

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**MARCELO DE OLIVEIRA SOARES**

**Geobiologia do Atol Das Rocas, Atlântico Sul Equatorial**

**ORIENTADORA – Prof. Dra. Valesca Lemos Brasil  
COORIENTADOR – Prof. Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi**

Porto Alegre – 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**GEOBIOLOGIA DO ATOL DAS ROCAS, ATLÂNTICO SUL  
EQUATORIAL**

**MARCELO DE OLIVEIRA SOARES**

ORIENTADOR – Prof. Dra. Valesca Lemos Brasil  
COORIENTADOR – Prof. Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Fernanda Duarte Amaral – Departamento de Biologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Iran Carlos Stallivierre Corrêa – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Luis José Tomazelli – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre – 2009

Soares, Marcelo de Oliveira  
Geobiologia do Atol das Rocas (Atlântico Sul  
Equatorial). / Marcelo de Oliveira Soares –  
Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2009. [260f.] il.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências.  
Programa de Pós-Graduação em Geociências.  
Porto Alegre, RS – BR, 2009.

1. Geobiologia 2. Recifes 3. Geologia  
Histórica  
I. Título

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências – UFRGS  
Renata Cristina Grun CRB 10/113

*Ao naturalista  
Charles Darwin nos 200 anos de seu nascimento e  
150 anos da primeira edição de “Origem das  
Espécies”, pois suas idéias de evolução e geologia  
de recifes influenciaram profundamente esta tese.*

## AGRADECIMENTOS

---

- Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS e ao auxílio financeiro concedido pelo CNPq. A PETROBRAS e Fundação SOS Mata Atlântica pelo investimento na pesquisa no Atol das Rocas. A FAB (Força Aérea Brasileira) pela obtenção de imagens aéreas inéditas do Atol durante os trabalhos de campo.
- À coordenação, aos Docentes e Funcionários do Curso de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS.
- Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Geociências (Cristina, Ana, Juliane, Larissa, Cláudia, Guilherme, Daniel Fortier, Felipe Pinheiro, Ana Emília e Rodrigo) pelos bons momentos vividos nos laboratórios e aulas de campo.
- Aos servidores públicos da Secretária da Pós-Graduação pelo apoio que sempre recebi das pessoas que lá exercem sua função com dedicação e plenitude.
- Aos Servidores da UFRGS, Luiz Flávio e Protásio V. Paim pela ajuda na consulta da coleção paleontológica e nos trabalhos de fotografia da qualificação.
- Ao Setor de Laminação da UFRN pela confecção das lâminas petrográficas.
- A professora Dra. Helena Matthews-Cascon da UFC pelo empréstimo de material de mergulho autônomo (SCUBA) e equipamento de fotografia subaquática. Agradeço também por ter me dado uma edição rara do livro “*Structure and Distribution of Coral Reefs*” de Charles Darwin.

Em especial,

- A professora Dra. Valesca Brasil Lemos pela orientação, auxílio, amizade e possibilidade de discutir idéias livremente durante o doutorado no Laboratório de Conodontes e Foraminíferos da UFRGS.
- Ao Doutor Ruy Kenji Papa de Kikuchi da UFBA pelos ensinamentos e incentivo na pesquisa sobre os corais, recifes e por me receber nos Laboratórios de Estudos Costeiros e de Recifes de Corais na bela cidade de Salvador.

- A Prof. Marcela Marques da UFRN pelo auxílio na confecção das lâminas e participação em alguns dos artigos aqui apresentados.
- Aos Profs. Paulo Alves de Souza, Elírio Toldo Júnior e Luis Tomazelli pelas valiosas considerações feitas durante o exame de qualificação.
- Aos Profs. Iran Stalliviere, Fernanda Duarte e Luis Tomazelli por terem participado da banca de doutorado e terem contribuído na melhoria da qualidade da tese.
- Ao Professor Luiz Fernando de Ros, do Instituto de Geociências da UFRGS, pelo empréstimo do microscópio e equipamento fotográfico para confecção das imagens das lâminas petrográficas.
- Aos biólogos Carolina Cerqueira, Carlos Augusto e Janaína Azevedo, da UFC, pelo auxílio taxonômico em espécimes de peixes, moluscos e foraminíferos os quais tinham identificação duvidosa.
- Aos profissionais do ICMBIO, especialmente à Maurizélia Brito (Zelinha), pela ajuda nas coletas e pelos ensinamentos sobre o “último paraíso do Atlântico Sul Equatorial”. O seu trabalho de conservação do Atol merece todos os elogios.
- Aos colegas Felipe e Carlos pela temporada de 2 meses de “No limite” junto aos tubarões, fantasmas e mergulhos alucinantes no Atol.
- A Sara, Cassiane e Cris, do Laboratório de Microfosséis e Conodontes da UFRGS, que sempre de bom humor trazem alegria, profissionalismo todos os dias e pelo auxílio nas fotografias de microscopia eletrônica e composição das imagens.
- A minha noiva Michella de Albuquerque que sempre me apoiou, ajudou e me aturou nos últimos 4 anos (graduação, mestrado e doutorado). Muito devo a ela.....
- A Bruna que sem muitas palavras...sempre me ensinou muito.
- Especialmente à bela família que possuo (Fátima, Braga, Leo e Ana Carolina) por serem a minha “Fortaleza”.

*“Um homem se humilha, se castram o seu sonho  
Seu sonho é sua vida e a vida é o trabalho  
Sem o seu trabalho o homem não tem honra...”*

Gonzaguinha

## RESUMO

---

Esta tese aborda a geobiologia do único Atol do Oceano Atlântico Sul. Diferentes classificações foram realizadas para o complexo recifal de Rocas ao longo dos séculos XIX e XX, as quais são avaliadas historicamente. Análises biogeomorfológicas e de mapeamento das unidades recifais foram realizadas no Atol das Rocas para a compreensão da dinâmica sedimentar e do relevo deste recife oceânico. Os diferentes compartimentos recifais são afetados por processos biogeomorfológicos como controle de processos erosivos, bioproteção, bioerosão recifal, bioturbação, cimentação de areia carbonática biogênica, produção de sedimentos biodetríticos e bioconstrução (principalmente de algas calcáreas, corais, vermetídeos e foraminíferos). Organismos diversos incluindo aves, peixes, tartarugas, corais, zoantídeos, algas, moluscos, poliquetas, sipunculídeos, foraminíferos e microorganismos agem nos diferentes grupos de processos biogeomorfológicos gerando as características únicas do Atol. O recife oceânico se desenvolveu provavelmente nos últimos 7000 anos do Período Neógeno. A paleohidrodinâmica da corrente oceânica, variações no gradiente de energia no lado a barlavento e sotavento e, sobretudo, as oscilações eustáticas holocênicas foram preponderantes na evolução recifal. Em níveis de mar alto uma grande laguna composta por comunidades bentônicas se formou com grande diversidade biológica. Eventos regressivos e de erosão por ação de ondas e correntes levou as feições observadas atualmente, tais como o ambiente lagunar raso (<6m profundidade), de um amplo depósito arenoso e das ilhas à sotavento. A dinâmica temporal e espacial de sete comunidades principais de ambientes submersos, intertidais e emersos é demonstrada pela primeira vez.

**Palavras-chave:** História Ecológica, Atol, Atlântico, Geologia, Paleobiologia.

## ABSTRACT

---

This thesis approaches the geobiology of the only Atoll in the South Atlantic Ocean. Different classifications were made for Rocas Reef Complex along the nineteenth and twentieth century, which are evaluated historically. Biogeomorphological analysis and mapping of the reef units were done on the Rocas Atoll for the comprehension of the sedimentary dynamic and of the relief of this oceanic reef. The different reef compartments are affected by biogeomorphological processes such as erosive process control, bioprotection, bioerosion, bioturbation, cementing of the biogenic carbonate sand, production of biodetritic sediments and bioconstruction (especially of calcareous algae, vermetids, corals and foraminifers). Different organisms including birds, fishes, turtles, corals, zoanthids, algae, mollusks, polychaets, sipunculids, foraminifers and microorganisms act in the different groups of biogeomorphological processes generating the unique characteristics of the Atoll. The oceanic reef developed over the past 7000 years in the Neogene Period. The paleohydrodynamic of the oceanic current, variations of the gradient of energy on the leeward/windward side and, above all, the eustatic holocenic oscillations were predominant in the reef evolution. In high sea levels a lagoon composed by benthic communities formed with great biological diversity. The regression and erosion by waves and currents led to the formation of shallow lagoon environment, extensive sandy deposit and the Islands in leeward side. The temporal and spatial dynamic of seven main communities of underwater, intertidal and emerged environments is shown for the first time.

**Keywords:** Ecological History, Atoll, Atlantic, Geology, Paleobiology.

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

---

**FIGURA 01.** Áreas de conhecimento da Geobiologia. Modificado de Naylor (2005).

**TABELA 01.** Tipos de organismos bioerosivos. Modificado de Warme (1975) e Verde (2007).

**FIGURA 02.** Modelo tafonômico de recifes de corais em relação à entrada de nutrientes, turbidez e sedimentação.

**FIGURA 03.** Bioconstrução carbonática de algas calcáreas na piscina do Salãozinho, Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

**FIGURA 04.** Bioconstrução de Poliquetas sabellarídeos (zonas de tonalidade marrom) sobre *beach rocks* de intermarés em um trecho do litoral tropical brasileiro.

**FIGURA 05.** Interação entre diferentes processos biogeomorfológicos em um recife coralíneo. Modificado de Naylor *et al.* (2002).

**FIGURA 06.** Imagem aérea dos dois maiores recifes de barreira recentes. A) Grande Barreira da Austrália, Oceania (McDonald & Smallcombe, 2009); B) Grande Barreira de Belize, Caribe (Johnston, 2009).

**FIGURA 07.** Modelo teórico de desenvolvimento dos recifes de coral segundo Darwin (1842).

**FIGURA 08.** Atóis do Atlântico.

**FIGURA 09.** Atóis do oceano Indo-Pacífico e exemplos de atóis com classificação diferenciada.

**FIGURA 10.** Atol da região das Maldivas mostrando a morfologia do recife: Laguna profunda (>30m), Ilha arenosa a sotavento, Recifes em zona rasa (0-5m), Oceano Indo-Pacífico Adjacente. Modificado da Imagem da NASA obtida do software *free* Google Earth 4.0.

**FIGURA 11.** Diagrama hipotético da evolução de um atol (modificado de Wiens, 1962).

**FIGURA 12.** Representação esquemática do “*Darwin Point*” (modificado de Flood, 2001).

**FIGURA 13.** Mapa de localização do Atol das Rocas e a delimitação da reserva biológica (isóbata de 1000m). Modificado de Kikuchi & Leão (1997).

**FIGURA 14.** Região oceânica adjacente ao Nordeste brasileiro: situação do Arquipélago de São Pedro e São Paulo na Zona de Fratura São Paulo; Atol das Rocas e Arquipélago de Fernando de Noronha, na extremidade da Zona de Fratura Fernando de Noronha. 1. Limite de zonas de fratura; 2. Rochas magmáticas. Modificado de Almeida (2006).

**FIGURA 15.** Mapa fotointerpretado do Atol das Rocas segundo Leão (1990).

**FIGURA 16.** Veleiro “Borandá” (último no píer) utilizado para a expedição oceanográfica ao Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial no período janeiro-fevereiro de 2008.

**FIGURA 17.** Estação de pesquisa da Reserva Biológica do Atol das Rocas, Atlântico Sul Ocidental situada na ilha do Farol.

**FIGURA 18.** Bote inflável (aproximadamente 3 metros de comprimento) com motor auxiliar (à direita) usado para trazer o equipamento, mantimentos e possibilitar locomoção nas porções interna e externa do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

**FIGURA 19.** Uso de mergulho livre (apnéia) para obtenção das amostras geológicas do recife e dos sedimentos em baixas profundidades (0 - 5m) no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

**FIGURA 20.** Uso do mergulho autônomo (SCUBA) para documentação fotográfica e obtenção de amostras em profundidades maiores (5-20m) no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

**FIGURA 21.** Áreas de coleta de dados no Atol das Rocas. Observa-se feições geológicas identificadas e o aspecto elipsóide.

**FIGURA 22.** Aerofotografia do Atol das Rocas (NE, Brasil) mostrando a Zona onde ocorrem Resíduos de Recifes (Paleorecife), piscinas, recifes em mancha, a ilha do Farol a sotavento e o maior canal que liga a área interna do Atol à zona adjacente do Oceano Atlântico.

**TABELA 02.** Áreas de amostragens de datações no calcarenito da ilha do Cemitério do Atol das Rocas (Atlântico Sul).

**FIGURA 23.** Hipótese de sucessão dos ambientes recifais no intervalo Pleistoceno / Holoceno.

**FIGURA 24.** Modelo esquemático da evolução do Recife do Atol das Rocas baseado nas oscilações eustáticas e na subsidência.

**TABELA 03.** Parâmetros morfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul. Dados para Indo-Pacífico e Caribe segundo Stoddart (1965)\*.

**FIGURA 25.** Interação entre diferentes processos biogeomorfológicos no recife do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial). Modificado de Soares *et al.* (submetido).

**FIGURA 26.** Foraminífero *Amphistegina lessoni* de amostra de topo do paleorecife do Atol das Rocas (Pedra do Garapirá).

**TABELA 04.** Dados de amostragens de datações no calcarenito da ilha do Cemitério do Atol das Rocas (Atlântico Sul).

**FIGURA 27.** Principais fatores estruturantes da construção recifal do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

**FIGURA 28.** Modelo de variações do sistema carbonático do Atol das Rocas no Holoceno baseado nas oscilações eustáticas e nos tratos de sistemas.

**FIGURA 29.** Sucessão ecológica da bioconstrução recifal no ambiente marinho do Atol das Rocas ao longo do Holoceno.

**FIGURA 30.** Modelo de sedimentação carbonática bioclástica no Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

**FIGURA 31.** Representação esquemática das fases de desenvolvimento dos *Beachrocks* do Atol das Rocas (Atlântico Sul).

**FIGURA 32.** Perfil esquemático da sedimentação no Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

**FIGURA 33.** Foraminíferos bentônicos sedimentares e assinaturas tafonômicas indicadoras de retrabalhamento sedimentar e alta energia ambiental do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial) analisados no MEV (Microscopia eletrônica de varredura).

