França et al., 1976; Arthaud et al., 1976). Os trabalhos mais atuais revelaram um teor médio de minerais pesados de 1,8% na porção a leste de Fortaleza, 0,22% entre os municípios de Jijoca de Jericoacoara e Camocim e de 1,4% ao longo de toda a costa a oeste de Fortaleza; vale ressaltar a predominância da ilmenita e amostras com percentuais máximos de até 9% de pesados (Ramos & Santos, 2005; Maia, 2005; Almeida et al., 2011).

A área de estudo está situada no Estado do Ceará, nordeste do Brasil, entre a zona costeira das cidades de Caucaia (Região Metropolitana de Fortaleza) e Trairi, até a isóbata de 30m (Figura 3.2.1.1). Os objetivos desse trabalho é delimitar os possíveis pláceres marinhos pela distribuição espacial dos dados de concentração total (%) de minerais pesados, abundâncias relativas (%) das espécies minerais e teores em quilograma por tonelada (Kg/ton) dos minerais predominantes; correlacionar a morfologia de fundo da área de estudo e a textura dos sedimentos com a ocorrência desses depósitos e analisar a composição química mineral dos grãos dos depósitos com potencial econômico.

3.2.1.1 Contexto Geológico Continental

A geologia continental no entorno da área de estudo engloba rochas proterozóicas dos Complexos Ceará (Arthaud et al., 1998) e Tamboril-Santa Quitéria (Fetter et al., 2003), incluindo paragneisses, ortogneisses ácidos, metagabros, anfíbolitos com ou sem granada, gnaisses dioríticos, lentes de quartzitos, metacalcários, micaxistos aluminosos, calcissilicáticas, além de granitoides diversos. A sequência cenozoica se inicia com as rochas vulcânicas alcalinas (fonolitos, traquitos, sienitos) do Magmatismo Messejana que ocorreu no Paleógeno, seguida pelos sedimentos areno-argilosos com matriz argilo-cauliníca, cimento argiloso, ferruginoso e às vezes silicoso da Formação Barreiras no Neógeno. Os sedimentos quaternários são representados pelos depósitos colúvio-eluvionares areno-argilosos que em certos locais aparecem cascalhosos e laterizados na base; depósitos aluviais constituídos por argilas, areias argilosas e quartzosas, cascalhos e argilas orgânicas de origem fluvial e em parte com influência marinha. Os depósitos litorâneos de dunas fixas e paleodunas são compostos por areias de granulação fina a média, quartzosas ou quartzofeldspáticas, bem selecionadas; e os depósitos litorâneos das praias atuais e dunas móveis formados por areias esbranquiçadas, quartzosas, de granulometria variável, bem selecionadas com concentrações de minerais pesados. (CPRM, 2003).

Figura 3.2.1.1 – Geologia continental e localização da área de estudo.



Fonte: Banco de dados do LGMA, Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

3.2.2 Caracterização da Área de Estudo

3.2.2.1 Contextos Climático e Oceanográfico

O nordeste brasileiro, onde está inserida a área de estudo, está submetido à altas taxas de insolação com temperatura média anual de 26,9°C,

umidade relativa do ar variando de 83,9% a 74% e pluviosidade média de 1440 mm ao ano (Monteiro, 2011).

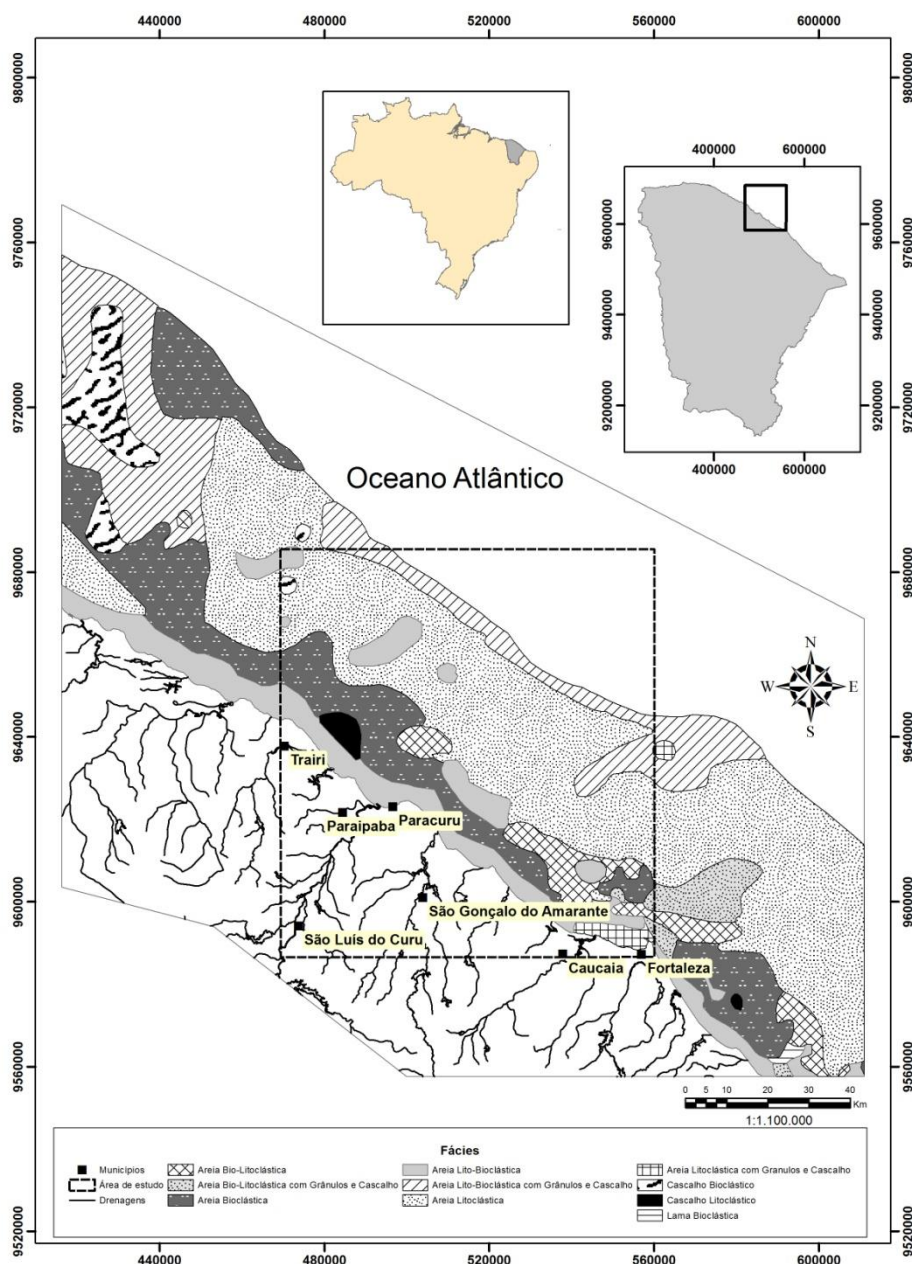
A plataforma continental cearense está sob as influências das correntes Norte Brasileira e Equatorial Sul. A primeira possui águas oxigenadas e salinas, a segunda age no sentido leste-oeste na altura do Equador provinda das proximidades da costa africana para o Brasil (Freire, 1985; Monteiro, 2011). As marés no Estado do Ceará são semidiurnas com amplitudes variando entre 0,75 m a 3,23 m, as ondas apresentam média de altura de 1,15 m com moda de 1,14 m e período médio de onda mais frequente de 5,70 segundos, associado à altura, e média de 5,89 segundos (Freire, 1985; Maia, 1998).

3.2.2.2 A plataforma Continental Cearense

Possui largura média de 63 Km, com largura máxima de 101 Km na altura de Camocim e mínima de 41 Km em Icapuí; apresenta pequeno e constante declive em quase toda a sua extensão, com rupturas múltiplas em degraus que correspondem a antigas linhas de costa; é dividida em plataforma interna que vai desde a linha de costa até a profundidade de 20 m, e plataforma externa, de 20 m até a zona da quebra (com profundidade de 60 m no setor noroeste e até 80 m no setor sudeste).

A sedimentação nessa plataforma (Figura 3.2.2.2) é predominantemente bioclástica (carbonática algálica), com contribuições de até 75%, os sedimentos siliciclásticos estão mais presentes na plataforma interna e defronte a Fortaleza e chegam até a borda da plataforma (Martins & Coutinho, 1981; Freire, 1985; Silva Filho, 2004).

Figura 3.2.2.2 – Sedimentação plataformal na área de estudo e seu entorno.



Fonte: Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

3.2.3 Materiais e Métodos

Foram selecionadas 60 amostras (Figura 3.2.1.1) do banco de amostras do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) coletadas nas campanhas oceanográficas Geomar XVIII (1981) e Geocosta II (1994). Os sedimentos foram coletados com

amostrador pontual do tipo “Van-Veen” da linha de costa de Fortaleza ao município de Trairi até aproximadamente a isóbata de 30 m. As embarcações utilizadas foram o Barco de Pesquisa Professor Martins Filho da Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Navio Balizador Comandante Manhães da Marinha do Brasil. A compilação dos dados de Almeida et al., (2011) está inclusa nesse estudo.

A análise granulométrica foi realizada segundo o método tradicional de peneiramentos úmido e seco e por pipetagem, em seguida classificada suas texturas com o programa ANASED, proposto por Lima et al., (2001) e geração das medidas estatísticas dos dados granulométricos: média, mediana, curtose, assimetria e grau de seleção. O teor de carbonato foi determinado pelo método do Calcímetro de Bernard (Lamas et al., 2005, modificado).

Foram analisadas as frações correspondentes à areia muito fina a areia fina (0,062 a 0,250 mm), de acordo com os procedimentos estabelecidos por Parfenoff et al., (1970). A separação dos minerais pesados foi realizada através de separação densimétrica utilizando bromofórmio (CHBr_3), separação magnética com ímã de mão, e identificação das espécies minerais utilizando lupa binocular, seguida da quantificação das espécies pela contagem de 300 grãos minerais de acordo com Galehouse (1971).

As amostras dos possíveis depósitos de pláceres foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) com sistema de detecção de raios X por dispersão em energia (EDS – *Energy Dispersive System*) para obter imagens de alta resolução das feições morfológicas superficiais desses grãos, ocorrência de intercrescimentos e composição química mineral. Foram elaborados mapas faciológico, distribuição granulométrica e de minerais pesados com o *software* Arcgis 10.1 e geração do modelo digital de fundo da área de estudo utilizando o Surfer 10 com base em 372 cotas batimétricas para auxiliar na interpretação da morfologia da área e localização dos possíveis paleocanais.

3.2.4 Resultados

3.2.4.1 Granulometria

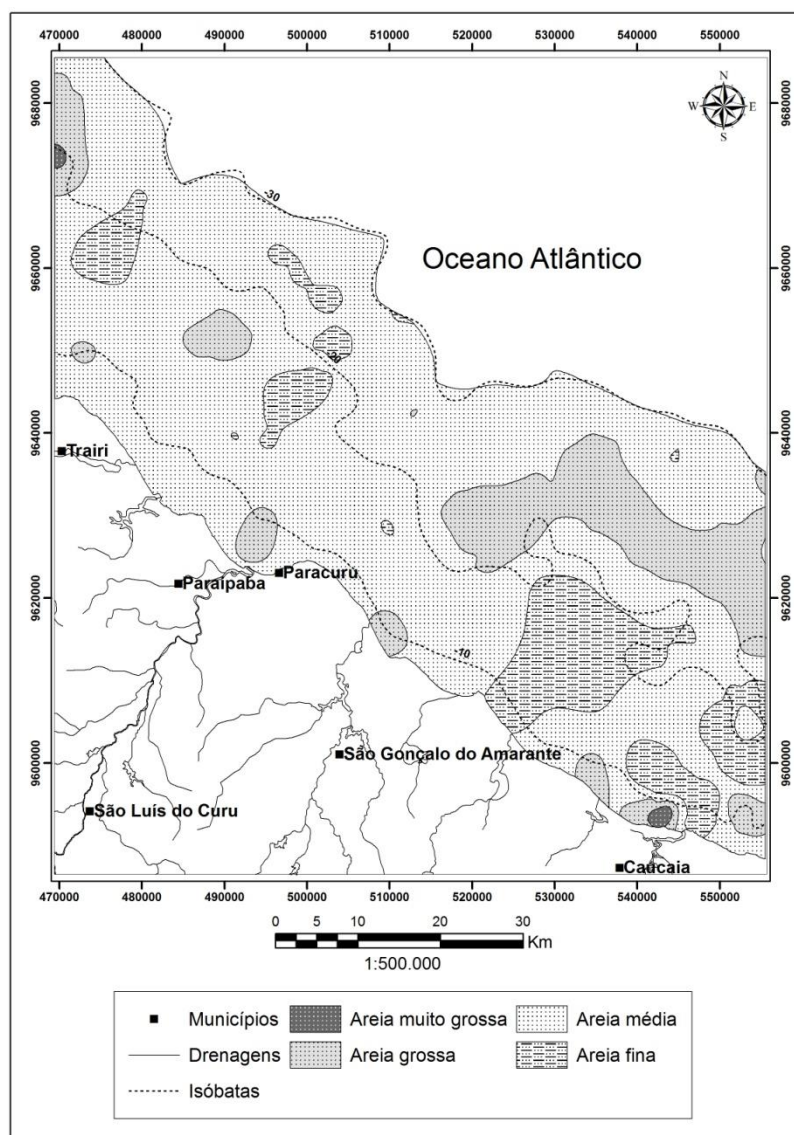
A análise granulométrica revelou a predominância da fração areia média (0,250-0,500 mm) ao longo da área da plataforma estudada (Figura 3.2.4.1). Entre a costa de São Gonçalo do Amarante até o extremo leste ocorre uma maior heterogeneidade no tamanho dos grãos, com domínios de areia fina (125–250 μm) em áreas mais rasas (até a isóbata de 20 m), areia grossa (0,500-1 mm) em alguns locais próximo à costa tendendo a se concentrar em maior profundidade (entre as isóbatas de 20 m e 30 m), e uma menor área de areia muito grossa (1-2 mm) na costa de Caucaia. Na direção oeste de São Gonçalo do Amarante essa heterogeneidade é menos marcada, a areia fina tende a se concentrar em áreas mais profundas (abaixo da isóbata de 10 m), a areia grossa assenta-se em alguns locais próximo à costa e acima da isóbata de 10 m, e a areia média distribui-se de leste a oeste tanto em áreas rasas como mais profundas. Os parâmetros granulométricos discriminou a curtose como muito platicúrtica a muito leptocúrtica, assimetria muito negativa a muito positiva e sedimentos de bem a muito mal selecionados (Tabela 3.2.4.1).

Tabela 3.2.4.1 – Parâmetros granulométricos dos sedimentos plataformais em Caucaia e Trairi.

	Diâmetro médio (mm)	Grau de Seleção	Curtose	Assimetria
Mínimo	0,132	0,00	0,58	-0,70
Máximo	1,959	2,59	1,90	0,66
Média	0,444	1,01	1,10	-0,07
Desvio Padrão	0,547	0,42	0,28	0,28

Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.2.4.1 – Distribuição dos sedimentos pelo diâmetro médio dos grãos na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.

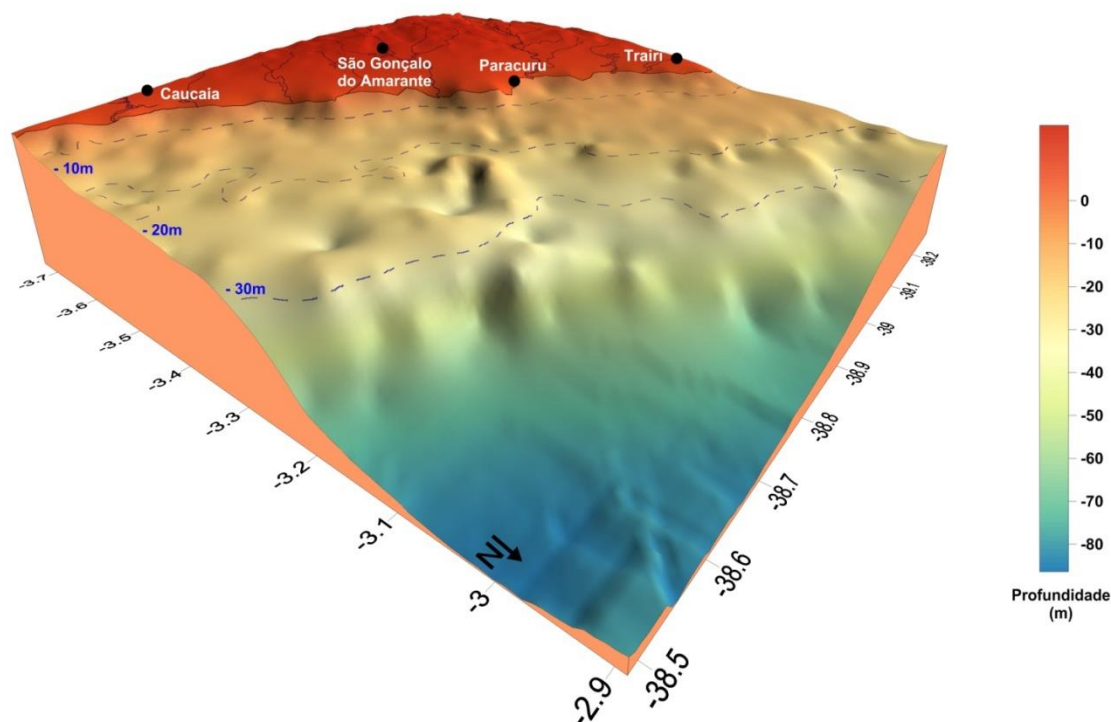


Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.2.4.2 Modelo digital de fundo da plataforma

O modelo digital revelou a predominância de uma morfologia suave com algumas irregularidades da forma de fundo, sendo uma delas bem evidente entre as isóbatas de 20 e 30 metros ao largo de São Gonçalo do Amarante e Paracuru, e outra menos marcada em direção a Caucaia (Figura 3.2.4.2). Essa característica morfológica pode ser indicativa do paleocanal do Rio Curu como já constatado por Silva Filho (2004).

Figura 3.2.4.2 – Modelo digital de fundo da plataforma continental entre Caucaia e Trairi.