**FIGURA 34.** Modelo de sucessão ecológica nas ilhas arenosas do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

**FIGURA 35.** Desenvolvimento dos sistemas biológicos e geológicos do Atol das Rocas ao longo de sua História Natural baseado em um modelo cibernético.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AP	- antes do Presente (1950 é considerado o “Presente” devido às explosões nucleares que afetaram o balanço de carbono radioativo pré-estabelecido na atmosfera)
CE	- Ceará
cm	- centímetros
E	- Leste
ESE	- Leste-sudeste
FAB	- Força Aérea Brasileira
FIG	- Figura
IBAMA	- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis
ICMBIO	- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
ka	- 1000 anos
Km	- quilômetro
LINCE	- Laboratório de Invertebrados Marinhos
m	- metros
mm	- milímetro
N	- Norte
NASA	- Agência Espacial Norte-Americana
NE	- Nordeste
NNE	- norte-nordeste
RN	- Rio Grande do Norte
S	- Sul
SCUBA	- Self-Contained Underwater Breathing Apparatus (Dispositivo para respiração subaquática autocontido).
SE	- Sudeste
SSE	-sul-sudeste
t	- teste t student para comparação de médias
TAB	- Tabela
UFBA	- Universidade Federal da Bahia
UFC	- Universidade Federal do Ceará
UFRGS	- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRN	- Universidade Federal do Rio Grande do Norte
W	- Oeste
WSW	- sul-sudoeste
$\chi^2$	- teste do Qui-quadrado
$\alpha$	- Nível de significância

# SUMÁRIO

<b>Texto explicativo da tese</b>	
<b>1. Introdução</b>	
1.1. Geobiologia	24
1.2. Características dos recifes carbonáticos	31
1.3. Atóis	34
1.4. Objetivos	41
1.5. Hipóteses	42
1.6. Contexto geológico	43
1.7. Material e Métodos	48
1.7.1. Atividades logísticas da expedição científica	48
1.7.2. Atividades gerais do trabalho de campo	51
1.7.3. Obtenção das amostras	53
1.7.4. Descrição das amostras	56
1.7.4.1. Descrição macroscópica	56
1.7.4.2. Descrição microscópica	56
1.7.4.3. Seleção e preparação das amostras recifais e sedimentares	57
1.7.4.4. Petrografia	57
1.7.6. Metodologia de análise de dados	58
1.7.6.1. Datação radiométrica	58
1.7.6.2. Morfologia numérica do Atol das Rocas	59
<b>2. Artigos</b>	
2.1. “Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: Considerações sobre a classificação do recife biogênico” – <i>Revista Brasileira de Geociências</i>	62
2.2. “Aspectos Biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial” – <i>Revista Brasileira de Geociências</i>	75
2.3. “Holocene sea-level history and paleoecology on the Rocas Atoll, Northeastern South Atlantic” – <i>Palaios</i>	109
<b>3. Considerações finais</b>	140
<b>4. Anexos</b>	161
4.1. Confirmação de artigo publicado	
“Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: Considerações sobre	162

a classificação do recife biogênico” – <i>Revista Brasileira de Geociências</i>	
4.2. Confirmação de envio dos artigos	163
“Aspectos Biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial” – <i>Revista Brasileira de Geociências</i>	163
“Holocene sea-level history and paleoecology on the Rocas Atoll, Northeastern South Atlantic” – <i>Palaios</i>	164
4.3. Artigos aceitos	
“Sedimentos carbonáticos bioclásticos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial” – <i>Revista Brasileira de Geociências</i>	165
“Distribuição Espacial de Vermetídeos bioconstrutores (Mollusca: Gastropoda) no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial” – <i>Boletim Paraense Museu Emílio Goeldi, Edição Especial</i>	188
4.4. Licença científica expedida pelo IBAMA para pesquisa em Reserva Biológica (REBIO).	201
4.5. Análises das lâminas petrográficas	203
4.5.1. Amostras da base do paleorecife	204
4.5.2. Amostras em uma porção mediana do Paleorecife	212
4.5.3. Amostras do topo do paleorecife	217
4.5.4. Amostras do calcarenito	226
4.6. Tábua de marés durante as coletas (Tábua de Fernando de Noronha – Janeiro/Fevereiro de 2008)	233
4.6.1. Janeiro	233
4.6.2. Fevereiro	237
4.7. Dados oceanográficos selecionados (Bóias do Programa Pirate – GOOS Brasil)	240
4.7.1. 0° N 23° W	240
4.7.2. 0° N 35° W	247
<b>5. Bibliografia</b>	<b>253</b>

## TEXTO EXPLICATIVO DA ESTRUTURA DA TESE

---

*“Ali pude estudar o sistema madrepórico de que se originam as ilhas daquele oceano.....as madréporas são revestidas por crosta calcária. São os seus depósitos calcários que se convertem em rochedos, recifes, ilhotas, ilhas. Ora formam anel circular, tingindo uma laguna que se comunica com o mar por alguma brecha..... constroem recifes rendilhados, altas muralhas a pique, na proximidade das quais o oceano atinge profundidade excepcionais.....”.*

Júlio Verne, *Vinte mil léguas submarinas* de 1870.

O documento aqui apresentado, obrigatório para a obtenção do título de Doutor em Ciências junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (Área de Concentração em Paleontologia) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEO-UFRGS), foi elaborado de acordo com 2 aspectos fundamentais da legislação pertinente. A resolução nº 093/2007, da Câmara de Pós-Graduação, a qual normatiza a apresentação de teses na forma de artigos publicados e/ou submetidos pelo estudante em periódicos científicos, sendo aqui sintetizados os procedimentos utilizados na estruturação do **Documento Final** submetido à avaliação. As “Normas para Apresentação de Teses de Doutorado em Forma de Artigos”, de 12 de março de 2008, do PPGEO-UFRGS foram utilizadas para a formatação adequada, tendo em vista a necessidade mínima de submissão de **3 artigos** como autor principal.

Constam desse documento um **Resumo** e um **Abstract** que sintetizam os objetivos e resultados obtidos com o desenvolvimento do projeto de pesquisa. A **Introdução** (capítulo 1) corresponde a uma compilação de dados sobre o tema de estudo e aspectos da metodologia científica utilizada, incluindo os seguintes itens: **Geobiologia, Características dos Recifes Carbonáticos, Atóis, Objetivos, Hipóteses, Contexto geológico, e Material e Métodos.**

O corpo principal da tese é composto pelo capítulo 2, onde são apresentados os artigos feitos durante a realização do doutorado, nos quais o doutorando é primeiro autor.

Artigo 1 - Soares *et al.* (publicado) - *Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: Considerações sobre a classificação do recife biogênico.*

Este artigo de revisão faz um histórico e discute a classificação polêmica deste recife desenvolvido sobre montes vulcânicos no Oceano Atlântico Sul Equatorial. Apresenta as vantagens e desvantagens de métodos baseados em características morfológicas, sem considerar a gênese dos compartimentos e das estruturas geológicas.

Artigo 2 – Soares *et al.* (submetido) - *Aspectos Biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.*

O segundo artigo submetido faz uma análise na emergente área da Geobiologia, onde é demonstrado como os diferentes organismos (animais marinhos e terrestres, algas, plantas terrestres e microorganismos) atuam na modificação dos compartimentos geoambientais e na formação do relevo deste recife oceânico.

Artigo 3 – Soares *et al.* (submetido) - *Holocene sea-level history and paleoecology on the Rocas Atoll, Northeastern South Atlantic.*

Para finalizar o capítulo 2 (corpo principal da tese) um trabalho inédito abordando a sucessão dos paleoambientes e das paleocomunidades do Atol das Rocas nos últimos 7000 anos de história deste recife. A hidrodinâmica da corrente oceânica, variações no gradiente de energia nos lados a barlavento e sotavento e, sobretudo, as oscilações eustáticas holocênicas foram preponderantes na evolução recifal. A dinâmica temporal e espacial de sete comunidades principais de ambientes submersos, entremarés e emersos é demonstrada pela primeira vez para este recife. Os indicadores e as variações do nível do mar neste recife oceânico também são discutidos neste artigo.

Por fim, são apresentadas as Considerações finais (capítulo 3), formuladas a partir dos objetivos inicialmente formulados e dos resultados atingidos com o desenvolvimento do projeto de tese. Destaque para os avanços obtidos face ao estado da arte do início do doutorado. A integração desses resultados possibilitou definir conclusões inéditas a respeito da Geobiologia do único Atol do Atlântico Sul, contribuindo na compreensão da dinâmica temporal e espacial dos recifes desenvolvidos nos oceanos tropicais.

Compõem o capítulo 4, referente aos Anexos, os comprovantes dos **artigos submetidos, publicados e aceitos**, durante o período do doutorado, para publicação em revistas científicas nacionais e internacionais com corpo editorial. Nesta seção da tese são

apresentados 2 artigos aceitos de temas correlatos ao corpo principal, por terem sido desenvolvidos durante o doutorado. Nos anexos encontram-se também análises das lâminas petrográficas do calcarenito e de amostras paleorecifais que forneceram importantes dados para Geobiologia, Paleoecologia e outros temas abordados nesta tese. Como dados complementares observam-se: Tábuas de marés utilizadas nas coletas e dados oceanográficos obtidos com as bóias do Programa PIRATE (Goos Brasil) em zonas do Atlântico Sul Equatorial próximas ao Atol das Rocas.

A Bibliografia (capítulo 5) está organizada por ordem alfabética no final deste documento e refere-se exclusivamente aos capítulos 1 e 3.

As listas de Figuras e Tabelas, referente aos capítulos 1 e 3, deste documento, estão inseridas nas páginas ix a xi. A lista de Símbolos e Abreviaturas na página xii.

## 1-INTRODUÇÃO

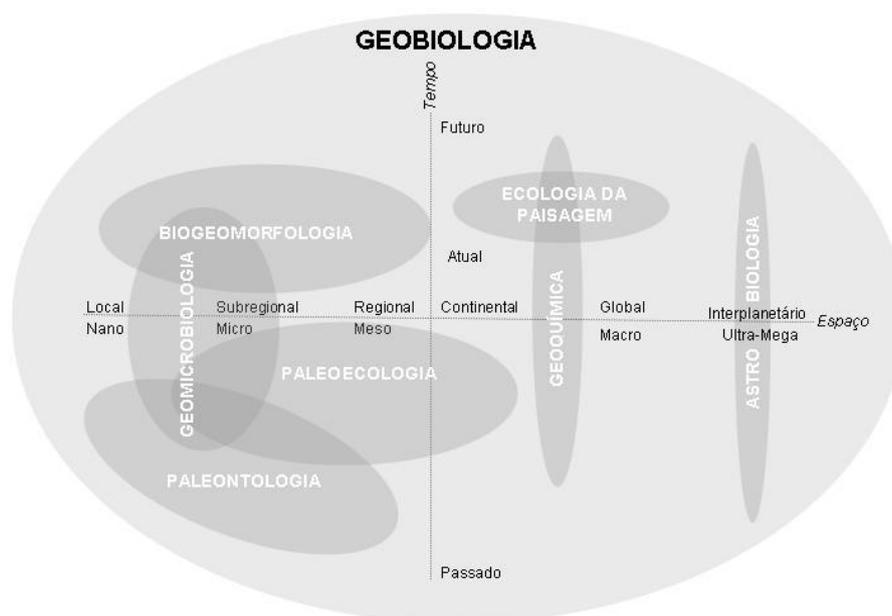


# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1. Geobiologia

A Geobiologia é baseada na premissa de que as atividades biológicas e geológicas são integradas, e que as complexas interações entre os sistemas bióticos e abióticos são variáveis nas escalas temporais e espaciais (PHILLIPS, 1995; SPENCER & VILES, 2002).

A Biogeomorfologia considera as relações entre os grupos de processos biológicos e geológicos e o relevo que resulta dessa interação (STALLINS, 2006). Essa abordagem é bastante importante, principalmente em recifes coralíneos onde os organismos contribuem na geomorfologia recifal através de processos bioerosivos e de bioconstrução. Assim, em muitos sistemas carbonáticos a relação entre as alterações do relevo e os processos biogeomorfológicos devem ser considerados. A Biogeomorfologia é um dos campos da Geobiologia, bem como a Paleontologia (FIG. 01).



**FIGURA 01.** Áreas de conhecimento da Geobiologia. Modificado de Naylor (2005).

Existem três processos biogeomorfológicos fundamentais para a compreensão de recifes coralíneos: a bioerosão, a bioproteção e a bioconstrução. Tais atividades são intimamente relacionadas à ecologia da biota recente e pretérita (STALLINS, 2006).

O termo Bioerosão tem sido usado na literatura para se referir as diferentes escalas e tipos de processos que culminam com a destruição e/ou remoção de material por ação orgânica (NAYLOR *ET AL.* 2002). Bioerosão é tipicamente descrito como um processo ativo ou passivo, mecânico e/ou químico de erosão por ação orgânica (NAYLOR, 2005).

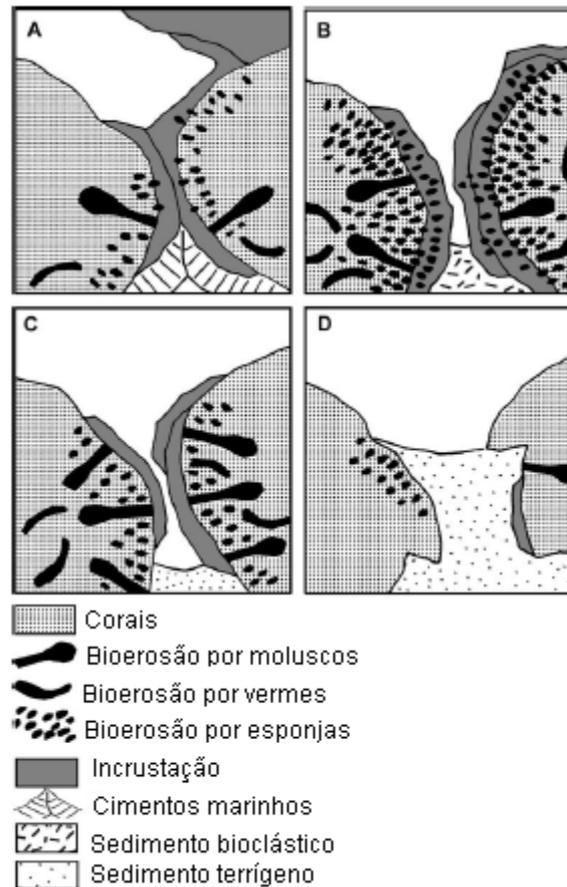
A Bioerosão em recifes varia nas escalas temporais e espaciais. Processos bioerosivos operam individualmente em baixas taxas, porém quando combinados produzem um forte efeito na modelagem do relevo recifal. A Bioerosão é feita por organismos que variam desde microorganismos (cianobactérias, bactérias e outros microorganismos), macrobentos que vivem junto aos corais (poliquetas e bivalves) e consumidores (peixes, equinóides e gastrópodes) que na sua atividade de alimentação removem parte do substrato (VERDE, 2007). Condições ambientais podem alterar as taxas de bioerosão como, por exemplo, a disponibilidade de água, abrigo e nutrientes que podem levar a uma mudança no habitat, propiciando os agentes serem endolíticos ou epilíticos (TAB.01).

**TABELA 01.** Tipos de organismos bioerosivos. Modificado de Warne (1975) e Verde (2007).

Epilíticos	Colonizam as superfícies externas das rochas.
Endolíticos	Colonizam o interior das rochas.
Chasmoendolíticos	Colonizam fissuras e fraturas nas rochas.
Criptoendolíticos	Colonizam cavidades estruturais dentro de rochas porosas, incluindo espaços produzidos e deixados vagos por euendolíticos.
Euendolíticos	Penetram ativamente no interior das rochas formando túneis que se conformam com as formas dos seus corpos. Organismos perfuradores ( <i>borings</i> ) de rochas.

Pode-se considerar a bioerosão como parte do desenvolvimento do recife, promovendo uma oferta de recursos sedimentares e, em alguns casos, promovendo aumento do crescimento de corais, da bioturbação e da diversidade dentro do recife (HUTCHINGS, 1986). As atividades bioerosivas de moluscos, esponjas, poliquetas e sipunculídeos podem ser alteradas devido a mudanças de fatores ambientais como os

padrões de sedimentação, turbidez da coluna d'água e entrada de nutrientes no sistema recifal (FIG. 02).



**FIGURA 02.** Modelo tafonômico de recifes de corais em relação à entrada de nutrientes, turbidez e sedimentação. (A) Em recifes de águas claras, incrustação e macroorganismos bioerosivos tendem a se manter em níveis baixos a moderados, permitindo a bioconstrução do arcabouço recifal. (B) Em condições de elevadas entradas de nutrientes, tanto a bioerosão quanto, até certo limite, a incrustação são intensificadas. A capacidade de bioconstrução recifal é diminuída ou perdida. (C) Se a turbidez da coluna d'água por ação de terrígenos prevalece sobre o acúmulo de sedimentos, a bioerosão pode ser intensificada, e a comunidade de macroorganismos bioerosivos é modificada (ex. da dominância de esponjas clionídeas passam a prevalecer os moluscos e os vermes). (D) Se a sedimentação de materiais terrígenos prevalece, ambas atividades bioerosivas e de incrustação são deprimidas. Assim, a capacidade de bioconstrução recifal é baixa ou inexistente devido à sedimentação (modificado de Sanders & Baron-Szabo, 2005).

A geração de sedimentos por bioerosão e outros processos geológicos pode aumentar um importante processo nas áreas sedimentares de um ambiente recifal: a bioturbação. O estudo das estruturas produzidas por organismos bioturbadores pode fornecer importantes dados para a caracterização de sedimentos, do fluxo de partículas e dos ambientes deposicionais. Muitos sedimentos incluem um biomanto que representa

uma camada superficial composta não só por organismos que recobrem e/ou modificam o solo através de efeitos bioquímicos, mas por táxons vegetais e animais que misturam o sedimento no fenômeno da bioturbação (FRIEDRICHS *ET AL.*, 2009).

Os sedimentos inconsolidados são uma expressão dos impactos cumulativos da biosfera nos processos de superfície. A interação entre geologia, clima, biota, topografia e tempo confere características únicas nos sedimentos e em seus respectivos ambientes deposicionais. Pesquisas dos efeitos biológicos nos sedimentos foram tradicionalmente concentradas nos aspectos bioquímicos, ecológicos e edáficos, entretanto a compreensão dos efeitos da bioturbação tem despertado um grande interesse ultimamente (PHILLIPS, 2009). Este efeito de perturbação do sedimento pela presença de indivíduos, conhecida como bioturbação, representa, talvez, a menor escala em que uma perturbação física pode operar (HALL, 1994).

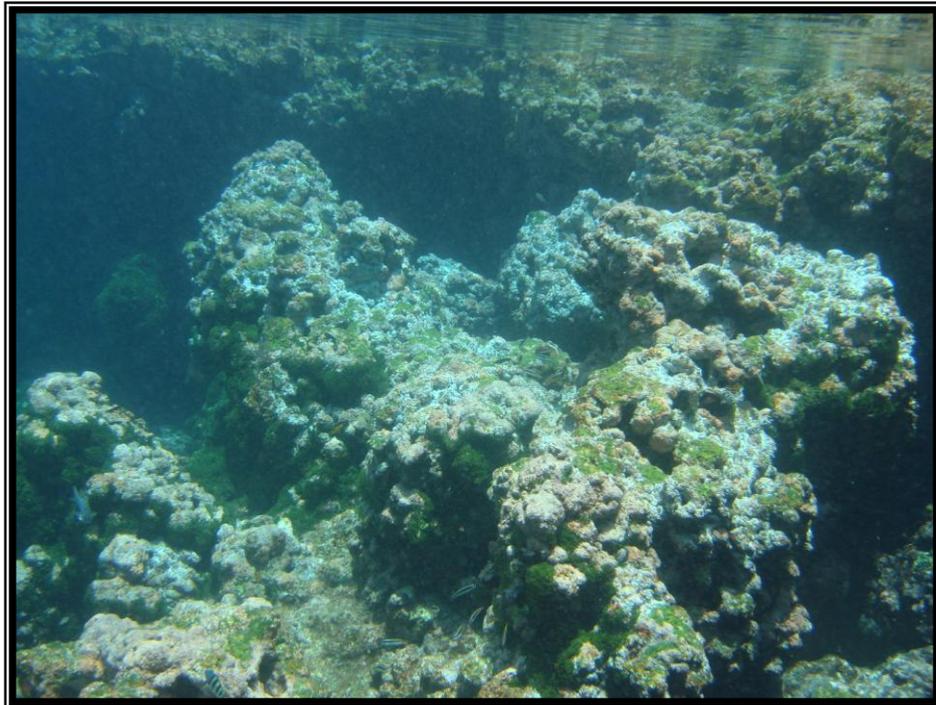
O termo bioproteção pode ser definido como um processo ativo ou passivo, com ações diretas ou indiretas dos organismos na prevenção ou redução da ação de qualquer outro processo geomorfológico. Bioprotetores podem ser animais, plantas e/ou microorganismos que aumentem o acréscimo e sedimentação, e /ou reduza a erosão. Em recifes, organismos que se fixam sobre as rochas reduzindo a ação de ondas, marés, ventos ou ação abrasiva das areias sobre a superfície de uma rocha, são considerados bioprotetores (NAYLOR *ET AL.*, 2002).

Bioconstrução pode ser definida como produção de depósitos sedimentares ou acumulações por processos orgânicos. Frequentemente este processo envolve influências orgânicas ativas e passivas (NAYLOR *ET AL.*, 2002).

Na bioconstrução ocorre a formação de filmes, encrustações, elevações topográficas ou recifes a partir de materiais que são produzidos internamente (exemplo: deposição de carbonato biogênico), retirados de outros materiais (exemplo: cimentação orgânica) ou desenvolvendo uma combinação dos dois métodos. Algumas bioconstruções são fenômenos de tempo curto (dias a semanas), devido a ciclos de crescimento não-linear ou padrões de decaimento, enquanto outras bioconstruções sofrem diagênese secundária e litificação. Há basicamente três maneiras de processos bioconstrutivos (NAYLOR *ET AL.*, 2002; SPENCER & VILES, 2002; NAYLOR, 2005):

- 1) Quando os próprios organismos produzem material biomineralizado, como a secreção de esqueletos carbonáticos por moluscos vermetídeos e em acumulação de algas calcárias (FIG. 03);

- 2) Quando os organismos acrescentam material por fixação química de matéria particulada, como exemplo os poliquetas sabelarídeos que constroem tubos com areia de praia através de produção de um cimento orgânico (FIG. 04);
- 3) Quando a cimentação inorgânica reúne materiais orgânicos como as tufas fluviais.



**FIGURA 03.** Bioconstrução carbonática de algas calcárias na piscina do Salãozinho, Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

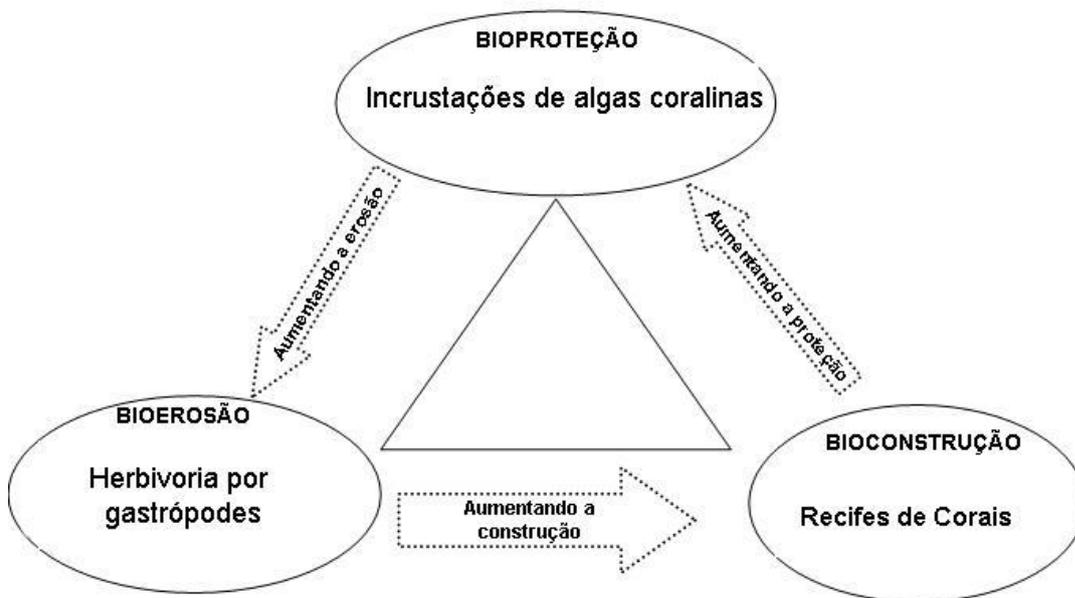


**FIGURA 04.** Bioconstrução de Poliquetas sabelarídeos (zonas de tonalidade marrom) sobre *beach rocks* de intermarés em um trecho do litoral tropical brasileiro. Imagem obtida na praia do Pecém, CE, Brasil.

Naylor *et al.* (2002) abordam alguns dos principais atributos que são característicos das bioconstruções produzidas ao longo do tempo geológico:

- 1) São bioacumulações que frequentemente aumentam, estabilizam ou cobrem a superfície de materiais que podem persistir durante períodos que variam de dias a milhares de séculos.
- 2) Comumente exibem uma grande variedade de formas ao longo de um estrato, desde formas grandes e massivas de vida longa (ex. recifes de corais) a formas pequenas de vida curta (ex. biofilmes).
- 3) Podem ser cíclicas e dinâmicas em seu desenvolvimento como resultado de seu funcionamento ecológico, mas continuam sendo bioconstruções.

Os processos de bioconstrução, bioerosão e bioproteção não são mutuamente exclusivos, sendo suas interações variadas, complexas e dinâmicas (FIG. 05). Esses processos são naturalmente interdependentes.



**FIGURA 05.** Interação entre diferentes processos biogeomorfológicos em um recife coralíneo. Modificado de Naylor *et al.* (2002).

Dentro de um ecossistema recifal coralíneo pode-se perceber a produção de esqueletos de carbonato de cálcio que forma a bioconstrução (o recife propriamente dito) (SPENCER & VILES, 2002; STANLEY JR. 2003). Uma grande quantidade de organismos ataca a estrutura através de processos ativos de bioerosão (envolvendo desde pequenos microorganismos a animais como peixes e moluscos), produzindo um suprimento de sedimento carbonático. O próprio recife possui mecanismos de proteção, como bioproteção, que retarda os processos erosivos. Biofilmes na superfície das rochas podem ter vários papéis na alteração da superfície recifal. Dentre os efeitos que os biofilmes produzem nas estruturas geológicas tem-se, segundo Naylor *et al.* (2002):

- 1) Aumento da erosão através de processos orgânicos ativos e passivos que potencializam a erosão química e física.
- 2) Transformações biogeoquímicas que produzem uma variedade de minerais secundários usados na bioconstrução.
- 3) Proteção da estrutura contra o intemperismo e a atividade erosiva.

## 1.2. Características dos Recifes Carbonáticos

Plataformas carbonáticas largas, plataformas isoladas, e atóis são sistemas dinâmicos que tanto geram quanto acumulam sedimentos. Tais sistemas carbonáticos são influenciados significativamente por variações eustáticas (regressão e transgressão), controle batimétrico e da subsidência. As taxas de acumulação são primariamente relacionadas à influência do nível do mar e a subsidência regional. As plataformas rasas e os atóis são diretamente controlados pelo nível do mar. O depósito carbonático em atóis também é influenciado pela tectônica e pela fácies sedimentares. Na sedimentologia carbonática teoriza-se que o nível do mar é um fator-chave na deposição devido à produção de carbonato e o espaço disponível para a sua acumulação (MCNEILL, 2005). Aissaoui *et al.* (1990) propõem que o acúmulo de carbonatos nas águas rasas dos oceanos Pacífico e Atlântico é controlado pela variação eustática.

Nas áreas tropicais encontram-se sistemas carbonáticos de alta importância nos ciclos biogeoquímicos, tanto no ambiente costeiro como no oceânico. Fenômenos de larga escala geológica como aquecimento, resfriamento e a tectônica de placas (convergência, divergência e colisão) são muito importantes nos processos geoquímicos e geológicos dos sistemas carbonáticos como: deposição de carbonato, erosão, transporte sedimentar, acumulação, litificação e diagênese dos carbonatos. O crescimento recifal é resultado de uma complexa interação entre bioconstrução recifal, destruição por impactos físicos e biológicos (ex., bioerosão e tempestades), acúmulo de detritos sedimentares e consolidação (ex., diagênese) (GISCHLER & HUDSON, 2004).