Fonte: Banco de dados do LGMA, Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

Emery & Noakes (1968) sugeriram a localização de extensões de vales fluviais, faixas de banco arenosos derivados de ação das correntes de maré e antigas linhas de praia como feições submersas mais promissoras para prospecção de minerais pesados na plataforma continental.

3.2.4.3 Minerais Pesados

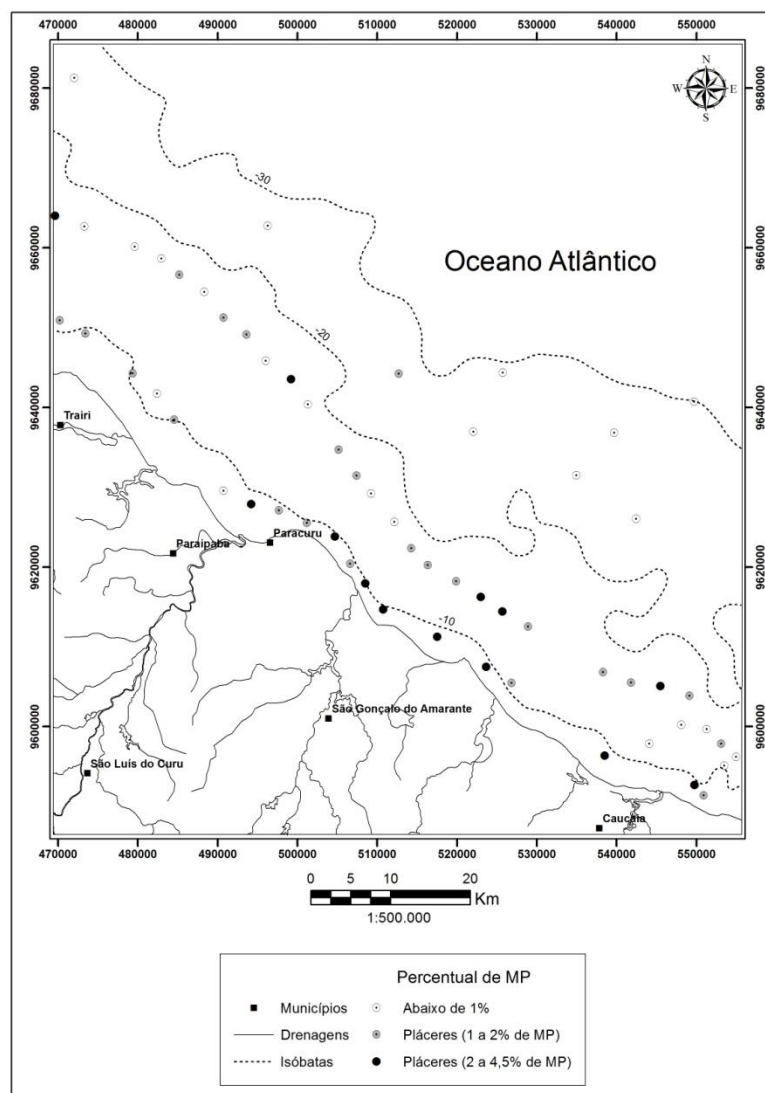
O conteúdo total de minerais pesados na fração analisada variou de 0% a 4,54%, com tendência de distribuição dos pláceres em águas mais rasas, até a isóbata de 20 m (Figura 3.2.4.3). A assembleia mineral é composta por 16 espécies com a predominância de ilmenita e turmalina (Tabela 3.2.4.3) de acordo com os percentuais médios.

Tabela 3.2.4.3 – Assembleia de minerais pesados na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.

	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Ilmenita	6,50	77,00	27,37	17,55
Turmalina	4,50	62,00	24,69	13,53
Epidoto	0,00	37,30	9,33	8,07
Silimanita	0,00	27,50	7,90	7,89
Anfibólio	0,00	29,00	7,51	6,67
Monazita	0,00	28,50	7,42	7,56
Estaurolita	0,00	17,50	5,77	4,72
Rutilo	0,00	14,20	3,37	4,09
Andaluzita	0,00	10,00	2,39	3,16
Magnetita	0,00	24,62	1,79	5,04
Zircão	0,00	5,70	1,70	1,91
Granada	0,00	6,00	0,38	1,19
Cianita	0,00	6,70	0,33	1,24
Apatita	0,00	1,00	0,05	0,20
Cassiterita	0,00	0,25	0,01	0,04
Leucoxênio	0,00	0,25	0,01	0,04

Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.2.4.3 – Distribuição dos pláceres na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.



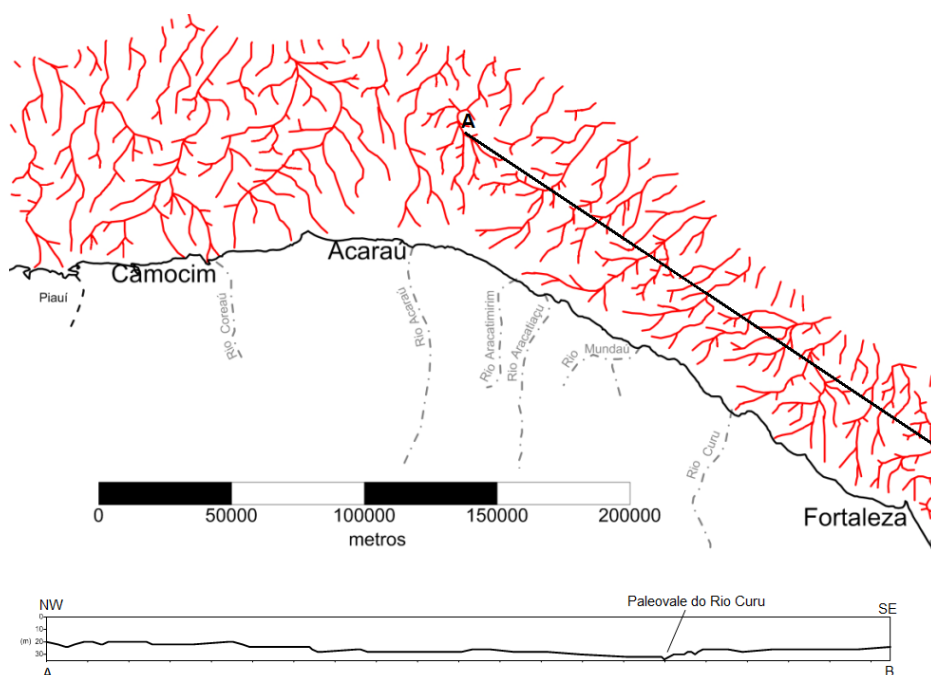
Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.2.5 Discussões

Os sedimentos superficiais da linha de costa até a isóbata de 10m apresentam ampla variação no diâmetro médio dos grãos, no grau de seleção, na curtose e na assimetria, caracterizando ambiente energético com remobilização de material de fundo pelas ondas e correntes atuantes. Monteiro (2011) observou que na zona entre 0 a 15 m encontram-se planícies de areias quartzosas, marcas de ondas paralelas à costa, cordões arenosos longitudinais e significativa

contribuição de sedimentação terrígena. Os processos marinhos atuantes nessa zona tendem a carrear os minerais leves e concentrar os pesados que se acumulam nas irregularidades do fundo submarino formando os depósitos de pláceres. Foi constatada uma tendência de granocrescência com a profundidade a leste de São Gonçalo do Amarante que pode ser explicada pela presença do paleovale do Rio Curu (Figura 3.2.5 A), também evidenciado pelo modelo digital da morfologia de fundo, que ao adentrar a plataforma curva-se na direção nordeste (Silva Filho, 2004). Paleocanais ou vales fluviais afogados são feições fisiográficas propícias à ocorrência de pláceres e sua ocorrência na plataforma continental cearense retrata mudanças ambientais e variações do nível do mar que marcaram o período Quaternário.

Figura 3.2.5 A – Entalhes na plataforma continental e perfil paralelo à costa evidenciando o paleovale do Rio Curu.

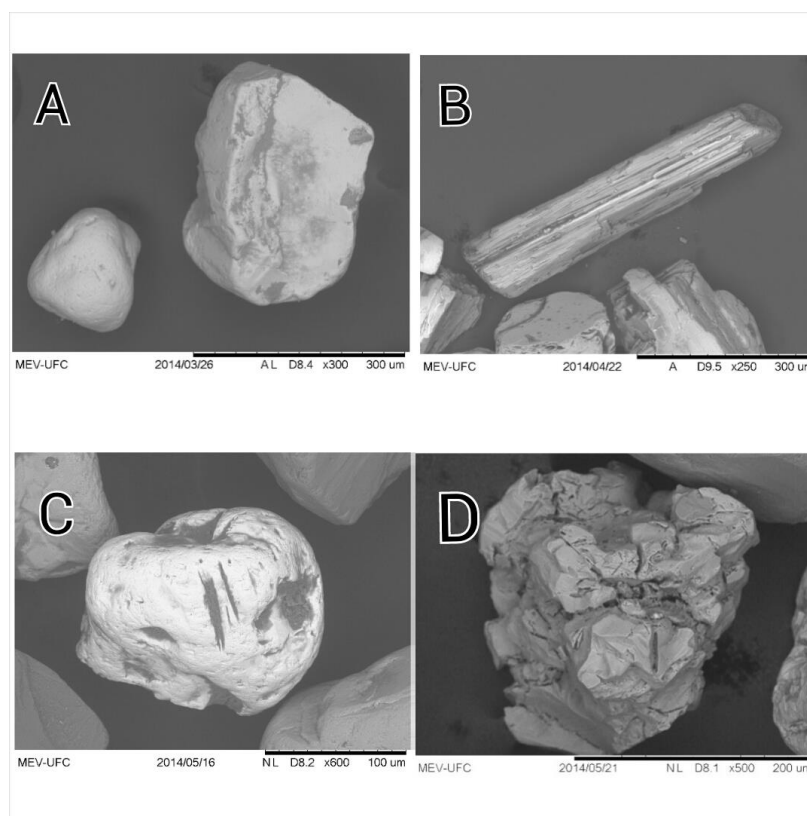


Fonte Silva Filho, 2004.

Os pláceres, objeto desse estudo, apresentam importantes concentrações de minerais pesados (até 4,54%), com a predominância da ilmenita e importantes concentrações de turmalina, epidoto e monazita (Figura 3.2.5 B). Esses depósitos têm íntima relação com as variações quaternárias do nível relativo do mar que durante o último máximo glacial (22.000 a 14.000 A.P.) o nível médio de mar baixo ficou em torno de - 120 m e alcançando o nível médio

atual há 7.000 A.P. No litoral cearense foram encontrados vários testemunhos dessas variações quaternárias (Meireles, 2001). Os pláceres marinhos entre Caucaia e Trairi são indicadores dessas variações pretéritas e tendem a concentrar ainda mais minerais pesados nas irregularidades pré-existentes do fundo submarino (Figura 3.2.4.2) pelos processos atuais das ondas e correntes de fundo que promovem o transporte e retrabalhamento dos sedimentos plataformais.

Figura 3.2.5 B – Grãos de ilmenita (A), turmalina (B), monazita (C) e epidoto (D). Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).



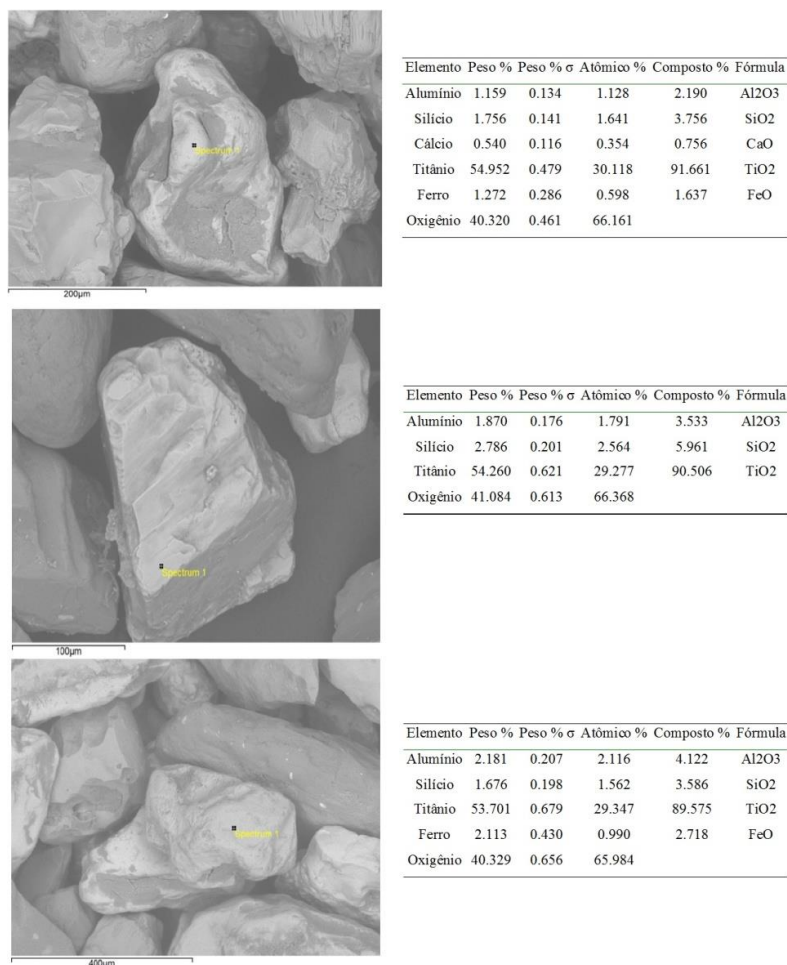
Fonte: Aguiar Neto (2014).

Foi observada a alteração por intemperismo de alguns grãos de ilmenita constatado por teores mais elevados de TiO_2 , promovida pela lixiviação do ferro e um aumento da concentração de titânio (Figura 3.2.5 C).

De acordo com o DNPM (2013) cerca de 90% da produção mundial de titânio provém da ilmenita e as reservas lavráveis brasileiras desse minério representam menos de 0,4% das reservas mundiais. Essa escassez das reservas de titânio frente à elevação da demanda fez o preço do minério subir

significativamente em 2011. Dada a importância econômica da ilmenita selecionou-se os locais com teores acima de 1Kg/ton desse mineral juntamente com outras espécies que atingiram essa concentração como a turmalina, o epidoto e a monazita (Figura 3.2.5 D).

Figura 3.2.5 C – Grãos de ilmenita enriquecidos em titânio. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e composição química por sistema de dispersão de energia (EDS).

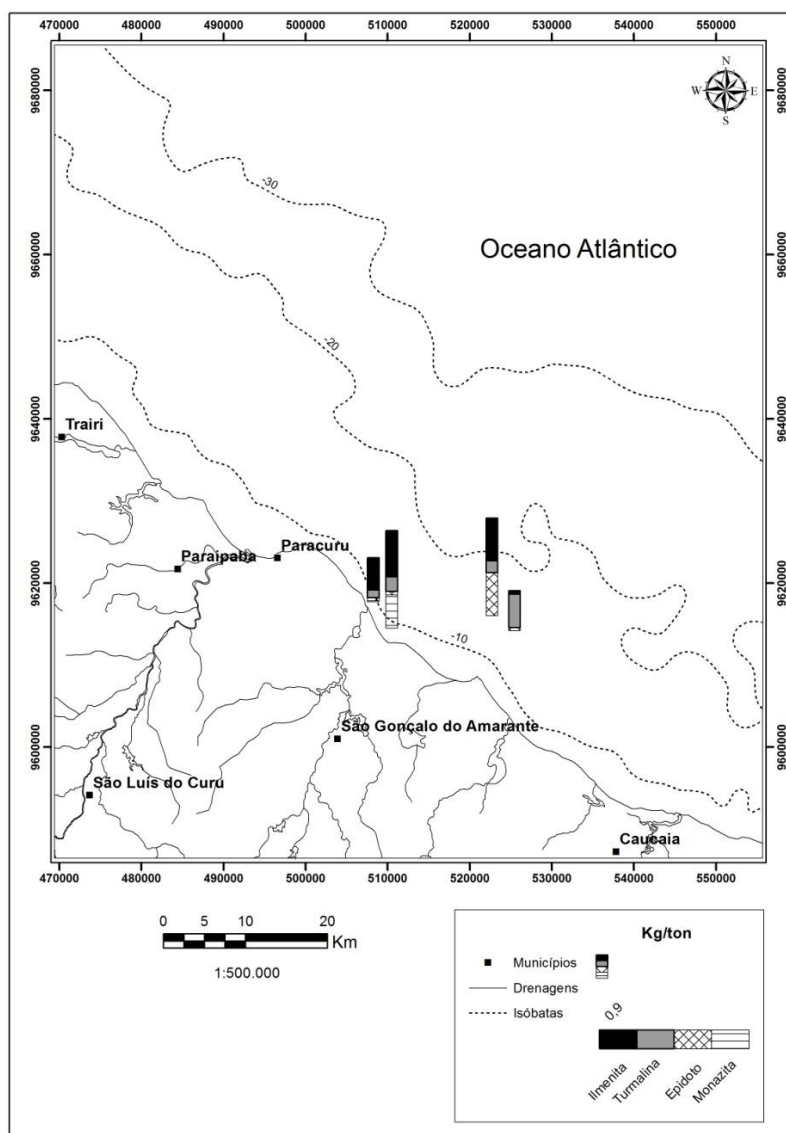


Fonte: Aguiar Neto (2014).

A turmalina é usada em eletrotécnica e possui alto valor no mercado comercial como gema, sendo muito utilizada em joalherias. Segundo Lameiras (2005), observa-se um crescente número de pedidos de patente para usos industriais da turmalina.

A monazita é fonte de elementos terras raras considerados metais de alta tecnologia. E o epidoto é muito utilizado como gema, possuindo clivagem perfeita em uma direção (IBGM, 2009).

Figura 3.2.5 D – Pláceres marinhos com teores de ilmenita, turmalina, epidoto e monazita acima de 1 Kg/ton.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

A área da plataforma adjacente à costa de São Gonçalo do Amarante foi considerada o local mais estratégico para pláceres marinhos, pois ocorreram as maiores concentrações de minerais pesados (até 4,54%). Três locais de domínio das areias grossas e médias com teores acima de 1 Kg/ton de ilmenita, juntamente com monazita (areia grossa) e epidoto (areia média) que ocuparam um desses três locais, e a turmalina que apresentou esse teor em uma amostra

independente situada mais a leste no domínio da areia fina (Figuras 3.2.4.1 e 3.2.5 D).