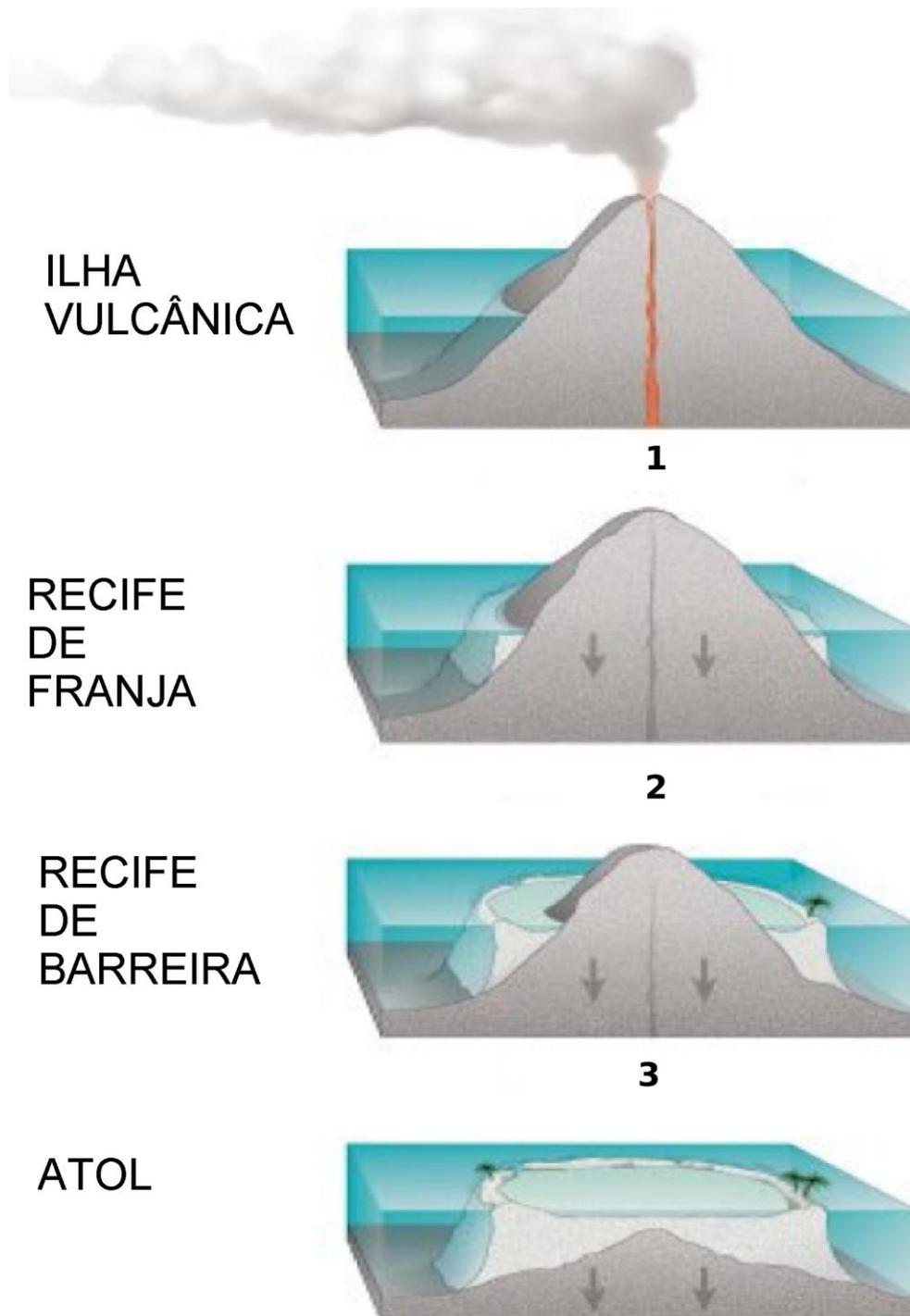
Variação do nível do mar e outras mudanças ambientais também influenciam os aspectos supramencionados dos sistemas carbonáticos. Recifes e ambientes rochosos costeiros experimentaram múltiplos ciclos de variação eustática de até 100m em intervalos de 100.000 anos. Essas variações influenciam o crescimento vertical e lateral dos corais e os processos de sedimentação e litificação carbonática. Esses processos geológicos geraram uma grande diversidade de feições geomorfológicas incluindo: recifes de franja, barreira (FIG. 06) e atóis; *beach rocks* de intermarés; eolianitos de supamaré; e terraços de recifes pleistocênicos (SPENCER & VILES, 2002). Não há um modelo unificado de desenvolvimento de recifes holocênicos, entretanto, três fatores predominantes são discutidos repetitivamente na literatura: topografia pretérita, variações do nível do mar e exposição às ondas e correntes (GISCHLER & HUDSON, 1998).



**FIGURA 06.** Imagem aérea dos dois maiores recifes de barreira recentes: A) Grande Barreira da Austrália, Oceania (MCDONALD & SMALLCOMBE, 2009); B) Grande Barreira de Belize, Caribe (JOHNSTON, 2009).

Os recifes podem se encontrar ao largo da zona costeira como os de franja e barreira, ou em ambiente oceânico como os atóis. Os recifes costeiros são os mais difundidos e seu crescimento depende da declividade do substrato marinho e das taxas de crescimento dos bioconstrutores, mas comumente se encontram acima dos 100 metros de profundidade em plataformas rasas (SCOFFIN & DIXON, 1983).

Darwin (1842) distinguiu três tipos de recifes no desenvolvimento de uma progressiva subsidência na seqüência de recifes de franja, de barreira e atóis (FIG. 07), sendo esses termos bem aceitos na terminologia geral.



**FIGURA 07.** Modelo teórico de desenvolvimento dos recifes de coral segundo Darwin (1842). A morfologia inicial seria uma ilha vulcânica (estágio 1) a qual sofreria um processo de subsidência passando gradualmente para recifes de franja (estágio 2), barreira (estágio 3) e o Atol que seria a morfologia final nesta seqüência evolutiva de recifes de corais. As setas indicam o fenômeno da subsidência. A coloração branca demonstra a estrutura carbonática recifal. A parte central do Atol seria a laguna profunda.

As idéias de Darwin (1842) acerca dos 3 estágios sucessivos na evolução recifal no Pacífico, das franjas recifais, passando pelas barreiras e finalmente aos atóis, tudo controlado pela isostasia, foram contestadas por Daly (1910) que propôs uma hipótese alternativa. Segundo esse autor, as mudanças eustáticas no nível do mar teriam sido as responsáveis pelo acréscimo e dissolução dos carbonatos que formam os recifes. Assim, ao longo do tempo geológico, elevações e declínios de alta frequência do nível do mar seriam as responsáveis pela evolução dos recifes. A primeira hipótese implica que o acrescimento carbonático nos atóis deveria ser espesso, com depósitos datando pelo menos do Terciário, e que a profundidade das lagunas seria uma evidência desse processo. De acordo com a segunda hipótese, a teoria do controle glacial, os recifes em geral (e os atóis em particular) deveriam ser apenas um estrato pleistocênico bastante fino, pois seu substrato não teria mudado de posição ao longo do desenvolvimento dos recifes. Pouco depois, os resultados dos testemunhos nos atóis do Pacífico provaram que as idéias de Darwin estavam corretas como um modelo geral de evolução recifal, porém ao mesmo tempo, verificou-se que a espessura quaternária dos recifes era reduzida e que as variações eustáticas tiveram um papel importante no desenvolvimento dos recifes.

Purdy & Winterer (2006) comentam que a teoria da subsidência é elegante e simples na explicação na associação genética entre os recifes de franja, de barreira e atóis, mas é baseada na premissa não comprovada de que a combinação do crescimento coralíneo e da subsidência pode produzir esta seqüência de tipos de recifes. Mais importante, ela ignora, segundo os mesmos autores, as flutuações do nível do mar controladas pela glacio-eustasia. Parte da transição suposta não é corroborada nos recifes das Maldivas onde a análise de subsuperfície demonstrou que os atóis não vieram de recifes de barreira.

### **1.3. Atóis**

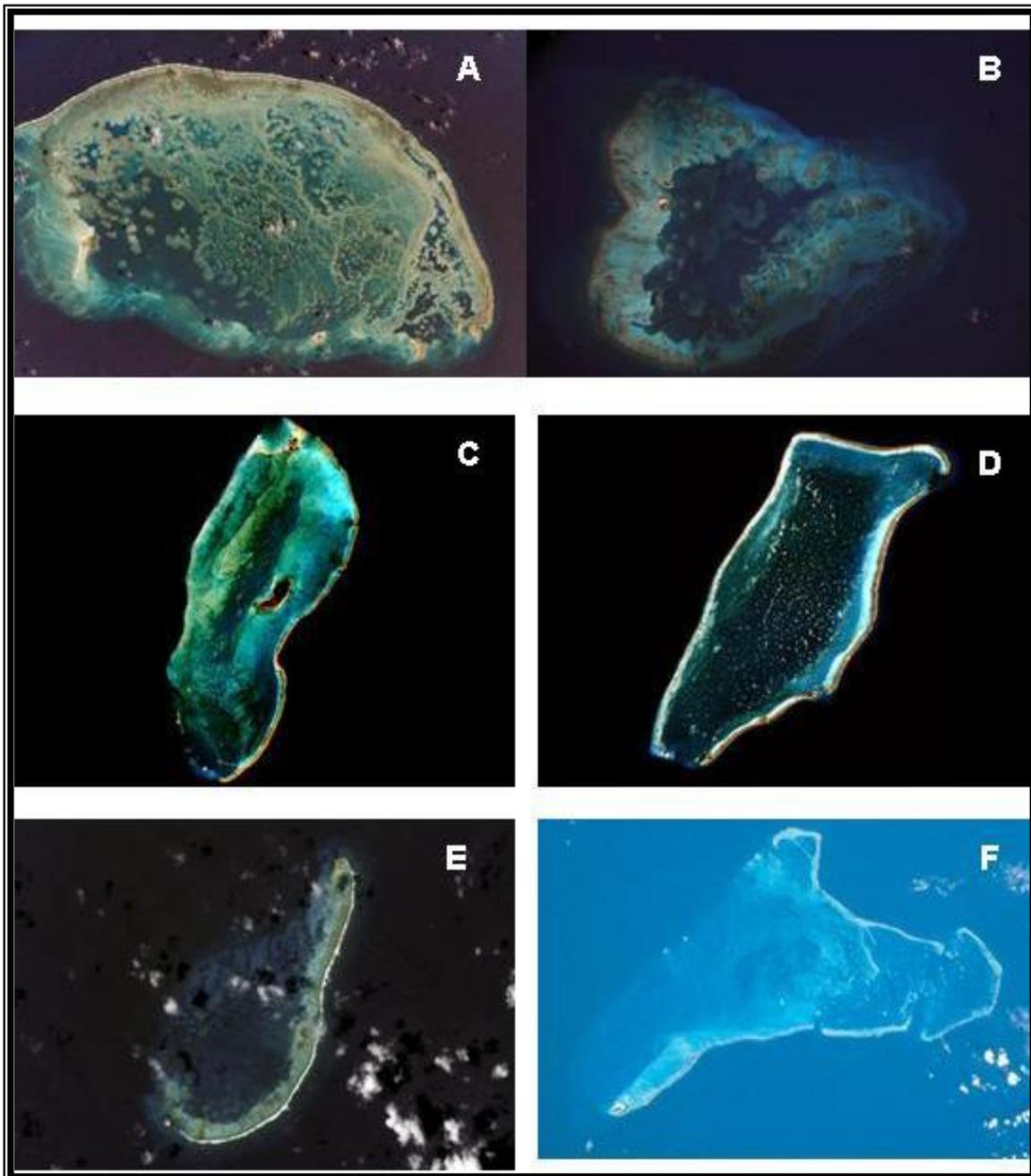
Desde os trabalhos geológicos de Darwin (1842), Dana (1853), Daly (1910), Davis (1920 e 1928), a morfologia clássica de um atol em formato circular, com a presença de pequenas ilhas ao redor de uma laguna central, se transformou em um relevo padrão nos trabalhos de geologia. As formas dos atóis têm sido descritas como ovais, elipsóides ou anulares, desde os tempos do naturalista Charles Darwin. A similaridade dos padrões morfológicos destes recifes tem sido usada como argumento

favorável a teorias de origem dos atóis, por exemplo, a subsidência das fundações vulcânicas (STODDART, 1965).

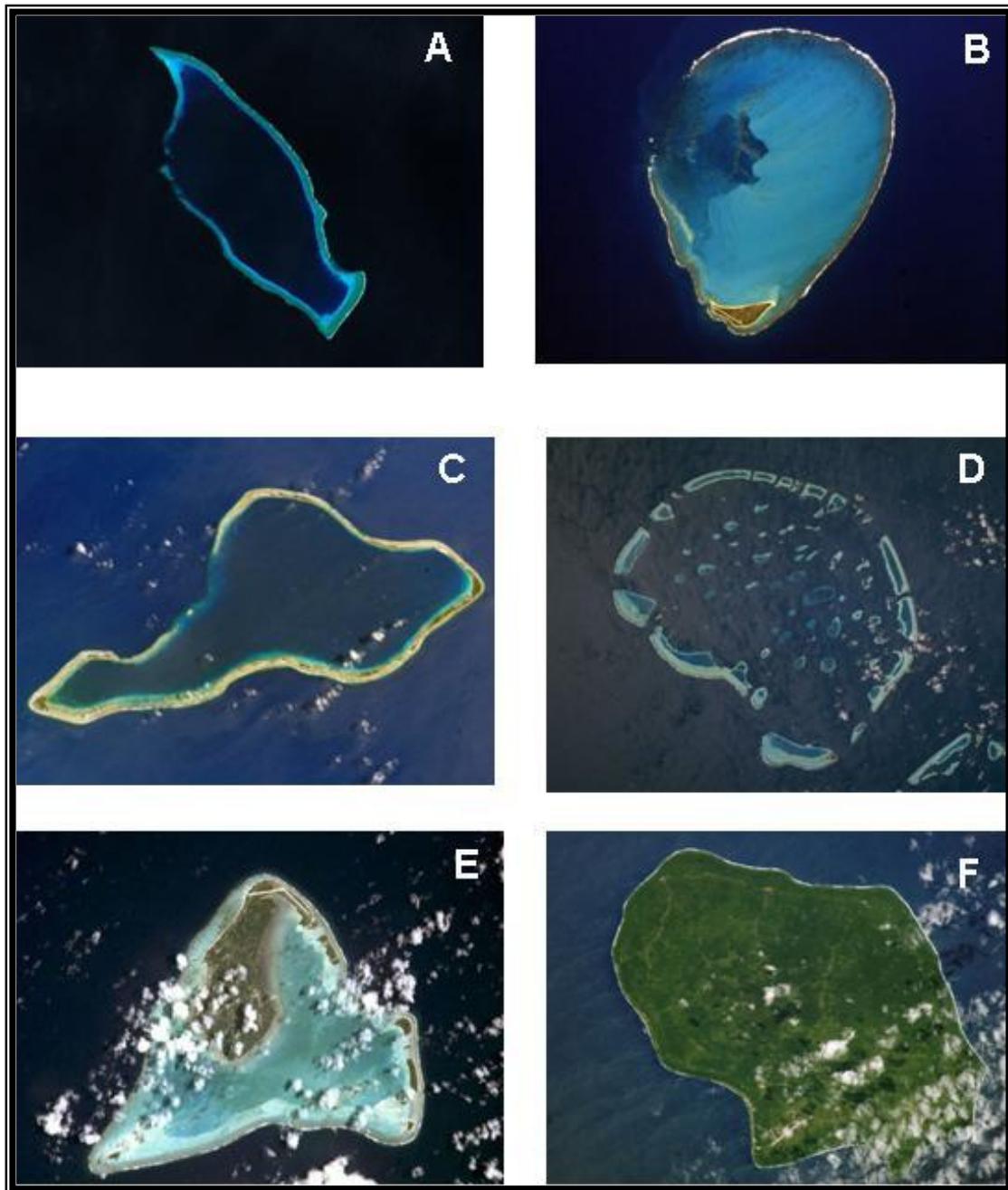
Considerando a evolução dos atóis baseada nos efeitos eustáticos e hidro-isostáticos no nível do mar, conclui-se que essa configuração é apenas um estágio temporário que existiu em uma pequena fração de tempo durante o Quaternário. Assim, a morfologia clássica dos atóis atuais, um conceito bastante reconhecido no meio científico, só passou a ter essa configuração na parte final do Quaternário. Os atóis recentes existem em diferentes províncias geológicas dos mares tropicais (DICKINSON, 2004).