Esses depósitos ocorreram em profundidades inferiores a 20 m, onde o aporte de sedimentos terrígenos para a plataforma é considerável. Os rios drenam rochas-fonte e possíveis corpos mineralizados no continente, carreando os minerais pesados para o ambiente costeiro e marinho onde são submetidos à energia hidráulica das ondas e correntes que tendem a concentrar esses minerais. São formadas acumulações no substrato submarino, os bancos arenosos de plataforma interna, sendo considerados depocentros de ambientes hidráulicos de alta energia, com desenvolvimento de condições propícias à concentração desses depósitos, principalmente nas cavas entre os bancos (Palma, 1979). As áreas de morfologia irregular promovem o aprisionamento dos minerais pesados, alguns deles com importância econômica como a ilmenita e a monazita.

A ilmenita domina a assembleia de pesados nos pláceres marinhos entre Caucaia e Trairi, e o enriquecimento de titânio em algumas amostras incrementa sua importância econômica.

Para que se possam acumular grandes depósitos de minerais pesados são necessários dois fatores essenciais: segregação hidráulica diária para remoção dos minerais leves e concentração dos pesados e um processo erosivo de longo prazo quando grandes volumes de areias litorâneas são reciclados e fracionados em porções enriquecidas em minerais pesados (Dominguez, 2010). Esses fatores ocorrem na área de estudo com a atuação constantes das ondas e correntes marinhas que promovem a segregação hidráulica e dos processos erosivos que já atuam desde a construção do porto do Mucuripe que acarretou mudanças na dinâmica sedimentar e déficit de sedimentos que supriam a costa a oeste de Fortaleza.

3.2.6 Conclusões

Os pláceres marinhos entre os municípios de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza, e Trairi apresentaram concentrações de minerais pesados de até 4,54%, ocorrendo predominantemente em profundidades inferiores a 20 m e compostos pela assembleia mineral: ilmenita, turmalina,

epidoto, silimanita, anfibólio, monazita, estaurolita, rutilo, andaluzita, magnetita, zircão, granada, cianita, apatita, cassiterita e leucoxênio. Ilmenita e turmalina são as espécies dominantes e juntamente com epidoto e monazita apresentaram teores acima de 1 Kg/ton em algumas amostras ao longo da costa de São Gonçalo do Amarante. Esses depósitos estão associados às irregulares do fundo submarino que ocorrem ao longo da costa entre Paracuru e São Gonçalo do Amarante, evidenciadas pelo modelo digital de fundo e correlacionadas ao paleovale do rio Curu. As maiores concentrações de ilmenita estiveram associadas à areia média e grossa, epidoto à areia média, monazita à areia grossa e turmalina à areia fina. Ocorre enriquecimento de titânio nas ilmenitas de algumas amostras por alteração intempérica com conteúdo de TiO_2 acima de 89%.

Apesar de serem considerados depósitos de dimensões reduzidas e do alto custo que demanda o processo de mineração em ambiente marinho, os pláceres determinados nesse estudo são considerados recursos minerais estratégicos e sua exploração pode ser viabilizada pela valorização de determinado bem mineral, como já ocorre com o titânio, assim como pelo surgimento de novas tecnologias na área da mineração marinha.

Como qualquer atividade de mineração, a prospecção desses pláceres acarretará impactos no ambiente marinho como: alterações na quantidade, distribuição e deposição dos sedimentos que afetará principalmente a comunidade bentônica; eliminação direta dos organismos na área dragada; mudança na turbidez da água diminuindo sua produtividade e impedindo a luminosidade de atingir o fundo; despejo de rejeitos sobre o fundo submarino, dentre outros impactos (Silva, 2000). Além da avaliação da potencialidade dos recursos minerais marinhos presentes nesse estudo, é necessário contemplar as fragilidades do ambiente onde esses recursos ocorrem, para um melhor entendimento de suas limitações e um uso sustentável desse meio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) e os laboratórios de Microscopia Eletrônica de Varredura e de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, N. M.; LEHUGEUR, L. G. O.; FREIRE, G. S. S.; SANTOS, D. M.; AGUIAR NETO, A. B. Assembléia de Minerais Pesados da Plataforma Continental – Porção Oeste do Estado do Ceará, Brasil. **Revista de Geologia**, Vol. 24, nº 1, 21-27, 2011.
- ARTHAUD, M. H.; MORAIS, J. O.; FREIRE, G. S. S. Distribuição espacial de minerais pesados na plataforma continental do Estado do Maranhão. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza 16 (1): 49-54, 1976.
- ARTHAUD, M.H.; VASCONCELOS, A.M.; OLIVEIRA, F.V.C. As seqüências metassedimentares do Ceará Central. XL **Congresso Brasileiro Geologia**, Belo Horizonte, 16. 1998.
- BARRETO, L. A.; MILLIMAN, J. D.; AMARAL, C. A. B.; FRANCISCONI. Northern Brazil. In: Contrib. Sedimentol. **Upper Continental margin sedimentation off Brazil**. Stuttgart. 4p. 1-10. 1975.
- BEHLING H.; ARZ W.H.; PÄTZOLD J.; WEFER G. Late quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB3104-1. **Quaternary Science Reviews**. 19, 981-994. 2000.
- CPRM. Mapa Geológico do Estado do Ceará. Escala 1:500.000. Serviço Geológico do Brasil. Fortaleza, 2003.
- COUTINHO, P. N.; MORAIS, J. O. Distribucion de lós Sedimentos en la plataforma continental norte y nordeste del Brasil. In: Curaçao. UNESCO (Ed), **Symposium on Investigation and Resources of the Caribbean Sea and Adjacent Regions. Resumos expandidos**. 313-315. 1968.
- DNPM. **Sumário Mineral**. 2013. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=3165> acessado em 27 de abril de 2014.
- DOMINGUEZ, J. M. L. **Ilmenita do Rio do Campo: APA do Pratigi**. Salvador: CBPM, 73p. 2010.
- EMERY, K. O.; NOAKES, L. C. Economic placer deposits of the continental shelf: UN. ECAFE, **Tech, Bull**, v.71, p. 422-440. 1968.
- FETTER, A.H.; SANTOS, T.J.S.; VAN SCHMUS, W.R.; HACKSPAKER, P.C.; BRITO NEVES, B.B.; ARTHAUD, M.H.; NOGUEIRA NETO, J.A.; WERNICK E. Evidence for neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana. **Gondwana Research**, 6 (2): 265-273. 2003.
- FRANÇA, A. M. C.; COUTINHO, P. N. & MORAIS, J. O. Sedimentos superficiais da margem continental Nordeste brasileira. **Revista Brasileira de Geologia**. 6 (2): 78-88, 1976.

FREIRE, G.S.S. **Geologia Marinha da Plataforma Continental do Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, 108p. 1985.

GALEHOUSE, J.S. 1971. Point counting. In: Carver, R. E. (ed.). *Procedures in Sedimentary Petrography*. New York: **Wiley-Intrescience**, p 385-407.

IBGM. **Manual Técnico de Gemas**. IBGM, DNPM. – 4. ed. rev. e atual. / Consultoria, supervisão e revisão técnica desta edição, Jane L. N. da Gama. Brasília, 220 p. : il.; 29 cm. 2009.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**; tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. 23ª Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2012.

LAMAS, F.; IRIGARAY, C.; OTEO, C.; CHACON, J. Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls. **Engineering geology**, 81:32-41. ISSN 0013-7952. 2005.

LAMEIRAS, S.F., MELO, V.A.R.; LEAL, J. M. Piroeletricidade e emissão de infravermelho distante da turmalina. **Revista Escola de Minas**, 58 (2). 2005.

LIMA, S. F.; SILVA FILHO, W. F.; PINHEIRO, R. D.; FREIRE, G. S. S.; MAIA, L.P.; MONTEIRO, L. H. U. ANASED – Programa de Análise, Classificação e Arquivamento de Parâmetros Sedimentológicos. **Anais do Congresso da ABEQUA** – Associação de Estudos do Quaternário – Imbé – RS. 2001.

MAIA, L. P. 1998. **Procesos Costeros y Balance Sedimentario a lo Largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral**. Tesis. 1998.

MAIA, C. J. C. **Os minerais pesados da plataforma continental interna oeste do Estado do Ceará**. Relatório de graduação, UFC. 2005.

MARTINS, L. R.; COUTINHO, P. N. The Brazilian Continental margin. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 17, p. 87 –107. 1981.

MEIRELES, A. J. A. **Morfologia litoral y sistema evolutivo da la costa do Ceará**. 2001. 353f. Tese (Doutorado) – Programa de Doctorado: Geografia Física y Planificación Ambiental, Departamento de Geografia Física y Análisis Geográfico Regional, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2001.

MONTEIRO, L. H. U. **Feições Superficiais da Plataforma Continental Cearense entre o litoral de Fortaleza e Icapuí**. Tese (doutorado), Recife, 178p. 2011.

PALMA, J.C. 1979. **Depósitos de Minerais Pesados**. In: AMARAL, C.A.B. (Ed.). *Recursos Minerais da margem Continental Brasileira e das Áreas Oceânicas Adjacentes (Relatório Final)*. Rio de Janeiro, Série Projeto REMAC, N. 10, p. 33-50.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENG, J. 1970. **Les minéraux en grains – Méthodes d'études et de détermination**. Masson et Cie, Paris. 578p. 1970.

RAMOS, R. F.; SANTOS, D. M. **Minerais Pesados da Plataforma Continental Interna Leste do Estado do Ceará – Ce** – Relatório de graduação, UFC. 2005.

SANTANA, C.I. **Recursos minerais da margem continental brasileira e bacias oceânicas adjacentes**. Comissão Interministerial para Recursos do Mar (CIRM) – Grupo de Trabalho sobre Recursos não Vivos da Plataforma Continental, Relat. Inédito, p. 20-23. 1997.

SILVA, C. G. Placeres Marinhos. **Revista Brasileira de Geofísica**, Vol. 18(3), 2000, p. 327-336.

SILVA FILHO, W. F. **Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental do Estado do Ceará**. Tese (Doutorado), UFRGS, 2004. 307p.

SOUZA, D. R.; ABREU, J. G. N. 2005. Análise Quantitativa dos Minerais Pesados na Plataforma Continental Interna Adjacente ao Litoral Centro-Nortede Santa Catarina. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, 9(1):1-5. 2005.

3.3 Terceiro Artigo. Submetido à Revista Geologia da USP – Série Científica

PROVENIÊNCIA DOS MINERAIS PESADOS DA COBERTURA SEDIMENTAR DA PLATAFORMA CONTINENTAL ENTRE CAUCAIA E TRAIRI, CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL

Antonio Borges de Aguiar Neto¹, George Satander Sá Freire²

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGG) da Universidade Federal do Ceará (UFC). tonygeoufc@hotmail.com

Vila Carlos Vasconcelos, nº 2445A, Joaquim Távora, Fortaleza – CE, CEP: 60.135-182, Brasil, Tel: (85) 9634-2188/8201-9960

² Professor Adjunto do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (DEGEO/UFC). freire@geologia.ufc.br

RESUMO

A plataforma continental cearense possui uma significativa cobertura sedimentar siliciclástica apesar do predomínio de sedimentos bioclásticos. Nesses sedimentos ocorrem concentrações de minerais pesados formando os pláceres marinhos formados durante as variações do nível do mar (Quaternário). Foi avaliada a proveniência desses depósitos pela assembleia mineral predominante e índices mineralógicos (RZi e ZTR) nos sedimentos marinhos e fluviais dos rios Curu e São Gonçalo. Foram ainda caracterizadas a morfologia de fundo e a faciologia da plataforma continental estudada. As 9 fácies que ocorrem na plataforma continental, até a isóbata de 30 m, caracterizam o predomínio da sedimentação siliciclástica e alta dispersão dos sedimentos que denotam um ambiente de alta energia, com baixo grau de seleção. Foram identificadas 16 espécies de minerais pesados que compõem a assembleia dos sedimentos analisados. Desses minerais se destacam a ilmenita, turmalina, epídoto, hornblenda e monazita, com percentuais acima de 60% e em algumas amostras atingindo valores acima de 90%. Nos sedimentos fluviais predominam a ilmenita, magnetita, estauroлита, turmalina e epídoto com percentuais acima de 87%. As principais fontes potenciais dos pláceres marinhos são as rochas paraderivadas do Complexo Ceará, sedimentos retrabalhados da Formação Barreiras, areias pretas costeiras e sedimentos de deriva litorânea. As variações dos índices RZi e ZTR revelam mudanças na área-fonte com presença de sedimentos maduros e imaturos, reforçando a proposição de proveniência de natureza dual para esse depósitos.

Palavras-chave: Pláceres; Proveniência; Sedimentologia; Plataforma continental.

ABSTRACT

The continental shelf of Ceará has a significant siliciclastic sedimentary cover despite the predominance of bioclastic sediments. Heavy minerals concentrations occur in these sediments forming marine placers from sea level changes (Quaternary). The provenance of these deposits was evaluated through the predominant mineral assemblage and the mineralogical index (RZi and ZTR) in marine sediments and fluvial sediments of São Gonçalo and Curu rivers. Morphology and faciology of continental shelf were also characterized. The 9 facies of continental shelf until the isobath of 30 m, characterize the dominance of siliciclastic sedimentation and high dispersion of sediments that show a high-energy environment with a low degree of selection. 16 species of heavy minerals were identified, they belong to the assembly of the analyzed sediments. Ilmenite, tourmaline, epidote, hornblend, and monazite are the majority minerals, with percentages above 60% and in some samples reaching values above 90%. In fluvial sediments predominate ilmenite, magnetite, staurolite, tourmaline and epidote with percentages above 87%. The potential main source of marine placers are paraderived rocks of Ceará Complex, re-working sediments Barreiras Formation, coastal black sands and sediments from longshore drift. RZi and ZTR index variations reveal changes in source area with presence of mature and immature sediments, this fact reinforce the dual nature provenance proposition for these deposits.

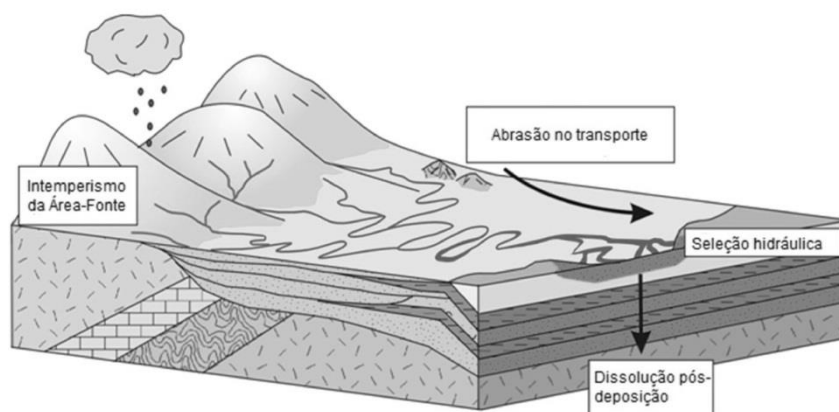
Keywords: Placers; Provenance; Sedimentology; Continental shelf.

3.3.1 Introdução

Os pláceres marinhos, depósitos de minerais pesados concentrados mecanicamente, têm íntima relação com as variações eustáticas do nível do mar que abrangeram o Quaternário, oscilando entre exposição das plataformas continentais e afogamento das mesmas (Kudrass, 2000; Silva, 2000; Lalomov e Tabolitch, 2000; Gent et al., 2005; Cascvalho et al., 2007; Tomazzoli et al., 2007; Corrêa et al., 2008; Addad, 2010; Cavalcanti, 2011). Geralmente, os minerais pesados não excedem o conteúdo de 0,1% a 0,5% das frações terrígenas e a

assembleia desses minerais constitui grande aplicabilidade como: proveniência dos sedimentos, histórias do intemperismo e transporte, correlação paleogeográfica e indicadores diretos de mudança climática (Suguio, 2003; Addad, 2010). Durante alternâncias climáticas, ficam marcadas as variações populacionais desses minerais pesados pela diluição ou resistência a esses eventos. Morton e Hallsworth (1994) listam 4 processos que são capazes de modificar a assembleia de minerais pesados durante o transporte e deposição: intemperismo da área-fonte, abrasão durante o transporte, seccionamento hidráulico dos grãos e dissolução pós-deposição de minerais instáveis em profundidade pelos processos diagenéticos (Figura 3.3.1 A).

Figura 3.3.1 A – Processos que controlam a assembleia de minerais pesados durante o transporte e deposição.

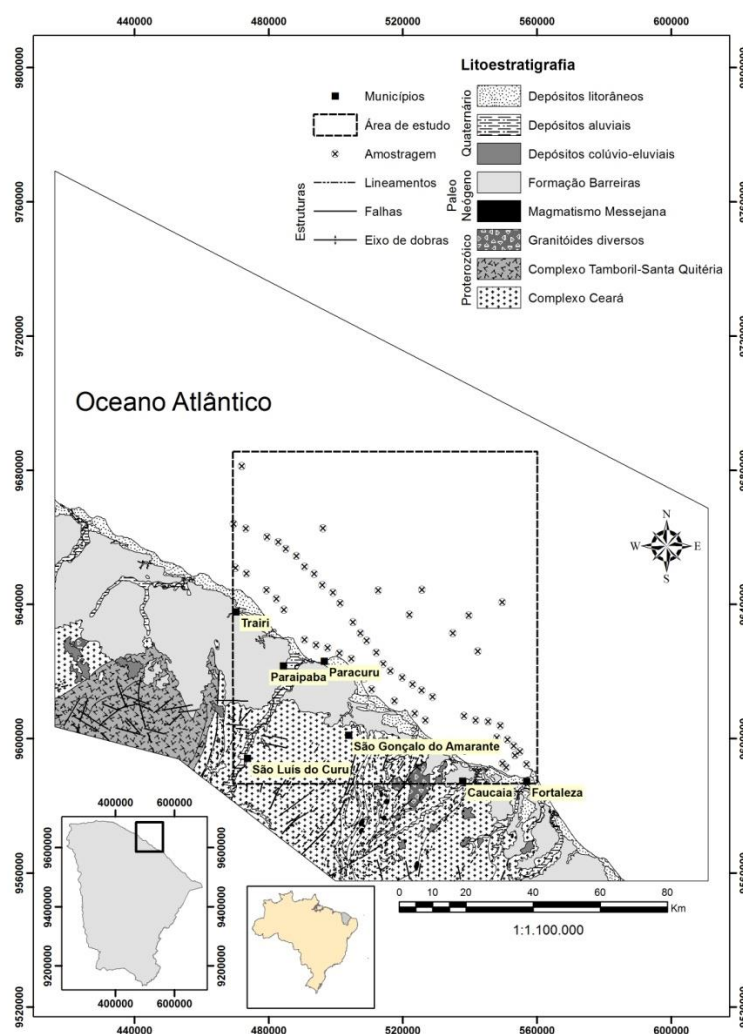


Fonte: Modificado de Morton & Hallsworth (1994).

Alguns dos trabalhos pioneiros sobre esses depósitos na plataforma continental cearense (França et al, 1976; Barreto et al, 1975) constataram locais com ocorrência abundante de minerais pesados que os autores denominaram de províncias: a província da cianita até aproximadamente o delta do rio Jaguaribe; a província da hornblenda para o restante das praias e dunas de Fortaleza, predominando entre os opacos nas duas províncias a ilmenita; e na região entre a fronteira do Estado do Piauí e a foz do rio Acaraú foi encontrada uma predominância de granada, hornblenda, turmalina e epidoto. Almeida et al. (2011) constataram concentrações de até 9% de minerais pesados com predominância de ilmenita nos sedimentos plataformais a oeste de Fortaleza. Aguiar Neto et al. (2014) verificaram a ocorrência de ilmenita, turmalina, epidoto e monazita acima de 1 Kg/ton nos sedimentos da plataforma continental entre Caucaia e Trairi.

A área de estudo compreende a plataforma continental entre os municípios de Caucaia e Trairi até a isobáta de 30 m e as drenagens próximas a ocorrência dos pláceres identificados no estudo de Aguiar Neto et al, 2014, Rio Curu e Rio São Gonçalo (Figura 3.3.1 B). Este artigo mostra a caracterização dos domínios faciológicos da plataforma continental estudada, modelo digital do fundo marinho e proveniência dos pláceres comparando as assembleias minerais do ambiente marinho com as dos sedimentos fluviais e pela determinação dos índices mineralógicos rutilo/zircão (RZi) e zircão/turmalina/rutilo (ZTR).

Figura 3.3.1 B – Mapa geológico e pontos de amostragem de sedimentos plataformais e fluviais entre Caucaia e Trairi.



Fonte: Banco de dados do LGMA, Atlas GEO CPRM (2002) e Aguiar Neto (2014).

3.3.1.1 Contexto Geológico e Geotectônico Continental e Plataformal

A margem continental ao largo do Estado do Ceará apresenta um contexto que remonta do Cretáceo, embora possua influência de uma importante herança tectônica pré-cambriana (Silva Filho, 2004). As bacias sedimentares da região costeira do Nordeste oriental brasileiro e da margem equatorial atlântica tem como embasamento estruturas da Província Borborema. A Província Borborema é caracterizada como um complexo mosaico separado por falhas ou altos do embasamento, resultado da convergência dos Crátons de São Luís-Oeste Africano, São Francisco-Congo e Amazônico, que estiveram envolvidos na amalgamação e consequente formação do Supercontinente Gondwana.

A geologia continental no entorno da área de estudo (Figura 3.3.1 B) engloba rochas proterozoicas dos Complexos Ceará e Tamboril-Santa Quitéria, incluindo paragnaisses, ortognaisses ácidos, metagabros, anfibolitos com ou sem granada, gnaisses dioríticos, lentes de quartzitos, metacalcários, micaxistos aluminosos, calcissilicáticas, além de granitoides diversos (Arthaud et al., 1998; Fetter et al., 2003). A sequência cenozoica se inicia com as rochas vulcânicas alcalinas (fonolitos, traquitos, sienitos) do Magmatismo Messejana que ocorreu no Paleógeno, seguida pelos sedimentos areno-argilosos com matriz argilo-cauliníca, cimento argiloso, ferruginoso e às vezes silicoso da Formação Barreiras (Neógeno). Os sedimentos quaternários são representados pelos depósitos colúvio-eluvionares areno-argilosos que, em certos locais, aparecem cascalhosos e laterizados na base; depósitos aluviais constituídos por argilas, areias argilosas e quartzosas, cascalhos e argilas orgânicas de origem fluvial e em parte com influência marinha. Os depósitos litorâneos de dunas fixas e paleodunas são compostos por areias de granulação fina a média, quartzosas ou quartzofeldspáticas, bem selecionadas; e os depósitos litorâneos das praias atuais e dunas móveis formados por areias esbranquiçadas, quartzosas, de granulometria variável, bem selecionadas com concentrações de minerais pesados. (CPRM, 2003).

A bacia marginal que engloba a área de estudo é a bacia do Ceará, limitada a leste pelo Alto de Fortaleza e a oeste pelo Alto de Tutóia com uma área de 35.000 Km². Os seguimentos dessa bacia caracterizam diferentes domínios separados por importantes feições transversais positivas, correspondentes aos

altos do embasamento, a grandes corpos ígneos ou os anticlinais em ampla escala produzidos por inversão tectônica sin-sedimentar. A fase rifte acomodou mais de 4.000 m de sedimentos siliciclásticos continentais naquele segmento da margem, correspondentes a fácies de rochas aluviais, fluviais e lacustres da Formação Mundaú. A partir do Albiano, passaram a dominar condições francamente marinhas. Entre o Eoceno e o Recente, uma sedimentação arenosa grossa acomodou-se junto às áreas proximais da bacia, a Formação Tibau, que grada para os carbonatos da Formação Guamaré e aos folhelhos da Formação Ubarana no sentido das porções mais distais da bacia (Milani et al., 2001).

A plataforma continental cearense é recoberta por sedimentação predominantemente bioclástica (carbonática algálica), com contribuições de até 75%, os sedimentos siliciclásticos estão mais presentes na plataforma interna e defronte a Fortaleza chegam até a borda da plataforma continental (Martins e Coutinho, 1981; Freire, 1985; Silva Filho, 2004).

3.3.2 Materiais e Métodos

3.3.2.1 Aquisição das amostras de sedimentos plataformais

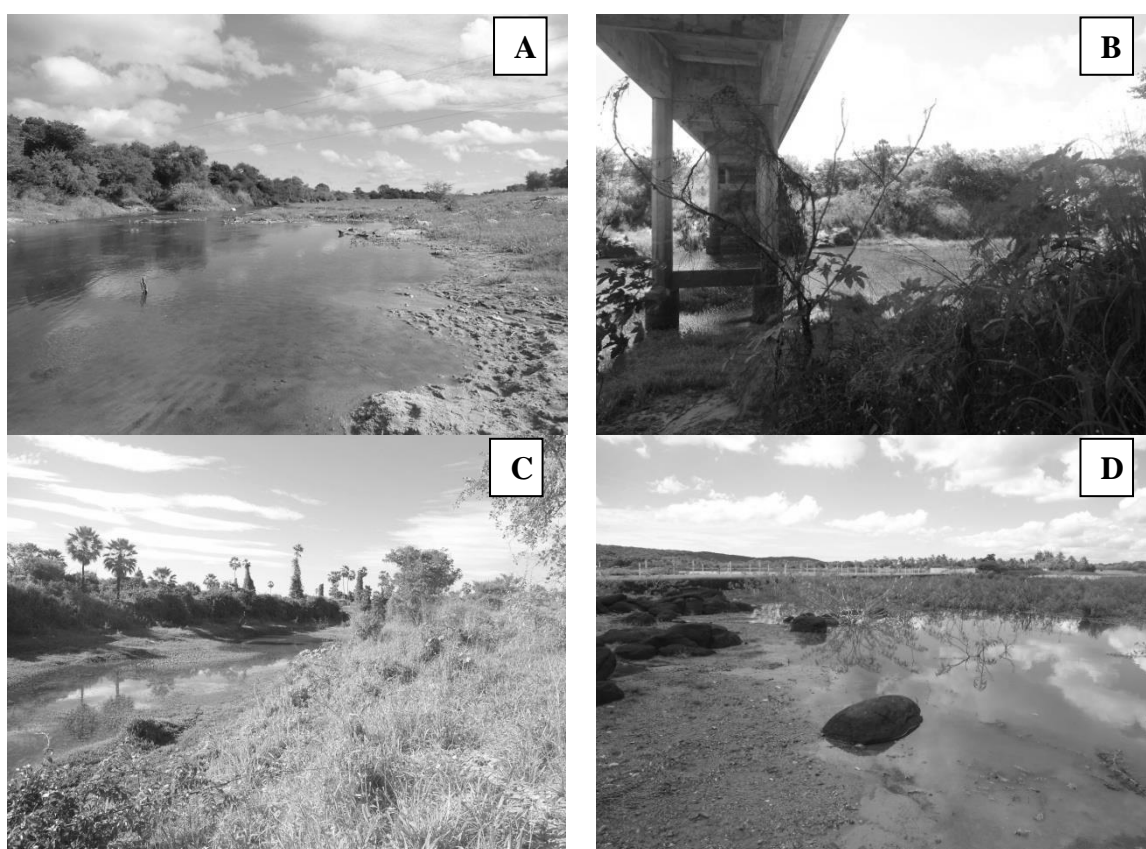
Foram selecionadas 60 amostras (Figura 3.3.1 B) da Litoteca do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) coletadas nas campanhas oceanográficas Geomar XVIII (1981) e Geocosta II (1994). Os sedimentos foram coletados com amostrador pontual do tipo “Van-Veen” da linha de costa de Fortaleza ao município de Trairi até aproximadamente a isóbata de 30 m. As embarcações utilizadas foram o Barco de Pesquisa Professor Martins Filho da Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Navio Balizador Comandante Manhães da Marinha do Brasil. Os dados de minerais pesados de 23 amostras contidas no trabalho de Almeida et al., (2011) estão inclusos neste estudo.

3.3.2.2 Etapa de campo (Coleta de sedimentos fluviais)

Foram coletadas 4 amostras de sedimentos fluviais a montante (amostras Curu 1 e São Gonçalo 1) e jusante (amostras Curu 2 e São Gonçalo 2) dos rios Curu

e São Gonçalo (Figura 3.3.2.2) para correlacionar com a área-fonte dos plácemes marinhos identificados nesse estudo. Foram selecionados os locais favoráveis à acumulação de minerais pesados (zonas internas de meandros pré-determinadas por imagens de satélite) que foram localizados em campo com auxílio de um GPS portátil Garmim. O material foi coletado durante a estação seca (junho de 2013) com auxílio de pás, colheres, balde de 20 litros e sacola plástica.

Figura 3.3.2.2 – Locais de coleta dos sedimentos fluviais nos rios Curu (A – montante e B – jusante) e São Gonçalo (C – montante e D – jusante).



Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.3.2.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada segundo o método tradicional de peneiramento úmido e seco e por pipetagem, em seguida classificada suas texturas com o programa ANASED, proposto por Lima et al., (2001) e geração das medidas estatísticas dos dados granulométricos: média, mediana, curtose, assimetria e grau de seleção.

3.3.2.4 Teor de CaCO_3

O teor de CaCO_3 foi determinado pelo método do Calcímetro de Bernard (Lamas et al., 2005, modificado). Nesse método o teor de CaCO_3 é medido indiretamente através do volume de uma solução salina deslocado pelo gás carbônico produzido da reação do HCl com o carbonato contido na amostra. Esse dado é integrado à análise granulométrica para definir as fácies dos sedimentos segundo a classificação de Larssonneur (1977).

3.3.2.5 Estudo dos minerais pesados

A separação dos minerais pesados seguiu os procedimentos metodológicos estabelecidos por Parfenoff et al., (1970) com separação densimétrica da fração entre 0,250mm a 0,062mm (faixa granulométrica com maior concentração de minerais pesados) utilizando líquido denso bromofórmio (CHBr_3 , $d=2,89$) e separação magnética com ímã de mão para discriminação das magnetitas. A identificação e quantificação das espécies minerais foram realizadas observando as características intrínsecas de brilho, clivagem, cor e hábito de cristalização por meio de lupa binocular e pela contagem de 300 grãos minerais de acordo com Galehouse (1971).

As amostras dos possíveis depósitos de pláceres foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) com sistema de detecção de raios X por dispersão em energia (EDS – *Energy Dispersive System*) para obter imagens de alta resolução desses grãos e otimizar a identificação dos minerais.

Foi calculado o índice rutilo e zircão (RZi) pela contagem de 200 grãos desses minerais conforme proposto por Morton e Hallsworth (1994) para identificar as possíveis proveniências ou mudanças de área-fonte segundo a Equação 1. Rutilo e zircão são minerais pesados de estabilidade química, comportamento hidráulico e densidade similares, dessa forma não serão afetados pelas mudanças das condições hidráulicas e as variações obtidas são reflexo de modificações na proveniência sedimentar.

As características geoquímicas do rutilo permitem uma diferenciação entre várias rochas-fonte de origem metamórfica, principalmente os de origem detrítica. O zircão, como indicador de fonte ígnea, ocorre em granitos, granodioritos,

sienitos, monzonitos e muito comum nos nefelina-sienitos (Pereira et al., 2005; Sevastjavona *et al.*, 2012, Klein e Dutrow, 2012).

$$RZi = 100 \times \frac{R}{R + Zi} \quad (1)$$

O cálculo do índice ZTR foi feito pela somatória das porcentagens de zircão, turmalina e rutilo. Esse índice reflete o grau de maturidade mineralógica dos sedimentos, pois combina minerais resistentes à dissolução química associando-os a eventos de vários ciclos sedimentares. (Nóbrega et al., 2008; Corrêa et al., 2008; Ochoa et al., 2013).

3.3.2.6 Geoprocessamento

Foram elaborados mapas faciológico de distribuição granulométrica e de minerais pesados com o Arcgis 10.1 e geração do modelo digital de fundo da área de estudo utilizando o Surfer 10 com base em 372 cotas batimétricas para auxiliar na interpretação da morfologia da área e localização dos possíveis paleocanais.

3.3.3 Resultados

3.3.3.1 Sedimentologia

Foram definidas nove fácies sedimentares ao longo da área da plataforma continental estudada (Figura 3.3.3.1) e observou-se o predomínio da sedimentação siliciclástica (teores de $\text{CaCO}_3 < 50\%$) que correspondem as areias litoclásticas e litobioclásticas pela classificação de Larssonneur, (1977). Pela análise do diâmetro médio dos grãos esses sedimentos foram classificados em sua maioria como areia média (0,250 – 0,500 mm). Os parâmetros granulométricos qualificaram a curtose como muito platicúrtica a muito leptocúrtica, assimetria muito negativa a muito positiva e sedimentos de bem a muito mal selecionados (Tabela 3.3.3.1 A). Essas características descrevem um ambiente de alta energia, com alta dispersão dos sedimentos e, conseqüentemente, baixo grau de seleção, relacionadas com a mistura de duas ou mais populações granulométricas em proporções variadas.

Tabela 3.3.3.1 A – Parâmetros granulométricos dos sedimentos plataformais entre Caucaia e Trairi.

	Diâmetro médio (mm)	Grau de Seleção	Curtose	Assimetria
Mínimo	0,132	0,00	0,58	-0,70
Máximo	1,959	2,59	1,90	0,66
Média	0,444	1,01	1,10	-0,07
Desvio Padrão	0,547	0,42	0,28	0,28

Fonte: Aguiar Neto (2014).

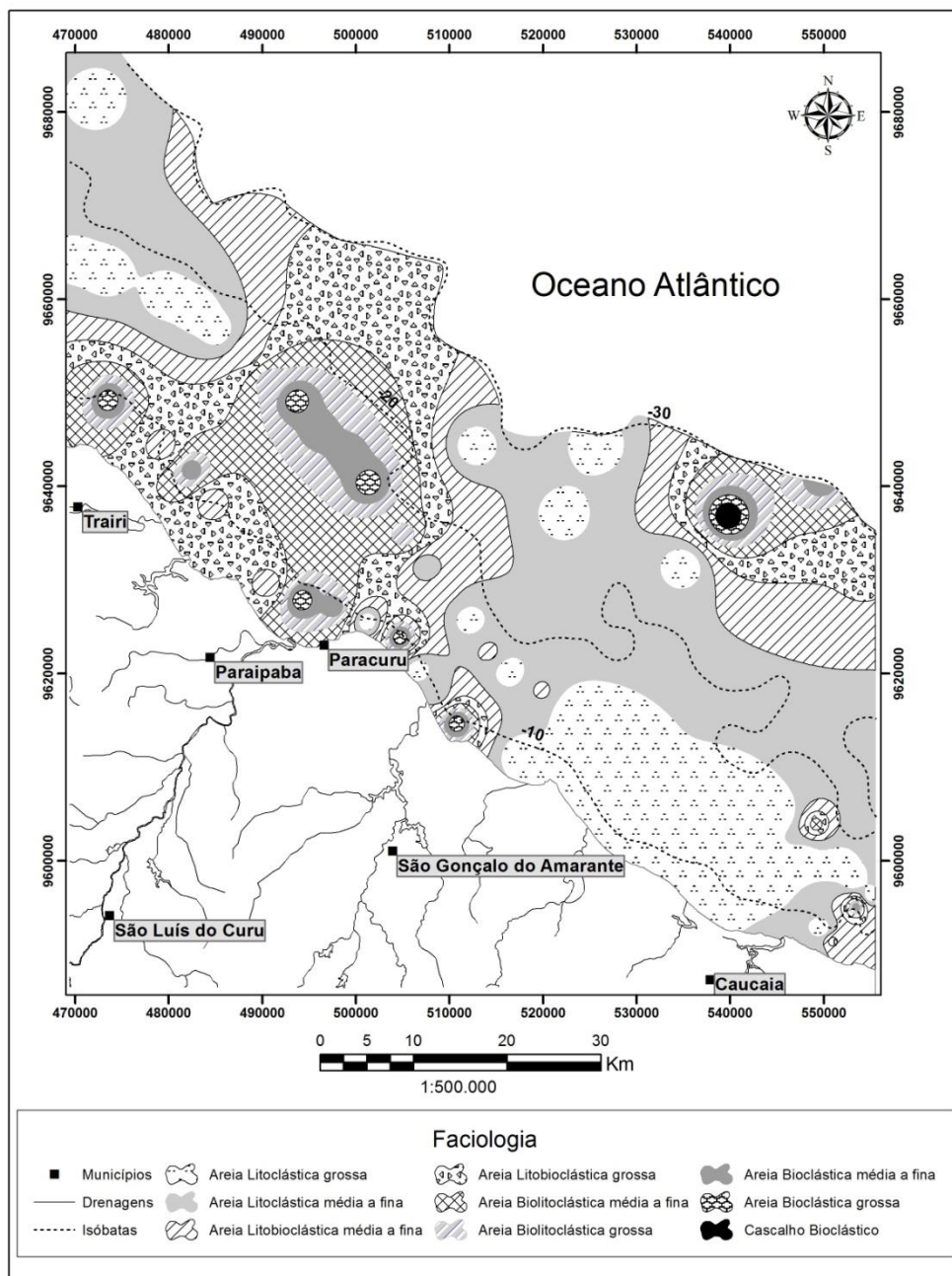
Na análise textural dos sedimentos fluviais observou-se a diminuição do tamanho dos grãos de montante (Curu 1 e São Gonçalo 1) para jusante (Curu 2 e São Gonçalo 2) de ambos os rios (Tabela 3.3.3.1 B). Considerando a curtose, essas amostras foram classificadas como leptocúrticas (Curu 1), muito leptocúrticas (S. Gonçalo 1 e 2) e extremamente leptocúrticas (Curu 2), caracterizando um ambiente bastante energético que é comum em ambientes fluviais.