Barry *et al.* (2007) comentam que os atóis são recifes oceânicos que possuem um aspecto anular onde comumente se encontra uma lagoa interna e a presença de ilhas formadas por depósitos arenosos inconsolidados do Holoceno. Os atóis comumente diferem significativamente em relação ao número, tamanho, continuidade e morfologia das ilhas (DANA, 1853; DAVIS, 1920, 1928; STODDART, 1965, 1969).

Na história geológica recente observam-se 425 atóis, sendo a grande maioria presente no Oceano Indo-Pacífico. Darwin (1842) abordou que não existem atóis verdadeiros no Oceano Atlântico. Entretanto, definindo um atol pela sua configuração geomorfológica (mais do que pela sua origem, assim como o próprio Darwin afirmou), Bryan (1953) listou 27 Atóis, sendo 26 deles no Mar do Caribe e somente 1 no Atlântico Sul (Atol das Rocas). Este autor ressalta que existem incertezas quanto à exata classificação desses recifes nos Oceanos Tropicais e ressalta que a minoria dos atóis situa-se nos mares tropicais do Caribe e Atlântico Sul (FIG.08). A grande maioria encontra-se na região do Indo-Pacífico (FIG.09), com formas circulares a elipsóides, todos apresentando uma laguna bastante profunda no seu interior.



**FIGURA 08.** Atóis do Atlântico. **A-** Atol de Alacrán, México, Dimensões (22 x 11km). **B-** Atol de Albuquerque, Caribe, Dimensões (6,5x 3,25km). **C-** Atol de Chinchorro, Caribe, Dimensões (47x23km). **D-** *Glover's Reef*, Belize, Dimensões (26x13km). **E-** *Lighthouse Reef*, Belize, Dimensões (35x18km). **F-** Atol do Roncador ,Nicarágua, Dimensões (15x7,5km). Modificado a partir de imagens de Landsat-7 extraídas de IMaRS (2009).



**FIGURA 09.** Atóis do oceano Indo-Pacífico e exemplos de atóis com classificação diferenciada: A) Atol de Osprey, Mar de Coral, Austrália (Dimensões: 25 x 12km). B) Atol de Kure, Hawaii (Dimensões: 10 x 7km). C) Atol de Mururoa, Arquipélago de Tuamotu (Dimensões: 28 x 12 km). D) Atol North Nilandhoo, Maldivas, (Dimensões: 30 x 24km), Observar o grande número de recifes circulares de menor tamanho na área central da laguna. E) Atol de Aitutaki, Ilhas Cook, (Dimensões: 15x10 km). Este atol é comumente referido como “almost atoll” com presença de largas ilhas de origem vulcânica dentro da laguna rasa, bem como um anel recifal coralíneo circulando a laguna. F) Atol soerguido de Niue, Nova Zelândia (Área estimada: 260km<sup>2</sup>). Este ilha representa uma formação bioconstruída por corais que sofreu intenso soerguimento, sendo uma das maiores do Oceano Pacífico. Modificado a partir de imagens de Landsat-7 extraídas de IMaRS (2009).

Os sedimentos superficiais da laguna, ilhas (FIG.10) e do anel recifal dos atóis são compostos principalmente de materiais derivados do recife. Entretanto, análises fasciológicas de superfície, em lagunas profundas de atóis, revelam que o material bioclástico é composto, principalmente, de materiais produzidos *in situ* em menor proporção como algas calcárias e foraminíferos, enquanto material bioclástico de corais é encontrado em menor quantidade em fácies superficiais. As fácies lagunares dos atóis ocupam uma proporção significativa nas fácies carbonáticas totais associadas aos atóis modernos (YAMANO *ET AL.*, 2002).



**FIGURA 10.** Atol da região das Maldivas mostrando a morfologia do recife: Laguna profunda (>30m), Ilha arenosa a sotavento, Recifes em zona rasa (0-5m), Oceano Indo-Pacífico Adjacente. Modificado da Imagem da NASA obtida do software *free* Google Earth 4.0.

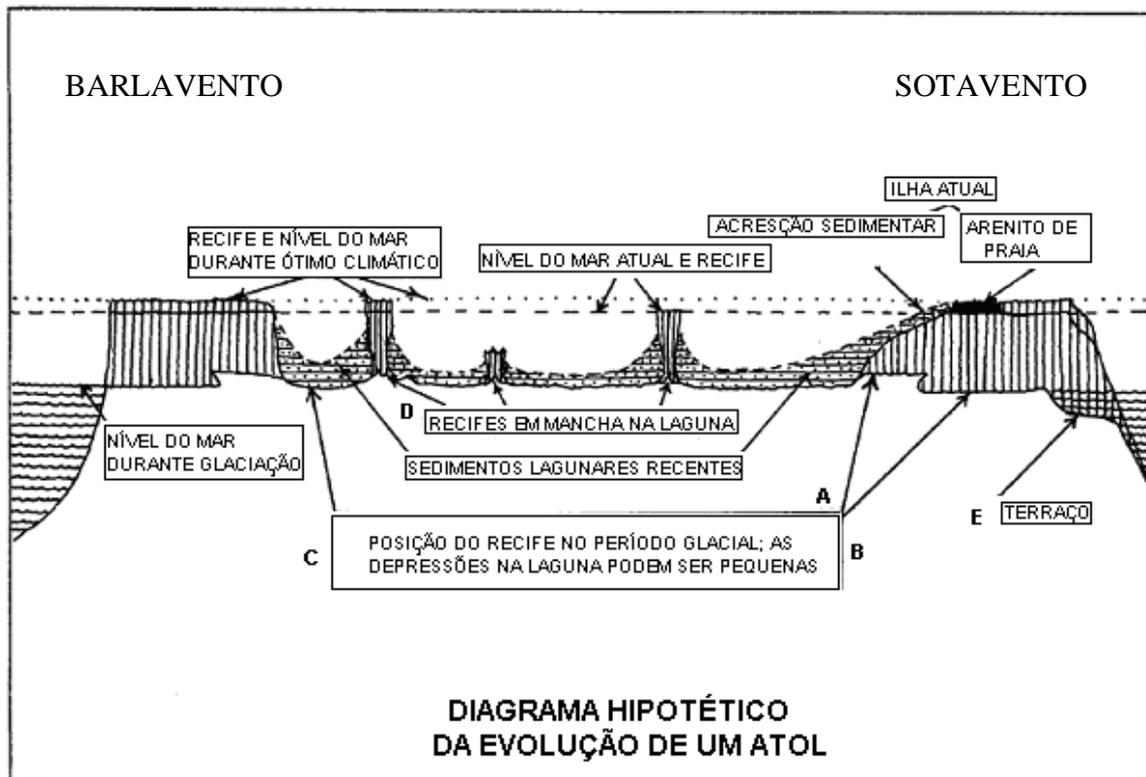
A identificação e classificação de fácies nos atóis são comumente descritivas e só podem ser aplicadas ao exemplo particular em estudo, como a laguna. A literatura científica não apresenta um esquema de classificação geral de fácies em atóis, diferentemente da classificação de fácies em outros sistemas carbonáticos como plataforma continental e outras plataformas carbonáticas (TSUJI, 1993). Yamano *et al.* (2002) consideram que as fácies lagunares dos atóis podem ser formadas de material

bioclástico alóctone e material produzido *in situ* no ambiente recifal. Entretanto, o mesmo autor observa que o tempo de transporte de materiais, derivados do recife nos sedimentos superficiais e subsuperficiais, pode ser analisado utilizando-se da geologia isotópica com uso do carbono-14.

Estudos anteriores de fácies e petrografia comumente se baseiam no estudo geológico da superfície dos Atóis. A utilização de testemunhos revela a história sedimentar destes recifes no Quaternário (TUDHOPE, 1989).

Um dos principais estudos sobre a história dos atóis foi publicado por Wiens (1962) que sugeriu um ciclo evolutivo hipotético para explicar a morfologia do Atol incluindo: sua estrutura carbonática, a laguna recifal, o platô do recife e às ilhas arenosas a sotavento (FIG. 11). O mais baixo perfil do recife representa uma fase hipotética do nível do mar durante um forte evento regressivo por glacio-eustasia. Neste nível, com queda brusca do nível oceânico, o recife fica emerso e sofre processos de dissolução e, principalmente, de erosão subaérea. Observa-se nesta fase que somente parte dos recifes periféricos (A) e de recifes em mancha (D) (*patch reefs* na laguna atual) situava-se acima do nível do mar. A lagoa (C) estaria no nível do mar com depressões ligeiramente abaixo nível do mar. Os fortes processos denudacionais atuantes durante o nível de mar baixo, gerariam um recife em franja de topografia plana (B). Partes submarinas do recife a barlavento podem ter sido erodidas e transportadas para sotavento na área próxima ao terraço. O terraço (E) evidenciaria fases pretéritas de nível de mar ainda mais baixo.

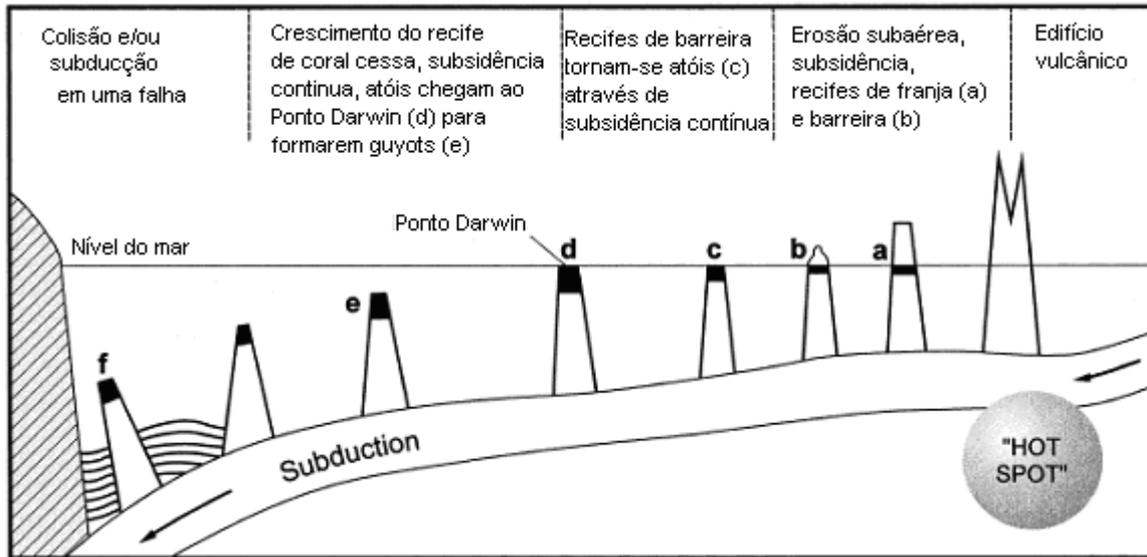
Durante a subida do nível do mar, em um período de ótimo climático inclusive de temperatura, a fábrica carbonática de bioconstrutores recifais geraria um novo ciclo de crescimento do recife. Os sedimentos do paleorecife destruído teriam levado ao preenchimento sedimentar de parte da laguna e das ilhas arenosas a sotavento (WIENS, 1962; STODDART, 1969). O sistema de Wiens (1962) é baseado, principalmente, nas variações do nível do mar e nos seus efeitos diretos e indiretos, entretanto não ressalta os efeitos da interação entre subsidência e oscilações eustáticas (WOODROFFE, 2008).



**FIGURA 11.** Diagrama hipotético da evolução de um atol (modificado de Wiens, 1962).

Existe um interessante paradoxo no grande número de recifes de barreira e atóis recentes em relação à pobreza do registro fóssil destes recifes ao longo do Éon Fanerozóico. Fato que, em parte, é explicado pela necessidade de uma série de flutuações eustáticas para gerar os padrões observados. Porém, mais importante é o fato de que a grande maioria dos atóis e recifes de barreira atuais encontra-se na zona de subsidência de fundações vulcânicas no Pacífico. Alguns autores chamam o fenômeno de destruição de atóis durante certo período da história da terra de “*Darwin Point*” (FIG.12).

No “*Darwin Point*” os atóis cessam a produção de carbonatos. Se o topo do atol cai abaixo de 30 m em relação ao nível do oceano e a taxa de subida do nível do mar é maior do 15mm ao ano, o atol pode cessar a sua fábrica carbonática. Esse processo também é dependente do clima, da história do nível do mar, paleolatidade, temperatura da água do mar e luminosidade.