Tabela 3.3.3.1 B – Parâmetros granulométricos dos sedimentos fluviais dos rios Curu e São Gonçalo.

Amostra	Cascalho	Areia	Lama	Larsonneur	Assimetria	Curtose	Grau de Seleção
Curu 1	9,11	89,86	1,03	Areia litoclástica grossa a muito grossa	-0,04	1,24	Pobrememente selecionado
Curu 2	0,00	88,70	11,30	Areia litoclástica fina a muito fina	0,44	3,82	Pobrememente selecionado
S.Gonçalo 1	9,20	86,90	3,90	Areia litoclástica grossa a muito grossa	-0,13	1,62	Pobrememente selecionado
S.Gonçalo 2	5,39	91,84	2,77	Areia litoclástica média	-0,21	1,76	Pobrememente selecionado

Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.3.3.1 – Mapa faciológico da área da plataforma continental entre Caucaia e Trairi.



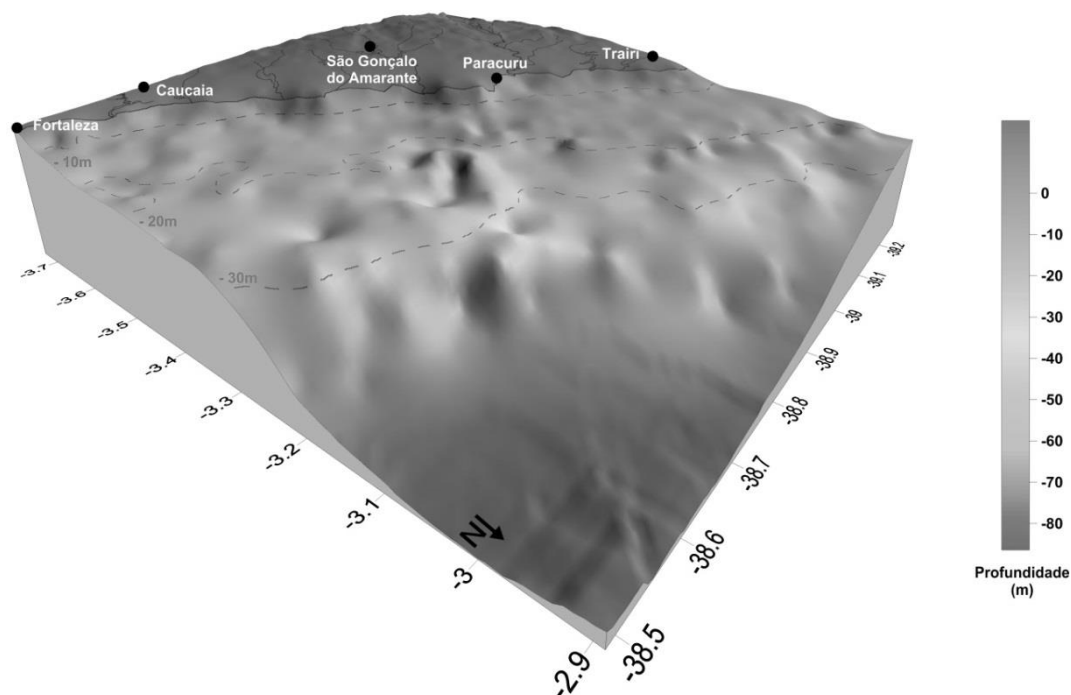
Fonte: Aguiar Neto (2014).

3.3.3.2 Modelo digital da morfologia de fundo da plataforma

O modelo digital revelou a predominância de uma morfologia suave com algumas cavas/depressões da forma de fundo, sendo uma delas bem evidente entre as isóbatas de 20 e 30 m ao largo de São Gonçalo do Amarante e Paracuru, e outra menos marcada em direção a Caucaia (Figura 3.3.3.2). Essa característica

morfológica pode ser indicativa do paleocanal do Rio Curu como já constatado por Silva Filho (2004). É possível observar uma suavização do relevo da plataforma continental no sentido oeste (Trairi) e esse fato se relaciona com o aumento da sedimentação bioclástica nesses locais.

Figura 3.3.3.2 – Modelo digital de fundo da plataforma continental entre Caucaia e Trairi, CE.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

Emery e Noakes (1968) sugeriram a localização de extensões de vales fluviais, faixas de banco arenosos derivados de ação das correntes de maré e antigas linhas de praia como feições submersas mais promissoras para prospecção de minerais pesados na plataforma continental. A ocorrência dessas feições na área de estudo é reforçada pela quebra da monotonia morfológica do fundo submarino e pelas próprias acumulações de minerais pesados.

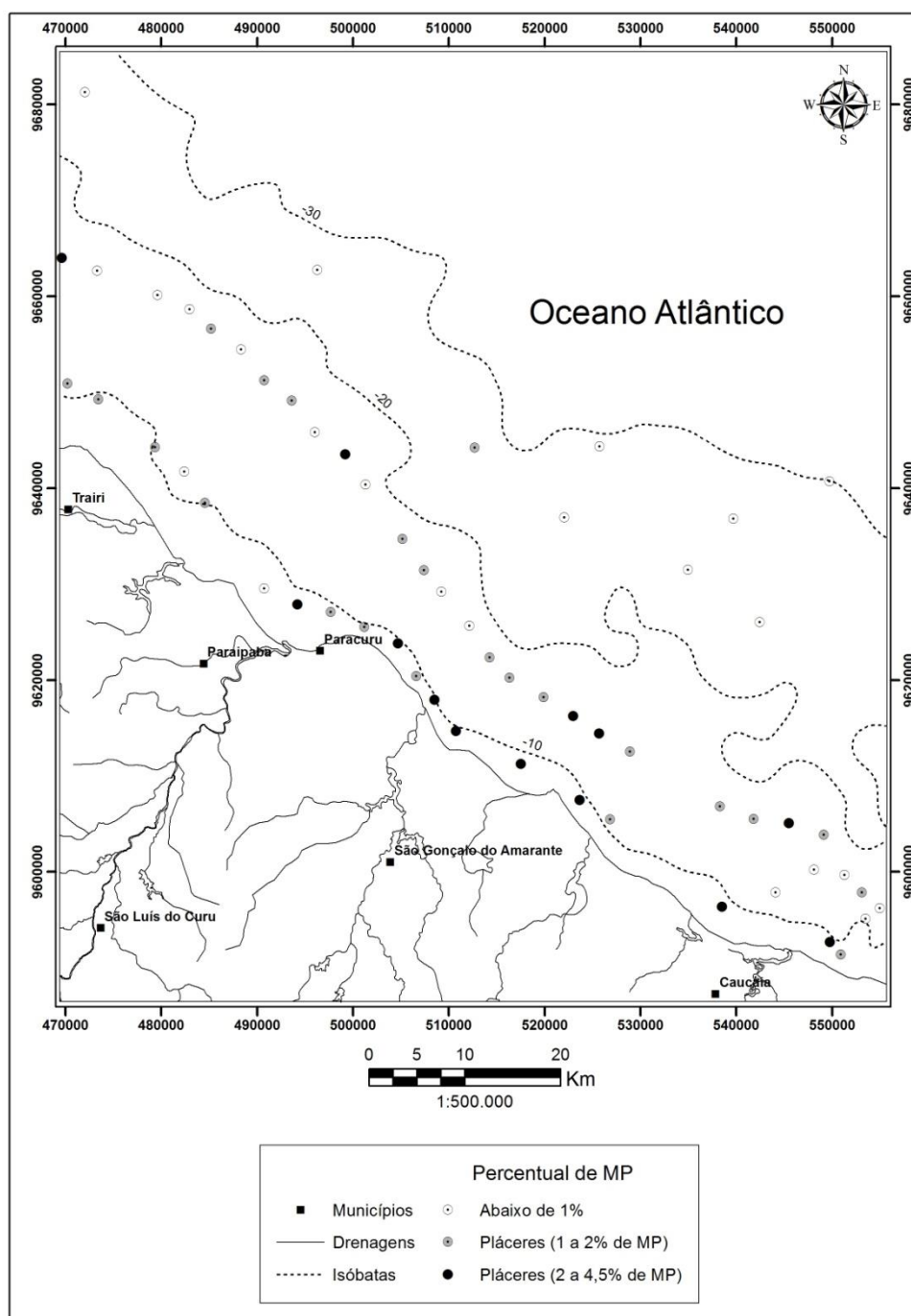
3.3.3.3 Minerais Pesados

3.3.3.3.1 Ambiente marinho

O conteúdo total de minerais pesados na fração analisada variou de 0% a 4,54%, com tendência de distribuição dos pláceres em águas mais rasas, até a

isóbata de 20 m (Figura 3.3.3.1 A). A assembleia mineral é composta por 16 espécies com predominância de ilmenita e turmalina de acordo com os percentuais médios (Tabela 3.3.3.1).

Figura 3.3.3.1 A – Distribuição dos pláceres na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.



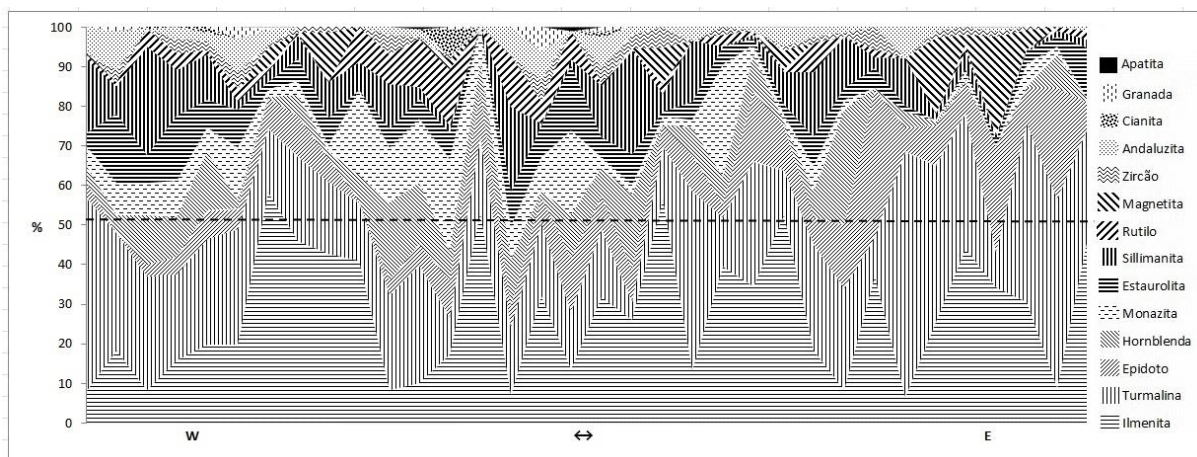
Fonte: Aguiar Neto (2014).

Tabela 3.3.3.3.1 – Percentuais de minerais pesados na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.

	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Ilmenita	6,50	77,00	27,37	17,55
Turmalina	4,50	62,00	24,69	13,53
Epídoto	0,00	37,30	9,33	8,07
Silimanita	0,00	27,50	7,90	7,89
Hornblenda	0,00	29,00	7,51	6,67
Monazita	0,00	28,50	7,42	7,56
Estaurolita	0,00	17,50	5,77	4,72
Rutilo	0,00	14,20	3,37	4,09
Andaluzita	0,00	10,00	2,39	3,16
Magnetita	0,00	24,62	1,79	5,04
Zircão	0,00	5,70	1,70	1,91
Granada	0,00	6,00	0,38	1,19
Cianita	0,00	6,70	0,33	1,24
Apatita	0,00	1,00	0,05	0,20
Cassiterita	0,00	0,25	0,01	0,04
Leucoxênio	0,00	0,25	0,01	0,04

Fonte: Aguiar Neto (2014).

Figura 3.3.3.3.1 B – Distribuição dos minerais pesados na plataforma continental entre Caucaia e Trairi.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

A distribuição das espécies minerais (Figura 3.3.3.3.1 B), exceto cassiterita e leucóxênio cujos valores não são representados graficamente, revela que acima de 60% da assembleia mineral é composta basicamente por ilmenita, turmalina, epidoto, hornblenda e monazita. No sentido leste (Caucaia) essas cinco espécies têm um incremento nos seus teores podendo atingir até mais que 90% de toda a assembleia dos pesados.

3.3.3.3.2 Ambiente continental

O teor de minerais pesados nas amostras de sedimentos fluviais variou de 1,64% a 4,09% distribuído em 16 espécies com predominância da ilmenita, exceto para a amostra a jusante do Rio São Gonçalo onde predominou a Limonita (Tabela 3.3.3.3.2). No rio Curu ocorre um enriquecimento de montante para jusante em ilmenita, turmalina, epidoto, hornblenda e espinélio e diminuição ou conservação dos teores para as demais espécies. No rio São Gonçalo esse enriquecimento ocorre para sillimanita, monazita, magnetita, limonita e diopsídio e diminuição ou teores constantes para o restante dos minerais.

Tabela 3.3.3.3.2 – Assembleia de minerais pesados nos sedimentos fluviais entre Caucaia e Trairi.

	Curu 1 (%)	Curu 2 (%)	São Gonçalo 1 (%)	São Gonçalo 2 (%)
Ilmenita	49,70	61,32	44,44	9,79
Turmalina	6,63	9,75	11,11	4,64
Epídoto	6,02	7,55	14,51	1,03
Silimanita	2,71	0,63	0,93	1,55
Hornblenda	0,90	4,72	0,31	0,00
Monazita	0,00	0,00	0,00	0,52
Estauroлита	15,96	5,35	13,89	0,00
Rutilo	3,01	1,26	0,93	0,00
Magnetita	9,64	5,66	7,41	31,44
Zircão	4,52	2,83	2,78	1,03
Granada	0,30	0,00	0,00	0,00
Apatita	0,30	0,63	2,47	0,00
Limonita	0,00	0,00	0,00	48,97
Leucoxênio	0,30	0,00	1,23	0,00
Espinélio	0,00	0,31	0,00	0,00
Diopsídio	0,00	0,00	0,00	1,03

Fonte: Aguiar Neto (2014).

A assembleia de minerais pesados dos sedimentos fluviais é composta em mais de 87% por ilmenita, magnetita, estauroлита, turmalina e epidoto, exceto para a amostra a jusante do rio São Gonçalo onde se constatou uma concentração significativa de óxido de ferro e magnetita.

As amostras a montante e jusante do Rio Curu (Curu 1 e Curu 2) correspondem aos depósitos aluvionares, enquanto a montante do Rio São Gonçalo é representada pelo Complexo Ceará (São Gonçalo 1) e a jusante pela Formação Barreiras (São Gonçalo 2).

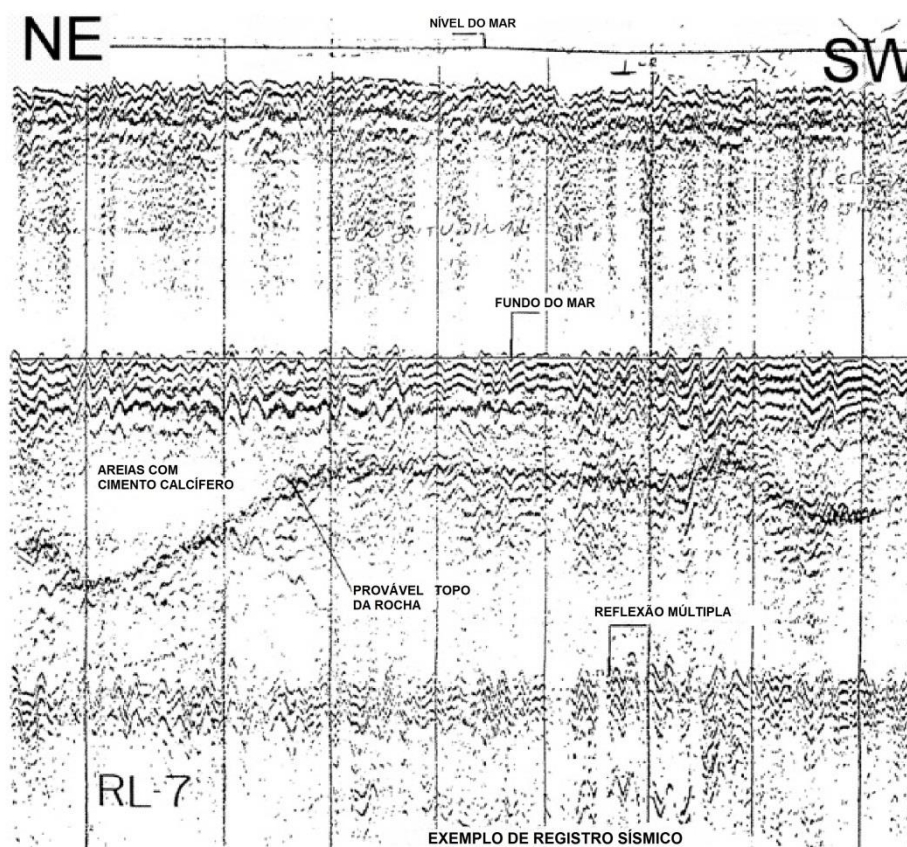
3.3.4 Discussões

A predominância da sedimentação siliciclástica com ilhas esparsas de sedimentos bioclásticos, algas e lamas na área da plataforma continental estudada já foi relatada por Freire (1985) que explicou que o aporte terrígeno predomina em toda a plataforma continental interna e defronte a Fortaleza essa sedimentação pode atingir trechos da plataforma continental externa. A variação dos parâmetros granulométricos (diâmetro médio do grão, grau de seleção, curtose e assimetria) caracteriza sedimentos retrabalhados com alta dispersão dos grãos e mistura de duas ou mais populações granulométricas em proporções variadas. A influência continental exerce relação direta sobre esses sedimentos, além de assumirem um caráter reliquiar pelas suas origens do retrabalhamento de sedimentos da plataforma continental durante as variações do nível do mar no Quaternário.

O modelo digital do terreno (MDT) evidenciou certa homogeneidade morfológica com algumas cavas/depressões da forma de fundo, sendo uma delas bem evidente entre as isóbatas de 20 e 30 m ao largo de São Gonçalo do Amarante e Paracuru, e outra menos marcada em direção a Caucaia (Figura 3.3.3.2). Essa característica morfológica trata-se de uma possível evidência do paleocanal do Rio Curu, que diferencia a morfologia dessa plataforma continental pela quebra na monotonia do relevo devido à atuação pretérita de cursos fluviais que interceptavam a costa em níveis de mar mais baixo durante o último máximo glacial. De acordo com Meireles (2001), esse evento ocorreu de 22.000 a 14.00 A.P na costa cearense. Vale salientar a relevância dessas feições na gênese dos plácemes marinhos, assim como dos bancos arenosos que ocorrem na plataforma continental interna e favorecem a concentração de minerais pesados nas cavas entre esses bancos.

A proximidade do embasamento cristalino na zona costeira influencia no aporte de minerais pesados para a plataforma continental estudada, esse fato é perceptível na área de estudo (Figura 3.3.1 B). No litoral cearense o embasamento cristalino aflora de forma pontual em Jericoacorara, Pecém, Ponta do Mucuripe e Iguape que por vezes se projetam para o mar na forma de pontas ou promontórios, tem certa resistência litológica e desempenham papel relevante no balanço de sedimentos (Morais et al., 2006). As rochas pertencentes ao Complexo Ceará podem ser as principais responsáveis pelo aporte de minerais pesados concentrados na área de estudo. Essas rochas são constituídas essencialmente por rochas paraderivadas, predominando metapelitos (biotita gnaisses geralmente com granadas e com cianita e/ou sillimanita) associados a quartzitos e metacarbonatos em quantidade subordinada, podendo ocorrer raras intercalações de rochas metavulcânicas básicas e ácidas (Garcia & Arthaud, 2004). Além disso, o embasamento cristalino aflora entre as cotas batimétricas de -14 e -28 metros nas proximidades do Porto do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante (Ceará, 1996), sendo uma importante fonte direta de sedimentos siliciclásticos onde se originam os pláceres pelo carreamento dos minerais leves e concentração dos pesados pela hidrodinâmica. Pode-se especificar essa ocorrência como plácer marinho eluvionar, onde são encontradas rochas fonte de minerais pesados aflorantes na plataforma continental (Mukherjee, 2011). A constatação desses afloramentos rochosos na plataforma foi possível pela análise de sismograma (Figura 3.3.4 A), identificando elevações do topo do embasamento onde a espessura do pacote sedimentar nas proximidades da costa é praticamente zero. Esses afloramentos são constituídos por quartzitos, gnaisses, entre outros litótipos do Complexo Ceará e são possivelmente os responsáveis pela contribuição direta do aporte de terrígenos para a plataforma continental.

Figura 3.3.4 A – Sismograma próximo ao Porto do Pecém onde os refletores indicam o topo do embasamento com camadas de areias calcíferas.



Fonte: Ceará (1996)

A assembleia mineral dominante nos sedimentos fluviais (ilmenita, magnetita, estauroлита, turmalina e epídoto) quando comparados com a assembleia dominante dos sedimentos plataformais (ilmenita, turmalina, epídoto, hornblenda e monazita) evidencia a permanência de ilmenita, turmalina e epídoto após o transporte dos sedimentos do ambiente continental para o ambiente marinho. Comparando as densidades e estabilidades químicas dessas espécies dominantes observa-se a seguinte variação:

**Maior
densidade**

**Menor
densidade**

Magnetita > Monazita > Ilmenita > Estauroлита > Epidoto > Hornblenda > Turmalina

**Menor
estabilidade**

**Maior
estabilidade**

Hornblenda < Ilmenita < Magnetita < Epídoto < Estauroлита < Monazita < Turmalina

Ocorre um déficit no aporte de magnetita e estaurolita e um incremento de hornblenda e monazita considerando o aporte de sedimentos fluviais para o ambiente marinho. A estaurolita diminui seus teores de montante para jusante em ambos os rios (Curu e São Gonçalo), fato que já compromete o fornecimento desse mineral para o ambiente plataformar. A magnetita diminui seus teores de montante para jusante apenas no Rio Curu e eleva seu teor no Rio São Gonçalo. Contudo o conteúdo total de minerais pesados no sedimento diminui drasticamente a jusante do Rio São Gonçalo de 4,09% para 1,64%, desfavorecendo o aporte das espécies como um todo para o ambiente costeiro e marinho, até pelo caráter intermitente dessa drenagem.

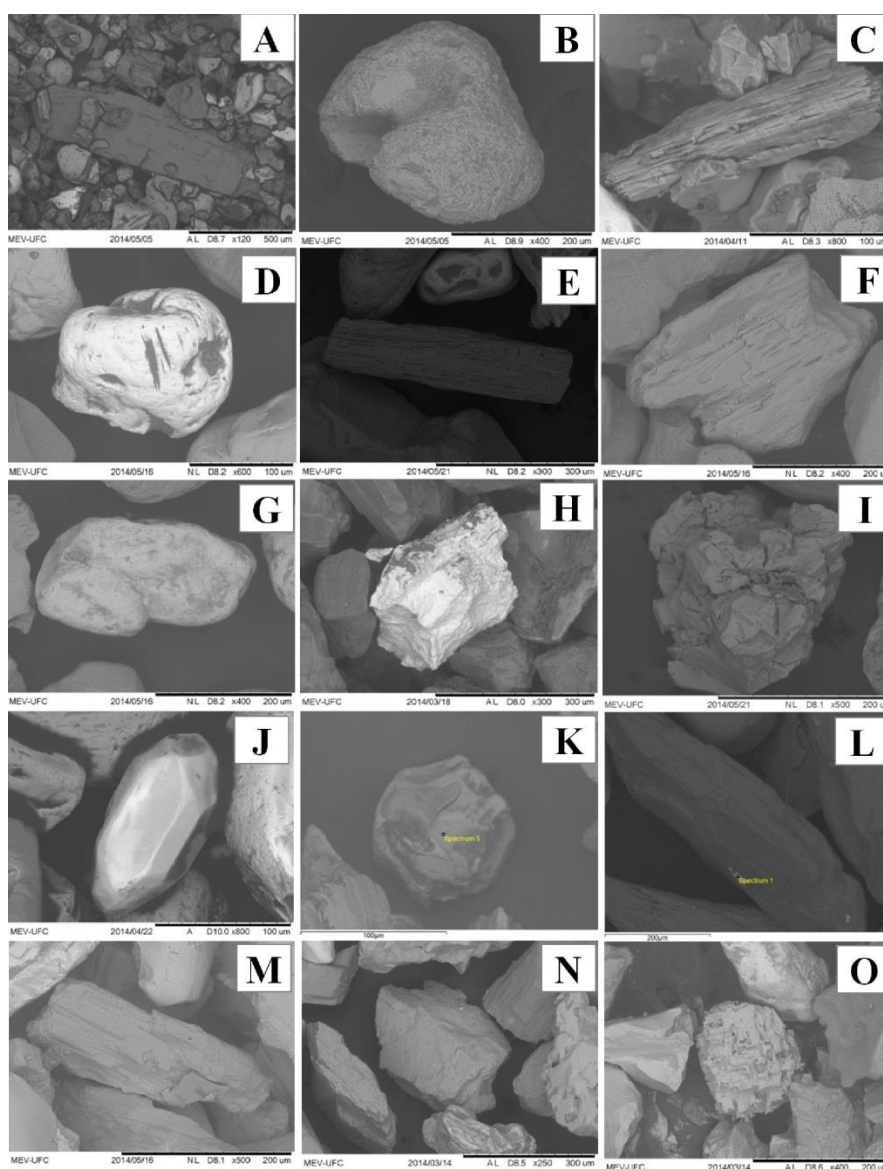
No rio Curu ocorre um aumento de montante para jusante em ilmenita, turmalina, epidoto, hornblenda e espinélio. No rio São Gonçalo esse aumento ocorre para silimanita, monazita, magnetita, FeO e diopsídio. O aporte de sedimentos do Rio Curu e do afloramento do Complexo Ceará nas proximidades do Porto do Pecém podem ser as principais fontes de minerais pesados para os plácemes marinhos de ilmenita, turmalina e epidoto identificados no estudo de Aguiar Neto *et al* (2014). A monazita, por sua vez, pode ter sua proveniência nas areias pretas costeiras e no próprio embasamento cristalino aflorante na plataforma continental (Figura 3.3.4 A).

Os cursos fluviais atuais apresentam, em sua maior parte, uma rica e diversificada assembleia de minerais pesados, indicando que o intemperismo de grande escala não afeta de forma significativa a diversidade mineralógica durante o transporte (Corrêa et al., 2008). Contudo deve-se considerar a abrasão durante o transporte, seleção hidráulica dos grãos e dissolução pós-deposição de minerais instáveis na modificação das assembleias mineralógicas.

As diversas espécies de minerais pesados identificadas nesse estudo (Figura 3.3.4 B) refletem proveniência de natureza dual, considerando como fonte primária as rochas do embasamento cristalino (Complexo Ceará) e fontes secundárias os sedimentos retrabalhados da Formação Barreiras, areias pretas costeiras e sedimentos de deriva litorânea. A assembleia característica do Complexo Ceará é composta por uma paragênese mineral (epidoto, hornblenda, diopsídio, espinélio, granada, andaluzita, cianita, silimanita, estaurolita e rutilo) indicativa de metamorfismo regional. Granada, andaluzita, cianita, silimanita, estaurolita e rutilo são comuns em amostras de aluviões, considerando que cianita e rutilo também são

comuns em depósitos litorâneos. Essas seis espécies além de serem comuns em aluviões também compõem uma assembleia típica de rochas ricas em alumínio; epidoto, diopsídio e espinélio são típicos de calcários metamorfisados; o epidoto pode ser também diagnóstico de hidrotermalismo e de metamorfismo de rochas básicas, além de ocorrer também em rochas ígneas (Klein e Dutrow, 2012; Pereira et al., 2005). Essa assembleia é compatível com as rochas paraderivadas do Complexo Ceará, Unidade Canindé.

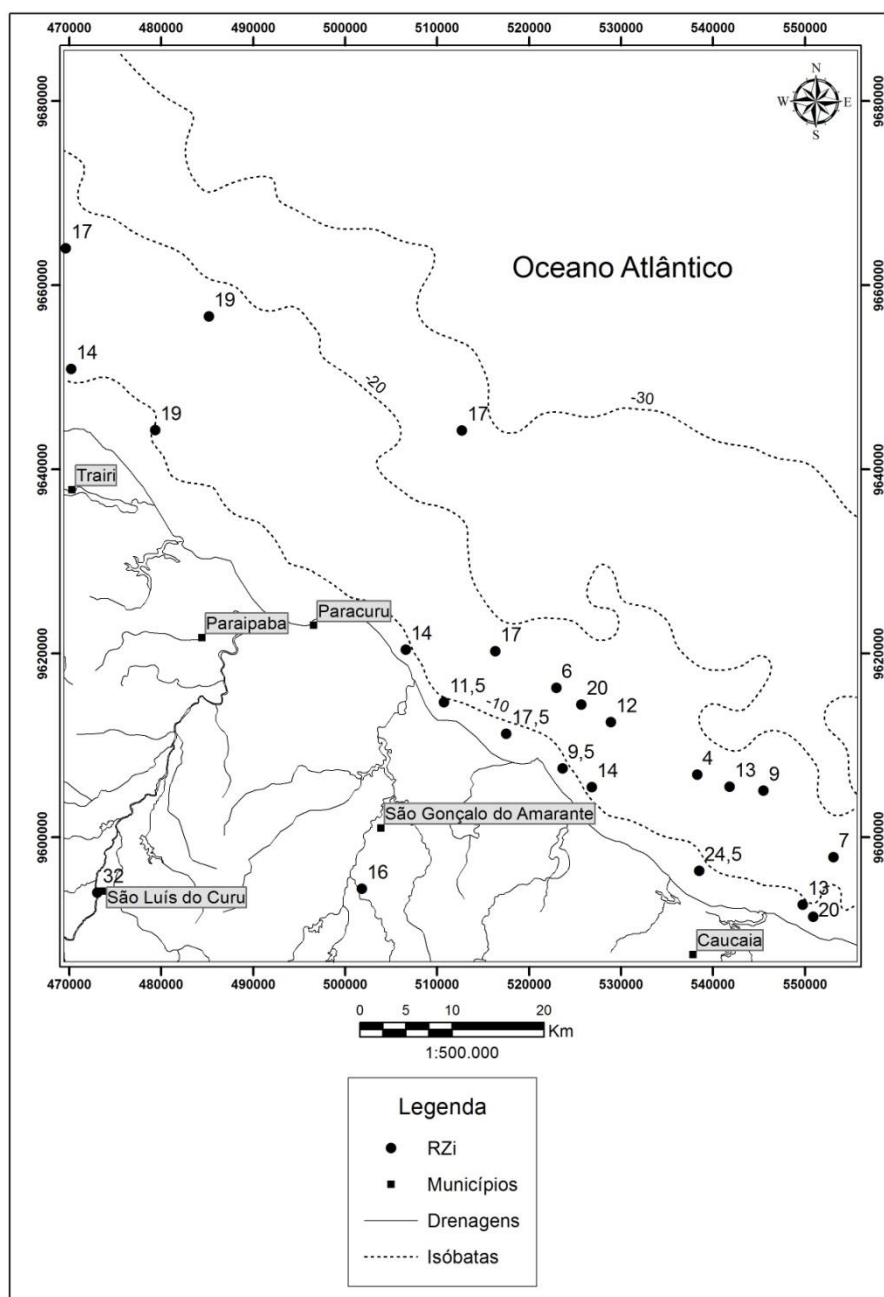
Figura 3.3.4 B – Grãos de minerais pesados imageados em MEV (A – Cianita, B – Rutilo, C – Hornblenda, D – Monazita, E – Silimanita, F – Turmalina, G – Ilmenita, H – Cassiterita, I – Epidoto, J – Zircão, K – Granada, L – Andaluzita, M – Diopsídio, N – Estauroлита e O – Apatita).



Fonte: Aguiar Neto (2014).

As variações do índice RZi (Figura 3.3.4 C) reforça a proveniência de natureza dual na gênese dos pláceres marinhos entre Caucaia e Trairi, pois esse par mineral não é afetado pelas mudanças das condições hidráulicas, fornecendo um bom reflexo das modificações na proveniência sedimentar.

Figura 3.3.4 C – Variação do RZi na plataforma continental e nos sedimentos fluviais entre Caucaia e Trairi.

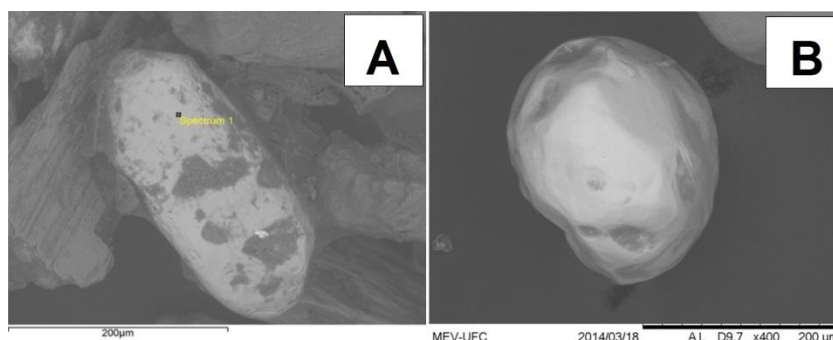


Fonte: Aguiar Neto (2014).

Os sedimentos fluviais do Rio Curu tende a ser mais enriquecidos em rutilo ($RZi = 32$) do que os do Rio São Gonçalo ($RZi = 16$), embora rutilo e zircão sejam comum em aluviões esses minerais podem indicar fontes distintas. O rutilo está presente na maior parte das rochas da crosta, sobretudo nas derivadas de metamorfismo regional e suas características geoquímicas permitem uma diferenciação entre várias rochas-fonte de origem metamórfica, principalmente os de origem detrítica (Pereira et al. 2005; Sevastjavona et al., 2012). Zircão é um mineral acessório comum e amplamente distribuído em todos os tipos de rochas, principalmente as ácidas, ocorrendo primariamente numa gama variada de rochas ígneas como granitos, granodioritos, sienitos, monzonitos e muito comum nos nefelinas-sienitos. Pode ocorrer também em mármore, gnaisses e xistos. (Pereira et al. 2005; Remus et al., 2008; Klein e Dutrow, 2012). É provável que o aporte de material de origem metamórfico predomine nos depósitos aluvionares do Rio Curu, enquanto no Rio São Gonçalo as contribuições de origem ígnea supere ao do outro rio.