**FIGURA 12.** Representação esquemática do “*Darwin Point*” (modificado de Flood, 2001).

As áreas recifais oceânicas, dependendo de sua posição nas placas tectônicas, tendem a desaparecer em zonas de subducção finalizando a história evolutiva de um recife. Talvez essa seja a causa do alto número de atóis e recifes de barreira no Holoceno em relação ao resto do registro geológico (FLOOD, 2001; PURDY & WINTERER, 2006).

## 1.4. Objetivos

Objetivo Geral:

- Estudar aspectos da Geobiologia do Atol das Rocas como: Classificação do sistema recifal, Biogeomorfologia, Variações do nível do mar e Paleoecologia.

Objetivos Específicos:

- Discutir a classificação do recife de Rocas, sob uma perspectiva histórica e conceitual.
- Estudar os compartimentos biogeomorfológicos compreendendo a influência da atividade biológica no recife em termos de bioerosão, bioconstrução, bioturbação e bioproteção.

- Elaborar um modelo paleoecológico do único Atol do Atlântico Sul Ocidental com uso de dados paleontológicos, geomorfológicos, isotópicos e da fácies sedimentares.
- Analisar indicadores de oscilações eustáticas, no Atol das Rocas, para verificar concordância ou discordância com curvas de nível do mar para áreas costeiras do Nordeste do Brasil;
- Avaliar aspectos do processo de sucessão ecológica das espécies ao longo da sua história geológica.

## 1.5. Hipóteses

As hipóteses a serem analisadas nesta tese são:

Hipótese 1: O modelo darwiniano de formação dos recifes é aplicável ao único Atol do Atlântico Sul Equatorial?

Hipótese 2: A deposição dos *beachrocks* e da sua paleofauna, na ilha do Cemitério do Atol das Rocas, ocorreu em nível de mar alto?

Hipótese 3: Qual o papel das oscilações do nível do mar nos processos paleobiológicos?

Hipótese 4: Qual o papel dos organismos (bioerosão, bioproteção, bioturbação e bioconstrução) na estruturação do relevo do recife e das ilhas arenosas?

Hipótese 5: A herbivoria, energia hidrodinâmica e turbidez são fatores-chave que levaram a dominância das algas calcárias na bioconstrução do Atol?

Hipótese 6: As oscilações do nível do mar neste recife oceânico estão de acordo com modelos pretéritos para áreas costeiras próximas (Bahia e Rio Grande do Norte) no Nordeste do Brasil?

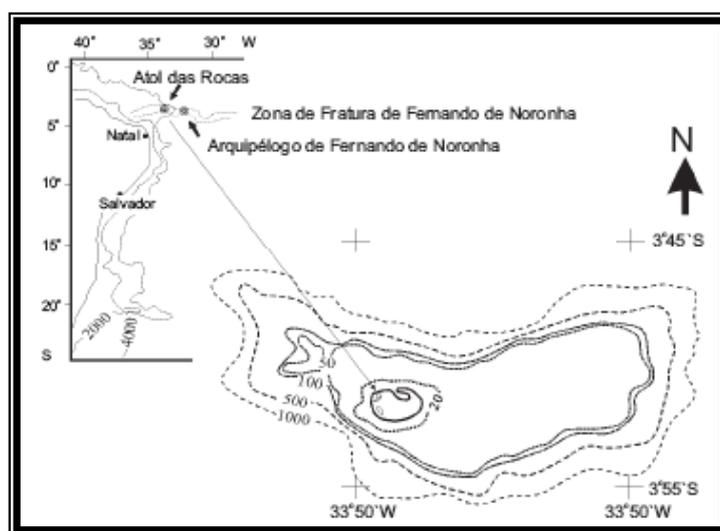
Hipótese 7: A classificação do recife de Rocas como Atol é válida do ponto de vista morfológico e genético?

## 1.6. Contexto geológico

O Atol das Rocas foi descoberto em 1503 devido ao naufrágio da nau de Gonçalo Coelho. A primeira menção por um naturalista ocorreu no final do século XIX, em 1880, por Jean de Léry, que fez uma breve e muito tênue descrição do Atol à distância, quando passava pelas suas cercanias, no retorno à França de sua viagem ao Brasil. Apenas com Andrade (1959), Rocas recebe sua primeira descrição científica mais aprofundada, apesar de baseada em uma visita científica de apenas um dia no Atol. Foram descritas morfologias do platô recifal, da laguna, de algumas piscinas e do arenito de praia em uma das ilhas.

A reserva biológica do Atol das Rocas foi criada em 1979 (Decreto Lei 83.549/79), sendo a primeira reserva marinha do Brasil; desde então ela está legalmente protegida, mas somente em 1991, com a implantação de uma estação de pesquisa, é que se tornou possível a ocupação da reserva. Desde 1991, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) e, mais recentemente, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO) têm se esforçado no aumento da pesquisa científica junto com instituições privadas e públicas.

A área ocupada pela reserva vai até uma profundidade de 1000m (FIG. 13), o que proporciona uma região de aproximadamente 360 km<sup>2</sup> (MARQUES, 2003).

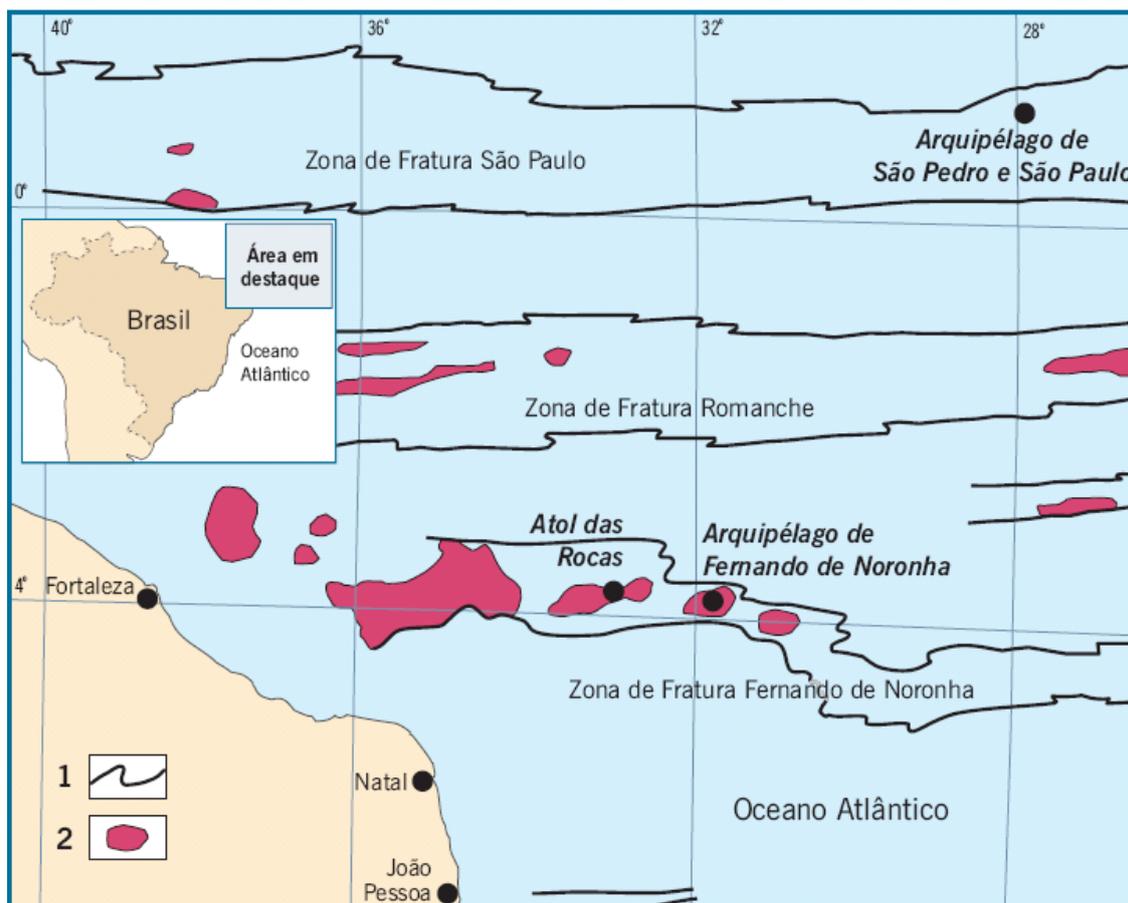


**FIGURA 13.** Mapa de localização do Atol das Rocas e a delimitação da reserva biológica (isóbata de 1000m). Modificado de Kikuchi & Leão (1997).

O Atol das Rocas está localizado no topo de uma cadeia de montanhas submarinas no Oceano Atlântico Sul, cuja base encontra-se a 4000 m de profundidade

no leito oceânico, a 3°51'S de latitude e 33°49'W de longitude, distante 266 km da cidade de Natal e 150 km, a oeste, do arquipélago de Fernando de Noronha, no Nordeste Brasileiro (ECHEVERRÍA & PIRES, 1997; KIKUCHI & LEÃO, 1997). O substrato é composto por algas calcárias incrustantes, moluscos vermetídeos e bioclastos de vários táxons (GHERARDI & BOSENCE, 1999).

O ambiente tectônico e as características do substrato foram considerados por Almeida (1955), Ponte & Asmus (2004) e Almeida (2006), que afirmaram que Rocas, assim como o arquipélago de Fernando de Noronha, pertencem a um alinhamento de montes submarinos que consistiriam numa ramificação da dorsal meso-oceânica (FIG.14). Miura & Barbosa (1972) e Bryan & Kumar (1973) apresentam evidências da continuidade desse alinhamento projetando-se pela plataforma continental brasileira no Estado do Rio Grande do Norte e continente adentro, no estado do Ceará. Damuth & Palma (1979) e Gorini (1981) confirmaram a morfologia desse alinhamento de montes submarinos, que o próprio Gorini (1981) nomeia como Zona de Fratura de Fernando de Noronha. Segundo este autor, essa zona de fratura tem continuidade na Zona de Fratura Jean Charcot, do lado oriental do Atlântico. Cordani (1970) datou rochas de Fernando de Noronha e concluiu que a atividade vulcânica do Arquipélago ocorreu entre cerca de 12 e 1,8 milhão de anos A.P, ou seja, do Mioceno Médio até o início do Pleistoceno. O autor sugere, contudo, que o início da atividade vulcânica que resultou na formação dessas ilhas teve início há cerca de 39 milhões de anos. Por se situar a W do Arquipélago de Fernando de Noronha, mais distante, portanto da dorsal meso-atlântica, o substrato do Atol deve ter idades maiores que as apresentadas por Cordani (1970).



**FIGURA 14.** Região oceânica adjacente ao Nordeste brasileiro: situação do Arquipélago de São Pedro e São Paulo na Zona de Fratura São Paulo; Atol das Rocas e Arquipélago de Fernando de Noronha, na extremidade da Zona de Fratura Fernando de Noronha. 1. Limite de zonas de fratura; 2. Rochas magmáticas. Modificado de Almeida (2006).

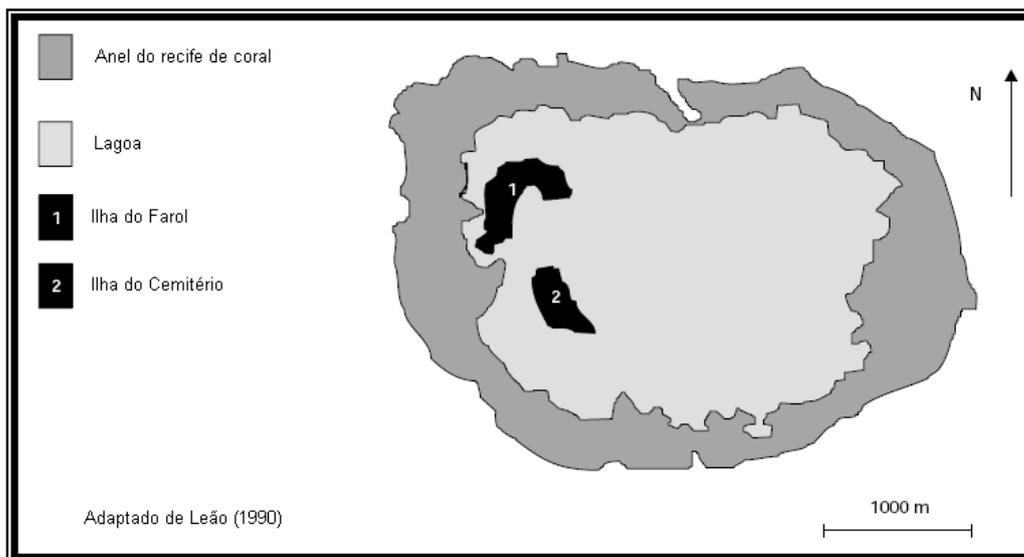
Toda litosfera oceânica está sujeita ao mecanismo de subsidência térmica, à medida que se afasta das cordilheiras meso-oceânicas (ALLEN & ALLEN, 1990) e foi esse o mecanismo segundo o qual cresceram os atóis do Pacífico (SCOFFIN & DIXON, 1983). A profundidade da superfície oceânica pode ser obtida como função da sua idade, e observações em diversos pontos do Oceano Atlântico Norte e do Pacífico Norte corroboram essa afirmativa (ALLEN & ALLEN, 1990). Além disso, afirma Nakada (1986), que as ilhas oceânicas distantes de regiões que sofreram glaciação refletirão apenas os efeitos dos ajustes isostáticos globais, não sofrendo nenhuma influência de ajustes hidro-isostáticos locais, se o seu raio for menor que 10 km, como é o caso do Atol das Rocas.

Nesse caso, além da componente eustática das variações relativas do nível do mar também esteve presente no processo de crescimento do Atol das Rocas a

componente de origem isostática (KIKUCHI, 1994), ao contrário do que afirmaram Andrade (1959) e Ottman (1963).

Estudos recentes (KIKUCHI & LEÃO, 1990; KIKUCHI & ABDON, 1991; KIKUCHI & LEÃO, 1997; GHERARDI & BOSENCE, 1999; GHERARDI & BOSENCE, 2001; GHERARDI & BOSENCE, 2005; ALMEIDA, 2006) descrevem o Atol como um anel recifal, instalado sobre um monte submarino do tipo “guyot”. Este anel é constituído, do ponto de vista morfológico, de terraços escalonados que represam as águas durante as marés baixas. Essas águas formam um sistema de piscinas (com 5m de profundidade máxima), deixando visíveis apenas 2 ilhas. A porção norte do anel está sempre submersa, dando origem à laguna recifal. As águas oceânicas têm acesso ao interior do recife através dos canais.