O índice ZTR variou de 8,50% a 62,00% nos sedimentos plataformais e de 5,67% a 14,81% nos sedimentos fluviais. Esses resultados revelam a presença de sedimentos imaturos e maduros na área da plataforma continental estudada, constatado também pela ocorrência de grãos de zircões euedrais e arredondados em amostras próximas ao mesmo local de sedimentação (Figura 3.3.4 D). Além de indicar o grau de maturidade dos sedimentos a morfologia dos grãos de zircão pode inferir área-fonte (Suguio, 2003), o grão euedral é de origem tipicamente magmática, enquanto o grão arredondado indica fonte sedimentar atribuída à alta reciclagem desses sedimentos. O índice ZTR é amplamente utilizado como parâmetro de maturidade, contudo as diferenças de densidade desses minerais implicam na susceptibilidade variável ao transporte, conseqüentemente, a variação desse índice pode resultar do efeito combinado da alteração pós-deposicional e do transporte sedimentar (Nóbrega et al., 2008; Ochoa et al., 2013).

Figura 3.3.4 D – Zircão eudral (A) e arredondado (B), que ocorrem em amostras bem próximas ao longo do litoral de São Gonçalo do Amarante.



Fonte: Aguiar Neto (2014).

É possível que os depósitos aluvionares do Rio Curu possam ter influência direta no aporte de ilmenita, turmalina e epídoto para os pláceres marinhos entre Caucaia e Trairi, pois ao longo do curso desse rio, esses minerais enriquecem seus teores e se destacam no ambiente marinho com teores acima de 1 Kg/ton ao longo do litoral de São Gonçalo do Amarante, como constatado no estudo de Aguiar Neto et al. (2014). Deve-se considerar também como fontes potenciais as areias pretas costeiras, sedimentos de deriva litorânea e o afloramento do Complexo Ceará na plataforma continental próximo ao Porto do Pecém que atua efetivamente na gênese do plácer marinho do tipo eluvionar. A monazita, em domínio continental, ocorre apenas na amostra a jusante do Rio São Gonçalo (Tabela 3.3.3.3.2) e com concentração bastante pequena (0,54%). Considerando ainda o caráter intermitente, é provável que essa drenagem não influencie significativamente no aporte de monazitas para os pláceres marinhos no litoral de São Gonçalo do Amarante. As fontes mais prováveis das monazitas nesses pláceres são o afloramento rochoso do Complexo Ceará na plataforma continental, areias pretas costeiras e sedimentos de deriva litorânea, indicativos de áreas-fonte mais próximas do domínio marinho, reforçado pela alta densidade da monazita (4,6 a 5,4) que propicia uma deposição a distâncias mais curtas.

3.3.5 Conclusões

As características morfosedimentares da plataforma continental estudada (predominância da sedimentação siliciclástica, irregularidades na forma de fundo submarino e ocorrência do paleocanal do Rio Curu) propiciam acumulações de minerais pesados com seus respectivos depósitos de pláceres marinhos. Os parâmetros granulométricos determinaram alta dispersão desses sedimentos marinhos e mistura de duas ou mais populações granulométricas em proporções variadas com contribuições do aporte continental. As rochas pertencentes ao Complexo Ceará contribuem no aporte de minerais pesados tanto em domínio continental (assembleia mineral predominante nos sedimentos fluviais do Rio Curu) como marinho, sendo distinguido como fonte direta do plácer marinho eluvionar pelo afloramento do embasamento na plataforma continental. As areias pretas costeiras e os sedimentos de deriva litorânea se unem as contribuições do embasamento cristalino definindo uma proveniência de natureza dual para esses depósitos. Essa constatação é consubstanciada pelas variações dos índices RZi e ZTR, revelando modificações na proveniência sedimentar e heterogeneidade desses grãos com a presença de sedimentos maduros e imaturos. Constatou-se uma paragênese mineral típica de metamorfismo regional com associações correspondentes às rochas ricas em alumínio, essa característica destaca o papel das rochas paraderivadas do Complexo Ceará na proveniência dos pláceres marinhos desse estudo. Determinar o potencial exploratório desses depósitos é um desafio devido ao caráter dinâmico desses recursos minerais pela influência da deriva litorânea que altera a energia das ondas, nível relativo do mar e ocasiona variações tanto locais como regionais na distribuição dos pláceres.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) e os laboratórios de Microscopia Eletrônica de Varredura e de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

- Addad, J. E. (2010) *Minerais Pesados: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental* – São Paulo, 2ª edição, 208p.
- Aguiar Neto, A. B., Freire, G. S. S., Almeida, N. M. (2014). Pláceres Marinhos entre Caucaia e Trairi, Ceará, Nordeste do Brasil. *Revista Geociências UNESP*, Situação: aceito para publicação.
- Almeida, N. M., Lehugeur, L. G. O., Freire, G. S. S., Santos, D. M., Aguiar Neto, A. B. (2011). Assembléia de Minerais Pesados da Plataforma Continental – Porção Oeste do Estado do Ceará, Brasil. *Revista de Geologia*, Vol. 24, nº 1, 21-27.
- Arthaud, M.H.; Vasconcelos, A.M.; Oliveira, F.V.C. (1998). As seqüências metassedimentares do Ceará Central. *XL Congresso Brasileiro Geologia*, Belo Horizonte, 16.
- Barreto, L. A., Milliman, J. D., Amaral, C. A. B.; Francisconi. (1975) Norten Brazil. In: Contribution to sedimentology. *Upper Continental margin sedimentation off Brazil*. Stuttgart, 4p. 1-10.
- Cascalho, J., Oliveira, A., Rodrigues, A., Taborda, R., Fonseca, R., Fernandes, C. (2007). Características Sedimentares da Plataforma SW da Ilha da Madeira. Trabalho Completo. *IV Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Funchal, Portugal, 14p.
- Cavalcanti, V. M. M. (2011) *Plataforma continental: a última fronteira da mineração brasileira*. Brasília: DNPM, 104p.
- Ceará. (1996). Secretaria dos Transportes, Energia, Comunicação e Obras – SETECO. *Estudo de Impacto Ambiental – EIA: obras off-shore do Porto de Pecém*. Fortaleza: SETECO, 3 (A e B).
- Corrêa, I. C. S., Ayup-Zouain, R. N., Weschenfelder, J., Tomazelli, L. J. (2008). Áreas Fontes dos Minerais Pesados e sua Distribuição sobre a Plataforma Continental Sul-brasileira, Uruguaiana e Norte-argentina. *Revista Pesquisas em Geociências*, 35 (1): 137-150.
- CPRM. (2003). *Mapa Geológico do Estado do Ceará*. Escala 1:500.000. Serviço Geológico do Brasil. Fortaleza.
- Emery, K. O., Noakes, L. C. (1968). Economic placer deposits of the continental shelf: UN. ECAFE, *Tech, Bull*, v.71, p. 422-440.
- Fetter, A.H., Santos, T.J.S., Van Schmus, W.R., Hackspaker, P.C., Brito Neves, B.B., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., Wernick E. (2003). Evidence for neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana. *Gondwana Research*, 6 (2): 265-273.

- França, A. M. C., Coutinho, P. N., Morais, J. O. (1976) Sedimentos superficiais da margem continental Nordeste brasileira. *Revista Brasileira de Geologia*. 6 (2): 78-88.
- Freire, G.S.S. (1985). *Geologia Marinha da Plataforma Continental do Estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado), UFPE, Recife, 108p.
- Galehouse, J.S. (1971). Point counting. In: Carver, R. E. (ed.). *Procedures in Sedimentary Petrography*. New York: *Wiley-Interscience*, p 385-407.
- Garcia, M. G. M., Arthaud, M. H. (2004). Caracterização de trajetórias P-T em *nappes* brasileiras: região de Boa Viagem/Madalena – Ceará Central (NE Brasil). *Revista de Geologia*, Vol.17, nº 2, 173-191.
- Gent, M. R., Alvarez, M. M., Iglesias, J. M. G., Alvarez, J. T. (2005). Offshore Occurrences of Heavy-Mineral Placers, Northwest Galicia, Spain. *Marine Georesources and Geotechnology*, 23:39-59.
- Klein, C., Dutrow, B. (2012). *Manual de ciência dos minerais; tradução e revisão técnica*. Rualdo Menegat. 23ª Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2012.
- Kudrass, H.R. (2000). Marine placer deposits and sea-level changes. In: CRONAN, D.S.(Ed.), *Handbook of Marine Mineral Deposits*, CRC Press, Boca Raton, p. 3-26.
- Lalomov, A. V., Tabolitch, S. E. (2000). Age determination of coastal submarine placer, Val'cumey, northern Siberia. *CEN Technical Journal* 14(3).
- Larsonneur, C. (1977). La cartographie de's dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche. *Journal Redi oceanog*, vol. 2, pag. 34-39.
- Lima, S. F., Silva Filho, W. F., Pinheiro, R. D., Freire, G. S. S., Maia, L.P., Monteiro, L. H. U. ANASED. (2001). Programa de Análise, Classificação e Arquivamento de Parâmetros Sedimentológicos. *Anais do Congresso da ABEQUA – Associação de Estudos do Quaternário – Imbé – RS*.
- Martins, L. R., Coutinho, P. N. (1981). The Brazilian Continental margin. *Earth Science Reviews*, Amsterdam, v. 17, p. 87 –107.
- Meireles, A. J. A. (2001). *Morfologia litoral y sistema evolutivo da la costa do Ceará*. 353f. Tese (Doutorado) – Programa de Doctorado: Geografia Física y Planificación Ambiental, Departamento de Geografia Física y Análisis Geográfico Regional, Universitat de Barcelona.
- Milani, E. J., Brandão, J. A. S. L., Zalán, P. V., Gamboa, L. A. P. (2001). Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.18, n. 3, p.352-396.

- Morais, J. O., Freire, G. S. S., Pinheiro, L., Souza, M. J. N., Carvalho, A. M., Pessoa, P. R., Oliveira, S. H. M. (2006). *Erosão e progradação do litoral brasileiro: Ceará*. Brasília: MMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_publicacao/78_publicacao12122008085953.pdf> Acesso em 03/10/2014.
- Morton A.C., Hallsworth C. (1994). Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90:241-256.
- Mukherjee, S. (2011). *Applied Mineralogy: Applications in Industry and Environment*. Kolkata, Índia, 575p.
- Nobrega, J. E. S., Sawakuchi, A. O., Almeida, R. P. (2008). Minerais pesados da porção média e superior do Grupo Gauritas (Eocambriano, RS): considerações sobre a proveniência sedimentar. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3): 554-565.
- Ochoa, F. L., Góes, A. M.; Rosseti, D. F.; Sawakuchi, A. O.; Cassini, L. V.; Coutinho, J. M. V. (2013). Discriminação dos depósitos cenozoicos da parte emersa da Bacia Paraíba (NE, Brasil) por meio de minerais pesados e granulometria. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, 43 (3): 555-570.
- Parfenoff, A., Pomerol, C., Tourenq, J. (1970). *Les minéraux en grains – Méthodes d'études et détermination*. Masson et Cie, Paris. 578p.
- Pereira R.M., Ávila C.A., Lima P.R.A.S. (2005). *Minerais em grãos. Técnicas de coleta, preparação e identificação*. Oficina de Textos, São Paulo. 128p.
- Remus, M. V. D., Souza, R. S., Cupertino, J. A., Ros, L. F.; Dani, N., Lelarge, M. L. V. (2008). Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Revista Brasileira de Geociências*, Vol 38 (2 – suplemento): 166-185.
- Sevastjavona, I., Hall, R., Alderton, D. (2012). A detrital heavy mineral viewpoint on sediment provenance and tropical weathering in SE Asia. *Sedimentary Geology*, Vol. 280, 179-194.
- Silva, C. G. (2000). Placeres Marinhos. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18(3), p. 327-336.
- Silva Filho, W. F. (2004). *Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental do Estado do Ceará*. Tese (Doutorado), UFRGS, 2004. 307p.
- Suguio, K. (2003). *Geologia Sedimentar*. São Paulo: editora Edgard Blücher Ltda, 400p.
- Tomazzoli, E. R., Oliveira, U. R., Horn Filho, N. O. (2007). Proveniência dos Minerais de Óxidos de Fe-Ti nas Areias da Praia do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC), Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 25 (Supl.1): 49-64.

4. CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

No intuito de se obter a distribuição de minerais pesados na plataforma continental oeste do Estado do Ceará, a presente tese gerou informações concernentes às possíveis proveniências e ao potencial econômico dos pláceres marinhos na plataforma continental estudada até a profundidade de 30m.

Os resultados evidenciaram a distribuição irregular desses depósitos com maior concentração na porção mais a leste (folha Fortaleza), onde foram identificados os percentuais mais elevados (até 4,54%). Os pláceres marinhos predominaram em profundidades inferiores a 20 m e nas areias litoclásticas/litobioclásticas. Dentre as 18 espécies minerais identificadas, a ilmenita e a turmalina são as que estão mais amplamente distribuídas.

O modelo digital do terreno discriminou irregularidades na morfologia de fundo que podem ser correlacionadas às feições típicas das oscilações do nível do mar durante o Quaternário (paleocanais e antigas linhas de praia). Essas feições são propícias à acumulação de minerais pesados e contribuem na gênese dos pláceres marinhos.

As rochas metamórficas do Complexo Ceará que ocorrem próximo à costa e afloram na plataforma continental nas proximidades do Porto do Pecém atuam como fonte primária dos pláceres marinhos concentrados na folha Fortaleza. Esse fato pôde ser constatado pela paragênese mineral (granada, andaluzita, cianita, silimanita, estaurolita e rutilo) típica de metamorfismo regional com associações correspondentes às rochas ricas em alumínio que são compatíveis com as paraderivadas do Complexo Ceará. Os sedimentos retrabalhados da Formação Barreiras, as areias pretas dos depósitos praias e os sedimentos marinhos de deriva correspondem às contribuições secundárias desses depósitos, podendo contribuir de forma mais regional.

As análises multivariadas, além de discriminar a proveniência de natureza dual (primária e secundária), expôs a existência de sedimentos atuais juntamente com sedimentos antigos, sendo influenciados pela dinâmica do ambiente. Alia-se a esse fato as variações dos índices mineralógicos (RZi e ZTR) que revelaram modificações na proveniência sedimentar e heterogeneidade desses grãos pela presença de sedimentos maduros e imaturos. A alta dispersão desses sedimentos

marinhos com mistura de duas ou mais populações granulométricas em proporções variadas é influenciada também pelas contribuições do aporte continental.

Ilmenita, turmalina, epídoto e monazita se destacam com teores acima de 1 Kg/ton nos sedimentos próximos à costa do município de São Gonçalo do Amarante, tratando-se de concentrações associadas às irregularidades do fundo submarino e correlacionadas ao paleovale do rio Curu. Vale ressaltar o enriquecimento de titânio nas ilmenitas de algumas amostras por alteração intempérica com conteúdo de TiO_2 acima de 89%, dada a importância econômica da ilmenita como principal fonte desse metal.

Os depósitos aluvionares do Rio Curu podem ter, possivelmente, influência no aporte de ilmenita, turmalina e epídoto para os pláceres marinhos presentes na folha Fortaleza, pelo enriquecimento desses minerais de montante para jusante. A monazita pode provir do afloramento do Complexo Ceará na plataforma continental, areias pretas praias e sedimentos de deriva litorânea.

O caráter dinâmico dos depósitos do tipo pláceres marinhos dificulta a determinação do seu potencial exploratório por estarem inseridos em um ambiente que os submete às variações tanto locais como regionais. Os pláceres identificados nesse estudo, apesar de serem considerados depósitos de dimensões reduzidas e do alto custo que demanda o processo de mineração em ambiente marinho, são considerados recursos minerais estratégicos e sua exploração pode ser viabilizada pela valorização de determinado bem mineral, como já ocorre com o titânio, assim como pelo surgimento de novas tecnologias em mineração marinha que possibilitem a lavra desses depósitos. A prospecção desses pláceres, como qualquer atividade de mineração, acarretará impactos no ambiente marinho, dentre os quais podem citar: comunidade bentônica afetada pelas alterações na deposição dos sedimentos, eliminação direta dos organismos na área dragada, aumento da turbidez da água pelo despejo de rejeitos sobre o fundo submarino ocasionando a diminuição da luminosidade e comprometendo a produtividade biológica. Recomenda-se contemplar as fragilidades do ambiente onde esses recursos ocorrem para um melhor entendimento de suas limitações e um uso sustentável desse meio.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDAD, J. E. **Minerais Pesados: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental** – São Paulo, 2ª edição, 2010. 208p.

AGUIAR, J. E.; MARINS, R. V.; ALMEIDA, M. D. Comparação de Metodologias de Digestão de Sedimentos Marinhos para Caracterização da Geoquímica de Metais-Traço na Plataforma Continental Nordeste Oriental Brasileira. **Geochimica Brasiliensis**, 21(3), 304-323, 2007.

ALMEIDA, N. M.; LEHUGEUR, L. G. O.; FREIRE, G. S. S.; SANTOS, D. M.; AGUIAR NETO, A. B. Assembléia de Minerais Pesados da Plataforma Continental – Porção Oeste do Estado do Ceará, Brasil. **Revista de Geologia (Fortaleza)**, Vol. 24, nº 1, 21-27, 2011.

ANDRIOTTI, J. L. S. Análise de Componentes Principais: Fundamentos de uma técnica de análise de dados multivariada aplicável a dados geológicos. **Acta Geologica Leopoldensia**, 20(44):27-50, 1997.

ARTHAUD, M. H.; MORAIS, J. O.; FREIRE, G. S. S. Distribuição espacial de minerais pesados na plataforma continental do Estado do Maranhão. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza 16 (1): 49-54, 1976.

BARRETO, L. A.; MILLIMAN, J. D.; AMARAL, C. A. B.; FRANCISCONI. Upper Continental margin sedimentation off Brazil. **Contribution to sedimentology**, 4:11-43. 1975.

CASCALHO, J.P.V.; TABORDA, R.P.M. Heavy mineral placer formation – An example from Algarve, Portugal. *In*: INTERNATIONAL COASTAL SYMPOSIUM, 8, 2006, Itajaí. **Journal of Coastal Research, Proceedings of the 8th International Coastal Symposium**, Itajaí, 2006, p. 246–249.

CASCALHO, J., OLIVEIRA, A., RODRIGUES, A., TABORDA, R., FONSECA, R.; FERNANDES, C. Características Sedimentares da Plataforma SW da Ilha da Madeira. *In*: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 4, 2007, Funchal. **Anais do IV Congresso Sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa**, Funchal, 2007, p. 1-14.

CAVALCANTI, V. M. M. **Plataforma continental: a última fronteira da mineração brasileira**. Brasília: DNPM, 2011. 104p.