O Atol tem origem vulcânica e formação carbonática no recife, possui uma estrutura ligeiramente elipsoidal, quase circular em seu eixo maior (leste-oeste) com cerca de 3,7 km de comprimento e o menor eixo (norte-sul) tem cerca de 2,5 km de comprimento. Dentro do anel recifal, existem duas ilhas: Ilha do Farol e Ilha do Cemitério, ambas compreendendo 7,2 km<sup>2</sup> de área emersa (FIG. 15). Antes da construção do primeiro farol, do qual a ilha teve seu nome, a ilha do Farol era chamada pelos franceses e ingleses como ilha de *Sable* ou *Sand*; e a Ilha do Cemitério se denominava como ilha de *Grass* ou grama. Porém, com o grande número de naufragos mortos, esses foram lá enterrados, assim como alguns dos faroleiros e seus familiares, mudando o nome para ilha do Cemitério em homenagem aos mortos ali enterrados. Em 1934, na construção do segundo farol, foram encontradas cruzeiras marcando túmulos (ANDRADE, 1959).



**FIGURA 15.** Mapa fotointerpretado do Atol das Rocas adaptado de Leão (1990). Observar que a descrição do compartimento interno como uma grande laguna semelhante às abordagens dos atóis do Indo-Pacífico e classificação do anel recifal como “recife de coral”.

O platô recifal é composto por um anel de 100 a 800m de largura, interrompido por piscinas de vários tamanhos e profundidades, e dois canais, um ao norte, “Barretão”, e outro a NW, “Barretinha” (GHERARDI & BOSENCE, 1999). O clima é tipicamente tropical (ver anexo 4.7) e as chuvas no verão ocorrem de Março a Julho. A estrutura do solo é feita de depósitos orgânicos, preenchida por depósitos de óxido de cálcio e dióxido de carbono. A vegetação das ilhas é formada basicamente por seis famílias: Portulacaceae, Gramineae, Amaranthaceae, Cyperaceae, Palmaceae e Casuarinaceae (ALMEIDA *ET AL.*, 2000).

Os ventos de leste e sudeste são predominantes ao longo do ano com uma frequência de 45% e velocidades variando entre 6,0 a 10,0 m/s. Estes parâmetros possuem relativa sazonalidade: nos meses de inverno (de junho a agosto), observa-se 35% para ventos de SE e 15% para E, com velocidades variando entre 11,0 e 15,0 m/s; para o verão (de dezembro a abril), a frequência fica em torno de 20% para os ventos SE e E, com velocidade frequentemente acima de 20,0 m/s (KIKUCHI & LEÃO, 1997).

A temperatura da água do mar possui média de 27,0 °C, podendo chegar a 42 °C nas piscinas, com salinidade na superfície variando entre 36 ‰ e 37 ‰. O regime de marés é semidiurno e de mesomarés, com uma variação máxima de 2,7m, deixando exposto o platô recifal em maré de sizígia baixa (GHERARDI & BOSENCE, 1999).

Poucos trabalhos geológicos foram realizados no Atol, dentre os principais podem ser citados: Andrade (1959), Ottman (1963), Kikuchi (1994), Kikuchi & Leão (1997) e Gherardi & Bosence (1999, 2001, 2005). Os autores identificaram diferentes compartimentos geoambientais: anel recifal, frente recifal, platô recifal, ilhas arenosas, depósito arenoso e laguna. Na parte externa do Recife, contíguo à frente recifal, o fundo oceânico foi denominado por Kikuchi (1994) como fundo adjacente, sendo descrito em associação à frente recifal. A linha que delimita o perímetro externo do platô recifal é a margem recifal. No platô recifal ocorrem às piscinas, os canais e as ilhas arenosas.

Segundo Andrade (1959) e Kikuchi (1994) pode-se nomear sotamar a parte NW do anel recifal, onde se localiza a ilha do Farol, e todo o restante podendo ser denominado como barlamar. Considerando-se os registros dos ventos obtidos pelo INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais), a posição sotavento coincide com a de sotamar, o mesmo sendo válido para as posições de barlavento e barlamar.

## **1.7. Material e Métodos**

### **1.7.1. Atividades logísticas da expedição científica**

As coletas foram realizadas na REBIO (Reserva Biológica) Atol das Rocas seguindo o planejamento das viagens de campo programadas do ano de 2008 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA), o qual fornece parte da logística para realização dos estudos científicos na área. A licença de coleta de material científico (número 12228-1) foi permitida através do sistema SISBIO (Sistema de Biodiversidade) do órgão ambiental federal competente (Anexo 4.4). Só é possível realizar atividades científicas no Atol sob licença e manejo adequado. Atividades turísticas, pesqueiras, industriais e de habitação são proibidas por lei, segundo a legislação que rege o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC).

As viagens consistiram de dois trechos, o continental e o marítimo. O equipamento necessário para as atividades de campo foi transportado no trecho Fortaleza-Natal. O trecho marítimo foi transposto em um veleiro com presença de motor auxiliar a partir de Natal, Rio Grande do Norte.

A expedição oceanográfica foi realizada no período de 30 de janeiro a 28 de fevereiro de 2008, sendo a equipe composta por 4 pesquisadores na visita científica à

ilha oceânica. As viagens de Natal ao Atol das Rocas foram realizadas em um veleiro (FIG. 16) e sua duração foi de 36 horas. Por causa do peso da embarcação a velocidade alcançada não ultrapassou 8 nós. As viagens foram previstas, em geral, para que a chegada no atol acontecesse durante a maré cheia por volta das 8 horas da manhã. Levou-se em conta, também, o fuso horário, pois há uma diferença de uma hora, para mais, entre Natal (RN) e o Atol das Rocas.



**FIGURA 16.** Veleiro “Borandá” (último no píer indicado pela seta) utilizado para a expedição oceanográfica ao Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial no período janeiro-fevereiro de 2008.

A hospedagem no Atol foi realizada na estação utilizada para dormitório nas pesquisas na REBIO (FIG. 17). Os mantimentos foram transportados e acondicionados em caixas de isopor e tonéis de plástico de 200 litros, com tampa. A dieta básica foi constituída por grãos e carnes secas ou defumadas, biscoitos e sucos industrializados, além de, nos primeiros dias, frutas que resistissem à viagem e a temperaturas elevadas. Refeições pré-cozidas também foram utilizadas além das feitas na estação. A água potável foi levada do continente em garrafas de água mineral de 20 litros. Seu uso foi restringido à alimentação durante toda a temporada de pesquisa devido à inexistência de água potável no Atol das Rocas.



**FIGURA 17.** Estação de pesquisa da Reserva Biológica do Atol das Rocas, Atlântico Sul Ocidental, situada na ilha do Farol. Seta contínua aponta para o atual Farol automático em funcionamento. Seta pontilhada indica o antigo Farol, que se encontra atualmente em uma zona de intensa erosão na ilha arenosa.

A entrada no Atol foi feita normalmente através dos canais ou aberturas (barretas) a NW e N do anel recifal. A mais utilizada foi a de NW, próxima à ilha do Farol, chamada Barretinha. Normalmente existe arrebentação nessas passagens e quando a ondulação é muito forte não é possível transpô-las. Assim, a entrada no recife só pode ser feita no intervalo entre 2 horas antes ou 2 horas após a preamar. No nível mais alto da maré com mar calmo, o desembarque pode ser feito diretamente sobre o recife ao norte da Barretinha. Nessa região, existem algumas irregularidades mais acentuadas na borda do recife, porém é possível transpô-las e entrar em uma pequena piscina no topo recifal. Comumente esta operação de embarque/desembarque pode levar até mais de 4 horas para ser concluída. A causa disso é o volume de material e equipamentos a serem transportados. Além do número elevado de idas e vindas, a distância de fundeio da embarcação (veleiro Borandá) também pode ser um empecilho adicional para a rapidez da operação.

Durante este trabalho, o desembarque foi feito com bote inflável (FIG.18) com motor de popa de 25HP. Todo o material de campo (GPS, martelos geológicos, laptops, álcool,etc..) foi embalado em sacos plásticos e posteriormente acondicionado em caixas de isopor lacradas.



**FIGURA 18.** Bote inflável (aproximadamente 3 metros de comprimento) com motor auxiliar (à direita) usado para trazer o equipamento, mantimentos e possibilitar locomoção nas porções interna e externa do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. Bote em um canal em maré alta de sizígia na ilha do Farol. Ao fundo observa-se a ilha do Cemitério.

### 1.7.2. Atividades gerais do trabalho de campo

O tratamento do aspecto geral do Atol das rocas requereu diferentes etapas como interpretação de imagens aéreas, de mapas geológicos da área, visualização das características “*in situ*” e obtenção de amostras geológicas do recife, paleorecife, calcarenito (*beachrocks*) e dos sedimentos bioclásticos em diferentes compartimentos.

As observações do recife foram efetuadas durante caminhadas no topo do recife, exposto nas marés baixas (ver anexo 4.6), e durante mergulhos, em apnéia (FIG. 19) e autônomo (FIG. 20), nas partes submersas. Neste segundo deslocamento, utilizou-se um bote inflável para ida às áreas de investigação subaquática. Os pontos de observação foram inicialmente plotados no mapa publicado por Kikuchi (1994) e georeferenciados com uso de GPS. Os dados anotados nesses pontos de descrição foram: a) as principais feições biogeomorfológicas do Atol das Rocas e b) características sedimentares, estratigráficas, petrográficas e biológicas. Esses dados foram completados com

documentação fotográfica detalhada, com amostragens sedimentares inconsolidadas e da estrutura recifal.



**FIGURA 19.** Uso de mergulho livre (apnéia) para obtenção das amostras geológicas do recife e dos sedimentos em baixas profundidades (0-5m) no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.



**FIGURA 20.** Uso do mergulho autônomo (SCUBA) para documentação fotográfica e obtenção de amostras em profundidades maiores (5-15m) no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

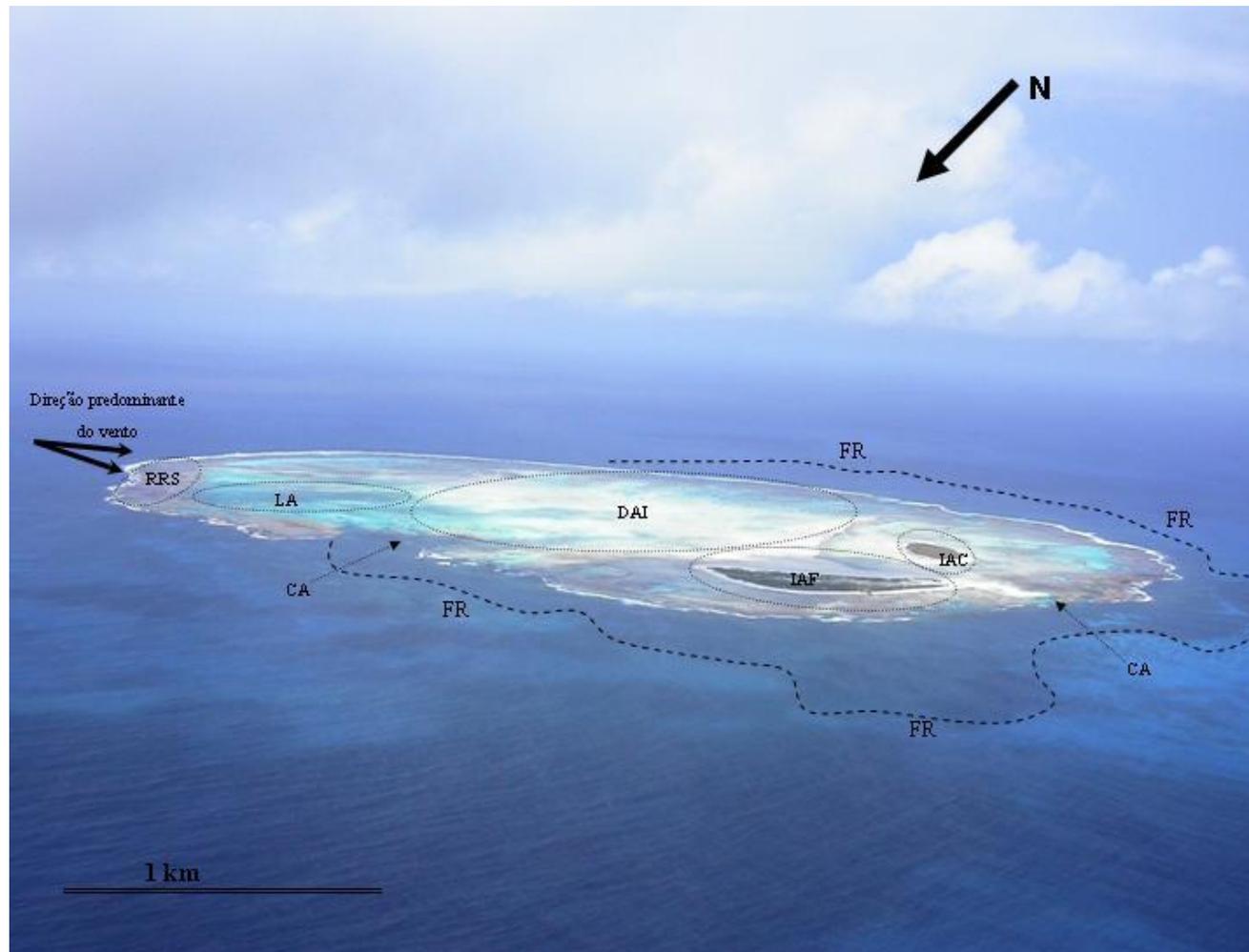
### 1.7.3. Obtenção das amostras

Na atividade de campo de janeiro-fevereiro de 2008 foram realizadas amostragens geológicas sedimentares e recifais nas: ilhas arenosas, laguna, piscinas, frente recifal, anel recifal, depósito arenoso intermarés, calcarenito da ilha do Cemitério, resíduos recifais a barlavento e fundo adjacente (FIGS. 21 e 22). Nestas zonas também foi verificada a biota e o seu papel na dinâmica do relevo.