CORRÊA, I. C. S.; AYUP-ZOUAIN, R. N.; WESCHENFELDER, J.; TOMAZELLI, L. J. Áreas Fontes dos Minerais Pesados e sua Distribuição sobre a Plataforma Continental Sul-brasileira, Uruguiana e Norte-argentina. **Revista Pesquisas em Geociências**, 35 (1): 137-150, 2008.

COUTINHO, P. N.; MORAIS, J. O. Distribuição de lós Sedimentos em la plataforma continental norte y nordeste de Brasil. *In: SYMPOSIUM ON INVESTIGATION AND RESOURCES OF THE CARIBBEAN SEA AND ADJACENTS REGIONS*, Curaçao, 1968, **Anais do Symposium on Investigation and Resources of the Caribbean Sea and Adjacent Regions**, Curaçao, 1968, 313-315.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2013**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=3165> acesso em 27 de abril de 2014.

EMERY, K. O.; NOAKES, L. C. Economic placer deposits of the continental shelf. **Technical Bulletin Economic Commission for Asia and Far East**, v.71, p. 422-440, 1968.

FRANÇA, A. M. C.; COUTINHO, P. N. & MORAIS, J. O. Sedimentos superficiais da margem continental Nordeste brasileira. **Revista Brasileira de Geologia**. 6 (2): 78-88, 1976.

FREIRE, G.S.S. **Geologia Marinha da Plataforma Continental do Estado do Ceará**. 1985. 108p. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

GALEHOUSE, J.S. **Point counting**. In: Carver, R. E. (ed.). *Procedures in Sedimentary Petrography*. New York: Wiley-Interscience, p 385-407, 1971.

GENT, M. R.; ALVAREZ, M. M.; IGLESIAS, J. M. G.; ALVAREZ, J. T. Offshore Occurrences of Heavy-Mineral Placers, Northwest Galicia, Spain. **Marine Georesources and Geotechnology**, 23:39-59, 2005.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais; tradução e revisão técnica**: Rualdo Menegat. 23ª Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2012.

KUDRASS, H.R. **Marine placer deposits and sea-level changes**. In: CRONAN, D.S.(Ed.), *Handbook of Marine Mineral Deposits*, CRC Press, Boca Raton, p. 3-26, 2000.

LACERDA, L. D.; MARINS, R. V. Geoquímica de sedimentos e o monitoramento de metais na plataforma continental nordeste oriental do Brasil. **Geoquímica brasiliensis**, 20 (1): 123- 135, 2006.

LALOMOV, A. V. & TABOLITCH, S. E. Age determination of coastal submarine placer, Val'cumey, northern Siberia. **CEN Technical Journal**, 14(3), 2000.

LAMAS, F., IRIGARAY, C., OTEO, C., CHACON, J. Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls. **Engineering geology**, 81:32-41, 2005.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. Departamento de Geologia Aplicada. Instituto de Geociência e ciências exatas, UNESP/ Campos de Rio Claro, São Paulo, 2000.

LARSONNEUR, C. La caryographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise en points et utilisée en Manche. **Journal de Recherche Oceanographique**, 2: 34-39, 1977.

LEWIS, G. R. **The Stannaries: A study of the English Tin Miner**. Harvard University Press, Cambridge, 1924.

LIMA, S. F., SILVA FILHO, W. F., PINHEIRO, R. D., FREIRE, G. S. S., MAIA, L.P.; MONTEIRO, L. H. U. ANASED – Programa de análise, classificação e arquivamento de parâmetros sedimentológicos. *In*: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8, Imbé, 2001, **Anais do VIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, Imbé, ABEQUA. 1 CD-ROM. 2001.

MAIA, C. J. C. **Os minerais pesados da plataforma continental interna oeste do Estado do Ceará**. 2005. Monografia (Graduação em Geologia), Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MARQUES, W. S.; SIAL, A. N.; MENOR, E. A.; FERREIRA, V. P.; FREIRE, G. S. S.; LIMA, E. A. M.; SOUZA, R. L. B. Ancient Coastlines in the Continental Shelf of the State of Ceará, Northeast Brazil: Evidence from Sediment Chemistry and Stable Isotopes. **International Geology Review**, Vol.50, p. 1-16, 2008.

MORTON A.C., HALLSWORTH C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, 90:241-256, 1994.

NASCIMENTO, F. S., FREIRE, G. S. S., MIOLA, B. Caracterização geoquímica dos granulados marinhos da plataforma continental do Nordeste do Brasil. **Revista de Geologia (Fortaleza)**, Vol. 22, nº 1, 15-26, 2009.

NOBREGA, J. E. S.; SAWAKUCHI, A. O.; ALMEIDA, R. P. Minerais pesados da porção média e superior do Grupo Gauritas (Eocambriano, RS): considerações sobre a proveniência sedimentar. **Revista Brasileira de Geociências**, 38(3): 554-565, 2008.

OCHOA, F. L.; GÓES, A. M.; ROSSETI, D. F.; SAWAKUCHI, A. O.; CASSINI, L. V.; COUTINHO, J. M. V. Discriminação dos depósitos cenozoicos da parte emersa da Bacia Paraíba (NE, Brasil) por meio de minerais pesados e granulometria. **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, 43 (3): 555-570, 2013.

PALMA, J.C. **Depósitos de Minerais Pesados**. *In*: AMARAL, C.A.B. (Ed.). Recursos Minerais da margem Continental Brasileira e das Áreas Oceânicas Adjacentes (Relatório Final). Rio de Janeiro, Série Projeto REMAC, N. 10, p. 33-50, 1979.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENG, J. 1970. **Les minéraux en grains – Méthodes d'études et détermination**. Masson et Cie, Paris. 578p.

PEREIRA, R. M.; ÁVILA, C. A.; LIMA, P. R. A. S. **Minerais em grãos: técnicas de coleta, preparação e identificação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

RAMOS, R. F.; SANTOS, D. M. **Minerais Pesados da Plataforma Continental Interna Leste do Estado do Ceará – Ce**. 2005. Monografia (Graduação em Geologia), Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

REMUS, M. V. D.; SOUZA, R. S.; CUPERTINO, J. A.; ROS, L. F.; DANI, N.; LELARGE, M. L. V. Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol 38 (2 – suplemento): 166-185, 2008.

SANTANA, C.I. **Recursos minerais da margem continental brasileira e bacias oceânicas adjacentes**. Comissão Interministerial para Recursos do Mar (CIRM) – Grupo de Trabalho sobre Recursos não Vivos da Plataforma Continental, Relat. Inédito, p. 20-23, 1997.

SEVASTJAVONA, I.; HALL, R.; ALDERTON, D. A detrital heavy mineral viewpoint on sediment provenance and tropical weathering in SE Asia. **Sedimentary Geology**, Vol. 280, 179-194, 2012.

SILVA, C. G. Placeres Marinhos. **Brazilian Journal of Geophysics**, Vol. 18(3), p. 327-336, 2000.

SILVA FILHO, W. F. **Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental do Estado do Ceará**. 2004. 307p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SOUZA, D. R.; ABREU, J. G. N. 2005. Análise Quantitativa dos Minerais Pesados na Plataforma Continental Interna Adjacente ao Litoral Centro-Nortede Santa Catarina. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, 2005, 9(1):1-5.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo: editora Edgard Blücher Ltda, 2003. 400p.

TINTELNOT, M. **Late Quaternary changes on the NE-Brazilian continental margin as revealed by clay mineral and calcium carbonate fluctuations**. In Ekau, W., Knoppers, B. (ed.), Joint Oceanographic projects: JOPS-II Cruise Report and First Results. Center for Marine Tropical Ecology, Bremen 104- 115, 1996.

TOMAZZOLI, E. R.; OLIVEIRA, U. R.; HORN FILHO, N. O. Proveniência dos Minerais de Óxidos de Fe-Ti nas Areias da Praia do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC), Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, Vol. 25 (Supl.1): 49-64, 2007.

**APÊNDICE A – PONTOS AMOSTRADOS AO LONGO DA PLATAFORMA
CONTINENTAL OESTE DO CEARÁ**

Controle	Código da amostra	Longitude	Latitude	% Minerados Pesados
1	GEO0099	-38,5050	-3,6530	0,50
2	GEO0100	-38,5217	-3,6383	1,21
3	GEO0101	-38,5383	-3,6217	0,10
4	GEO0102	-38,5667	-3,6167	0,29
5	GEO0109	-38,5183	-3,6633	0,55
6	GEO0110	-38,5417	-3,6967	1,10
7	GEO0123	-38,6030	-3,6383	0,84
8	GEO0127	-38,5518	-3,6850	2,18
9	GEO0130	-38,6533	-3,6515	2,29
10	GEO0134	-38,7585	-3,5695	1,91
11	GEO0135	-38,7870	-3,5510	2,12
12	GEO0137	-38,8420	-3,5170	2,82
13	GEO0139	-38,9032	-3,4858	4,54
14	GEO0140	-38,9233	-3,4567	2,22
15	GEO0141	-38,9407	-3,4342	1,57
16	GEO0142	-38,9577	-3,4033	3,71
17	GEO0143	-38,9892	-3,3878	1,08
18	GEO0144	-39,0208	-3,3737	1,27
19	GEO0145	-39,0520	-3,3667	2,50
20	GEO0146	-39,0833	-3,3517	0,63
21	GEO0149	-39,1388	-3,2710	1,11
22	GEO0150	-39,1583	-3,2413	0,95
23	GEO0151	-39,1858	-3,2183	1,59
24	GEO0153	-39,2392	-3,1733	1,31
25	GEO0154	-39,2680	-3,1583	1,35
26	GEO0302	-39,2732	-3,0397	2,13
27	GEO0303	-39,2403	-3,0520	0,82
28	GEO0305	-39,1833	-3,0747	0,63
29	GEO0306	-39,1535	-3,0883	0,59
30	GEO0307	-39,1333	-3,1067	1,36
31	GEO0308	-39,1050	-3,1263	0,91
32	GEO0309	-39,0833	-3,1552	1,52
33	GEO0310	-39,0573	-3,1743	1,44
34	GEO0311	-39,0358	-3,2042	0,06
35	GEO0312	-39,0070	-3,2248	2,19
36	GEO0313	-38,9880	-3,2535	0,00
37	GEO0315	-38,9533	-3,3050	1,89
38	GEO0316	-38,9333	-3,3343	1,46
39	GEO0317	-38,9168	-3,3547	0,69
40	GEO0318	-38,8907	-3,3868	0,71

41	GEO0319	-38,8717	-3,4168	1,42
42	GEO0320	-38,8528	-3,4360	1,27
43	GEO0321	-38,8210	-3,4542	1,80
44	GEO0322	-38,7932	-3,4720	4,49
45	GEO0323	-38,7685	-3,4883	2,07
46	GEO0324	-38,7397	-3,5057	1,32
47	GEO0327	-38,6552	-3,5572	1,48
48	GEO0328	-38,6237	-3,5692	1,45
49	GEO0329	-38,5902	-3,5727	2,59
50	GEO0330	-38,5575	-3,5838	1,91
51	Geomar XVIII 14	-38,6425	-3,2858	0,00
52	Geomar XVIII 19	-39,0333	-3,0511	0,53
53	Geomar XVIII 137	-39,2517	-2,8833	0,00
54	Geomar XVIII 146	-38,8856	-3,2186	1,66
55	Geomar XVIII 155	-38,8014	-3,2847	0,00
56	Geomar XVIII 158	-38,7683	-3,2175	0,00
57	Geomar XVIII 159	-38,6853	-3,3342	0,00
58	Geomar XVIII 161	-38,5525	-3,2506	0,00
59	GEO0155	-39,301	-3,151	0,75
60	GEO0158	-39,389	-3,106	0,90
61	GEO0161	-39,488	-3,067	0,10
62	GEO0164	-39,571	-3,008	0,18
63	GEO0167	-39,634	-2,933	0,79
64	GEO0170	-39,688	-2,853	0,00
65	GEO0173	-39,755	-2,783	0,25
66	GEO0176	-39,838	-2,724	0,00
67	GEO0177	-39,868	-2,705	1,04
68	GEO0180	-39,950	-2,652	0,02
69	GEO0277	-39,940	-2,560	0,00
70	GEO0280	-39,852	-2,590	0,00
71	GEO0282	-39,793	-2,635	0,00
72	GEO0283	-39,771	-2,655	0,00
73	GEO0284	-39,743	-2,675	0,00
74	GEO0286	-39,722	-2,700	0,00
75	GEO0288	-39,642	-2,759	0,00
76	GEO0292	-39,538	-2,842	0,00
77	GEO0295	-39,467	-2,917	0,00
78	GEO0298	-39,389	-2,976	0,49
79	GEO0299	-39,360	-3,002	0,283

80	GEO0300	-39,334	-3,019	1,009
81	GEO0301	-39,303	-3,025	0,45
82	Geomar XVIII 42	-39,488	-2,838	0,00
83	Geomar XVIII 43	-39,455	-2,850	0,00
84	Geomar XVIII 44	-39,369	-2,905	0,44
85	Geomar XVIII 133	-39,351	-2,802	0,97
86	Geomar XVIII 175	-39,537	-2,655	0,00
87	Geomar XVIII 111	-39,735	-2,451	0,00
88	Remac3699	-39,933	-2,333	0,00
89	GEO0182	-40,017	-2,639	0,03
90	GEO0185	-40,110	-2,635	0,02
91	GEO0186	-40,152	-2,634	0,01
92	GEO0187	-40,185	-2,625	0,12
93	GEO0188	-40,217	-2,623	0,05
94	GEO0191	-40,318	-2,618	0,10
95	GEO0194	-40,418	-2,640	0,03
96	GEO0196	-40,475	-2,673	0,06
97	GEO0197	-40,503	-2,686	0,02
98	GEO0198	-40,538	-2,700	0,23
99	GEO0199	-40,570	-2,717	0,40
100	GEO0200	-40,601	-2,725	0,17
101	GEO0201	-40,633	-2,738	0,43
102	GEO0202	-40,667	-2,752	0,26
103	GEO0224	-40,521	-2,618	0,05
104	GEO0259	-40,640	-2,576	0,42
105	GEO0260	-40,505	-2,522	0,00
106	GEO0261	-40,460	-2,507	0,00
107	GEO0263	-40,400	-2,493	0,03
108	GEO0266	-40,300	-2,502	0,09
109	GEO0270	-40,167	-2,508	0,80
110	GEO0274	-40,037	-2,535	0,03
111	GEO0275	-40,002	-2,542	0,00
112	Geomar XVIII 97	-40,050	-2,400	0,05
113	Geomar XVIII 98	-40,034	-2,301	0,00
114	Geomar XVIII 31	-40,202	-2,336	0,00
115	Geomar XVIII 32	-40,352	-2,338	0,55
116	Geomar XVIII 33	-40,518	-2,333	0,68

117	Geomar XVIII 35	-40,619	-2,401	0,32
118	Geomar XVIII 74	-40,534	-2,485	0,00
119	CE 004	-41,3154	-2,6137	0,14
120	CE 024	-41,3021	-2,7994	0,22
121	CE 034	-41,2991	-2,6320	0,44
122	CE 053	-41,2822	-2,4990	0,75
123	CE 074	-41,2821	-2,8497	2,70
124	CE 088	-41,2659	-2,6655	0,00
125	CE 108	-41,2493	-2,3804	0,40
126	CE 119	-41,2491	-2,5645	0,45
127	CE 127	-41,2492	-2,6985	0,49
128	CE 140A	-41,2327	-2,8329	1,62
129	CE 174	-41,2158	-2,4654	0,00
130	CE 183	-41,2148	-2,5981	0,12
131	CE 196A	-41,2145	-2,8162	0,81
132	CE 214	-41,1992	-2,6324	0,13
133	CE 290	-41,1657	-2,3978	0,06
134	CE 369	-41,1156	-2,5981	0,22
135	CE 375	-41,1155	-2,6985	0,02
136	CE 419	-41,0981	-2,3138	0,41
137	CE 437	-41,0821	-2,5152	0,19
138	CE 447	-41,0817	-2,6821	1,10
139	CE 484	-41,0659	-2,4486	0,40
140	CE 512	-41,0486	-2,7022	0,40
141	GEO0218	-40,703	-2,705	1,45
142	GEO0240	-40,833	-2,587	0,46
143	GEO0248	-40,986	-2,725	1,99
144	GEO0254	-40,800	-2,650	0,37
145	GEO0209	-40,839	-2,838	1,41
146	GEO0210	-40,886	-2,823	0,81
147	GEO0252	-40,857	-2,673	0,00

ANEXOS – COMPROVANTES DE ACEITE/SUBMISSÃO DOS ARTIGOS

Ofc. revgeoc 8789

Rio Claro, 03 de Novembro de 2014

Sr. Antonio Borges Aguiar Neto

Prezado Pesquisador:

Informamos que o artigo “**Pláceres Marinhos entre Caucaia e Trairi, Ceará, Nordeste do Brasil**”, de sua autoria, George Satander Sá Freire e de Narelle Maia Almeida, foi aceito para publicação na Revista Geociências conforme a disponibilização de trabalhos nos números programados para publicação.

Atenciosamente,



Marcos Aurélio Farias de Oliveira

Caros autores,

Confirmando o recebimento do manuscrito “Distribuição de minerais pesados ao longo da Plataforma Continental oeste do Ceará, Nordeste do Brasil”, submetido para avaliação e publicação em nossa revista.

Seu manuscrito foi recebido em 23/12/14 e está na fase de avaliação 1, ou seja, ainda no início do processo de triagem.

A editora responsável é a Profa. Ana Maria P. Mizusaki, que entrará em contato contigo quando pertinente.

Att.

Prof. Paulo Alves de Souza

Pesquisas em Geociências

Editor Chefe

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Bento Gonçalves, 9500

91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil

55.51.3308.7386

www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br

Antonio Borges Aguiar Neto,

Agradecemos a submissão do trabalho "Proveniência dos Pláceres Marinhos entre Caucaia e Trairi, Ceará, Nordeste do Brasil" para a revista Geologia USP. Série Científica.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://submission.ppegeo.igc.usp.br/index.php/guspssc/author/submission/245>

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Nanci Iurico Assakura
Geologia USP. Série Científica

Geologia USP. Série Científica
<http://submission.ppegeo.igc.usp.br/index.php/guspssc>