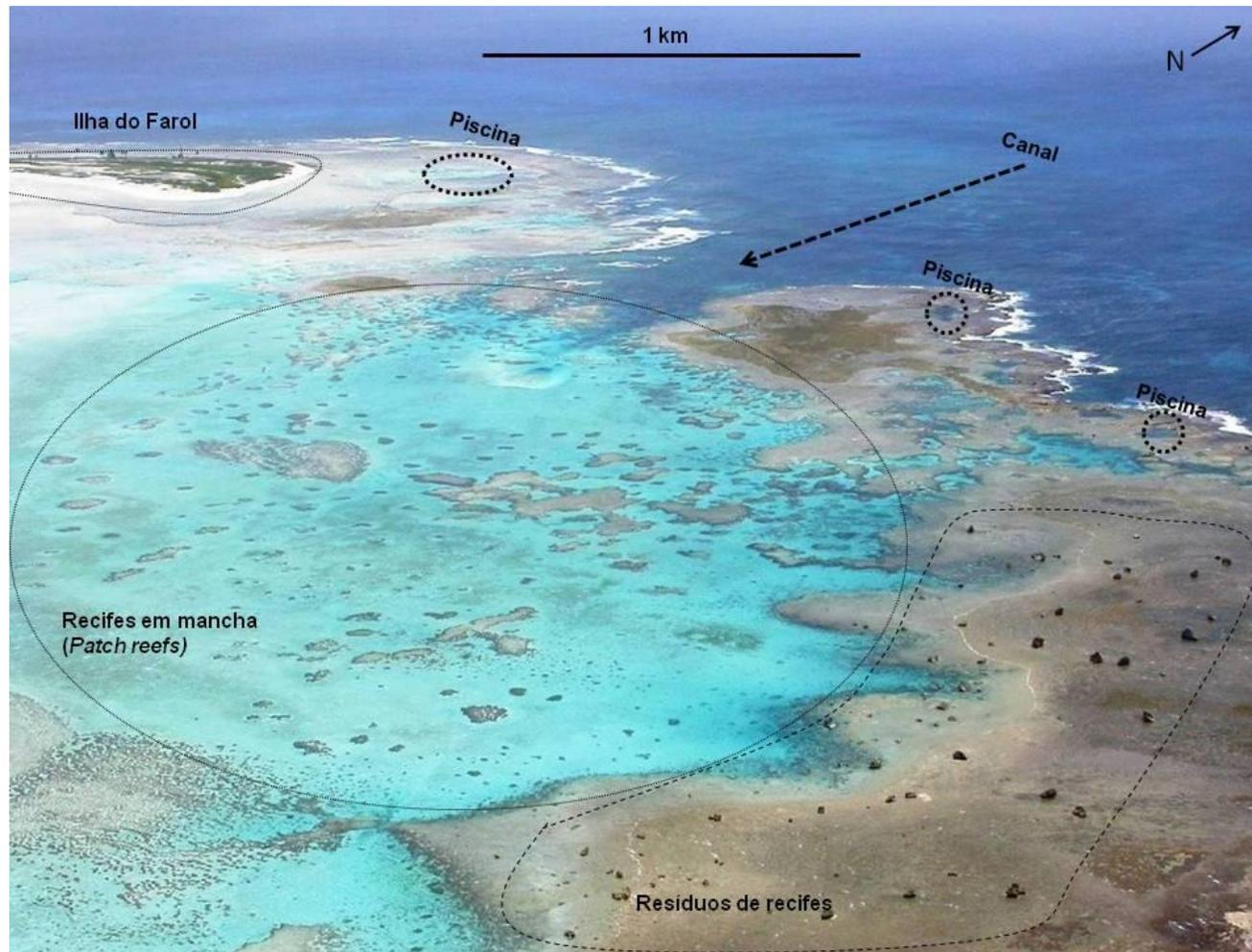
Após a coleta do material de áreas recifais recentes de alta energia, do paleorecife e da verificação da fácies da estrutura carbonática analisou-se o estado tafonômico da preservação fossilífera. Tal estudo foi realizado principalmente nos processos tafonômicos que produzem (seja como depósitos ou traços) assinaturas preservadas que podem auxiliar como indicadores paleoambientais (ex: encrustação calcárea, traços de bioerosão, sedimentos, preenchimento da porosidade interna e processos de cimentação). Foram analisados diversos grupos, tais como algas coralinas, briozoários, foraminíferos, serpulídeos e vermetídeos, sendo estes identificados de acordo com a bibliografia específica de cada grupo.

As amostras recifais foram subseqüentemente cortadas para análise da estrutura interna da bioerosão. Os organismos macrobioerosivos e seus traços típicos foram verificados (como de esponjas, sipunculídeos, nematódeos, peixes, etc.), além dos traços de icnoespécies.

Os métodos de trabalho que precederam a coleta fossilífera do material, no calcarenito, consistiram no levantamento geológico da área, na elaboração do perfil estratigráfico e na observação das medidas de posição e orientação dos elementos esqueléticos aflorantes. A coleta dos invertebrados fósseis foi feita de forma que não se perdessem informações tafonomicamente relevantes. A retirada dos fósseis do calcarenito foi acompanhada com documentação fotográfica para que detalhes como a orientação e os encaixes entre os materiais não fossem perdidos. Foram considerados aspectos da orientação azimutal, grau de articulação, evidência de predação e reconhecimento dos elementos. O material foi tombado no Laboratório de Invertebrados Marinhos da UFC (LINCE-UFC), onde foi submetido à preparação mecânica, com auxílio de martelos, agulhas e pincéis e identificação taxonômica. Os dados paleobiológicos foram usados para análise das hipóteses 2 e 3 (ver seção 1.5).



**FIGURA 21.** Áreas de coleta de dados no Atol das Rocas. Observam-se as feições geológicas e a forma elipsóide do recife. IA: ilhas arenosas a sotavento; IAF: Ilha arenosa do Farol; IAC: Ilha arenosa do Cemitério; LA: laguna; CA: canais; FR: frente recifal; DAI: depósito arenoso intermarés; RRS: resíduos de recifes. Interpretação feita a partir de foto obtida pela Força Aérea Brasileira (FAB), durante as atividades de campo, em janeiro de 2008, em condições de maré baixa de sizígia. Modificado de Soares *et al.* (submetido).



**FIGURA 22.** Aerofotografia do Atol das Rocas (NE, Brasil) mostrando a Zona onde ocorrem Resíduos de Recifes (Paleorecife), piscinas, recifes em mancha, a ilha do Farol a sotavento e o maior canal que liga a área interna do Atol à zona adjacente do Oceano Atlântico. Foto da Força Aérea Brasileira (FAB) obtida em janeiro de 2008 em maré baixa de sizígia.

#### **1.7.4. Descrição das amostras**

As amostras foram utilizadas para diferentes fins do projeto de Tese:

- Descrição macroscópica e identificação das espécies e de aspectos da bioerosão, bioturbação, bioconstrução e bioproteção;
- Confecção de lâminas petrográficas na UFRN para observação dos aspectos da sedimentologia, petrografia, tafonomia, estratigrafia e sistemática paleontológica;
- Datação isotópica por Carbono-14 no Departamento de Física da UFC das fases de desenvolvimento recifal;

##### **1.7.4.1. Descrição Macroscópica**

Os táxons paleontológicos foram identificados por comparação com amostras de outros recifes do Nordeste do Brasil existentes no Instituto de Ciências do Mar e Laboratório de Invertebrados Marinhos (Departamento de Biologia), ambos da UFC, Instituto de Geociências da UFBA, UFRN e Instituto de Geociências da UFRGS. Foram utilizados também os trabalhos de Smith (1971), Araújo (1984), Leão (1986) e Nolasco (1987).

Os organismos com função biogeomorfológica foram identificados nos trabalhos de campo e no laboratório, sendo este último procedimento adotado no caso de identificação duvidosa ou não passível de ser realizada no Atol. Foram analisadas atividades geobiológicas referentes a estruturas de bioturbação, bioerosão recifal, proteção contra erosão, cimentação de areia carbonática biogênica, bioproteção e bioconstrução recifal. Os bioconstrutores, como algas calcárias, moluscos e corais escleractínios foram identificados nas atividades de campo e no laboratório a partir das amostras recifais. Os organismos bioerosivos e bioprotetores foram identificados nos trabalhos de campo e a partir de amostras biológicas coletadas. Este procedimento visa obter dados para análise das Hipóteses 4 e 5 (ver seção 1.5).

##### **1.7.4.2. Descrição Microscópica**

A descrição microscópica teve como objetivos a confirmação da identificação dos organismos efetuada na descrição macroscópica, a descrição dos bioclastos

existentes e dos microfósseis, além da melhor compreensão dos processos diagenéticos e tafonômicos que ocorreram no recife. Os dados quantitativos foram expressos em taxa de ocorrência, em porcentagem, dos bioclastos constituintes das diferentes zonas geomorfológicas estudadas.

A análise microscópica foi realizada com o auxílio de microscópio estereoscópico ZEISS, microscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS.

Foraminíferos, coletados nas amostras sedimentares, foram fotografados ao MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura (CME-UFRGS), para análise de corrosão e outros possíveis fatores de alteração. Os bioclastos foram colocados em *stubs* (pinos) e recobertos com uma película de ouro, em seguida foram obtidas imagens.

#### **1.7.4.3. Seleção e preparação das amostras recifais e sedimentares**

Foram selecionadas amostras de acordo com o nível estratigráfico para confecção de lâminas delgadas para estudos petrográficos (ver Anexo 4.5). Cada amostra foi empregnada por araldite. Esse procedimento foi necessário devido à elevada porosidade e à reduzida cimentação do calcarenito da ilha do Cemitério.

As lâminas foram confeccionadas no Instituto de Geociências da UFRN. Para que fosse possível desgastar as lâminas quando necessário, não se fixaram lamínulas a elas. Utilizou-se glicerina para aumentar o contraste e o brilho da seção.

#### **1.7.4.4. Petrografia**

Na descrição petrográfica das lâminas delgadas foram utilizados microscópios petrográficos estereoscópicos Zeiss e Nikon, com aumento máximo de 400x. Foram realizadas lâminas petrográficas, principalmente das rochas representativas do paleorecife na zona a barlavento e do calcarenito de praia da Ilha do Cemitério, para observação e análise das fácies sedimentares. Houve a análise das biofácies, litofácies e dos processos de cimentação através do uso de microscopia óptica sob luz natural e polarizada no Laboratório de Diagênese do Instituto de Geociências da UFRGS.

A identificação dos organismos foi realizada com auxílio das descrições, figuras e fotografias contidas em Araújo (1984), Leão (1986), Nolasco (1987), Machado & Souza (1994) e Rossi *et al.* (1996).

Os microfósseis das amostras do paleorecife foram utilizados para determinação paleoambiental, pois revelam fatores pretéritos de profundidade, salinidade e temperatura, bem como a energia do meio e características do sedimento. Foraminíferos são comumente usados para interpretação paleoambiental em atóis, devido indicarem fatores ecológicos pretéritos como profundidade, temperatura e salinidade (YAMANO ET AL., 2002).

### 1.7.6. Metodologia de análise de dados

#### 1.7.6.1. Datação radiométrica

As datações pelo método do Carbono – 14 ( $^{14}\text{C}$ ) foram realizadas em amostras do recife biogênico e do calcarenito coletadas a barlavento e a sotavento. A maioria das amostras constitui-se de fragmentos de corais como *Siderastrea stellata*, *Favia gravida*, conchas de moluscos gastrópodes (*Astraea* sp.) e algas coralináceas (*Porolithon pachydermum*). O peso total dos espécimes utilizados na análise geológica isotópica foi 800g em balança eletrônica digital. Esse trabalho foi executado no Departamento de Física da UFC.

Datações radiométricas foram realizadas nos setores médio e topo da “pedra do Garapirá” no lado à barlavento (ver Foto 01 do Anexo 4.5 para posição estratigráfica). Para avaliar uma possível correlação estratigráfica datou-se uma camada de topo do calcarenito, disposto na ilha do Cemitério. Para efeito de avaliação das hipóteses dispostas, utilizou-se uma revisão das datações feitas no calcarenito de Rocas, juntamente com os novos dados obtidos (TAB. 02).

**TABELA 02.** Áreas de amostragens de datações no calcarenito da ilha do Cemitério do Atol das Rocas (Atlântico Sul). Símbolos: \* = Amostras de Kikuchi & Leão (1997). # = Amostras de Gherardi & Bosence (2005). Legenda: NMM= nível médio do mar, m=metros.

	Datum (m NMM)
Gastrópode <i>Astraea</i> sp.	2,0 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,0 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	0,5 m
#Gastrópode <i>Astraea</i> sp.	1,65 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	1,8 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	1,5 m
#Alga Coralina	0,75 m

Os materiais recifais e dos *beachrocks* datados pelo método radiométrico descrito foram plotados na curva de variação do nível do mar no Quaternário para áreas costeiras do Nordeste do Brasil, proposta por Martin *et al.* (1985) e Bezerra *et al.* (2003), para verificação de aspectos paleoambientais e variações do nível do mar. Este procedimento metodológico visa obter dados para análise das Hipóteses 2, 3 e 6 (ver seção 1.5).

### 1.7.6.2. Morfologia numérica do Atol das Rocas

Fórmulas de cálculo das características da forma dos atóis foram desenvolvidas principalmente por Stoddart (1965). Tais atributos matemáticos permitem a comparação da morfologia dos atóis dos oceanos tropicais. Com os dados obtidos em campo, tais variáveis morfológicas, demonstradas a seguir, foram calculadas pela primeira vez para o Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial). Esta análise metodológica visa verificar se o complexo recifal de Rocas possui características geométricas semelhantes a outros atóis do mundo, auxiliando na avaliação das Hipóteses 1 e 7 (ver seção 1.5).

**Fator de Forma de Horton, F, é dado por:**

$$F = \frac{A_1}{L_1^2}$$

A<sub>1</sub>= área do Atol em milhas náuticas, L<sub>1</sub>=comprimento do eixo maior do Atol em milhas náuticas.

**Taxa de circularidade de Miller, Rc, é dado por:**

$$R_c = \frac{A_1}{A_2}$$

A<sub>1</sub>=área do Atol em milhas náuticas,

A<sub>2</sub>=área do círculo com o mesmo diâmetro do Atol.

**Taxa de alongamento de Schumm, Re, é dado por:**

$$R_e = \frac{D}{L_1}$$

D=diâmetro do círculo com a mesma área do Atol,

$L_1$ =comprimento do eixo maior do Atol em milhas náuticas.

### **Figura Geométrica regular mais adequada (*best-fit*)**

Estudos sugerem que os atóis têm forma circular ou elíptica (STODDART, 1965). Considerando o círculo como um caso especial de elipse, o último foi escolhido como base para o índice de forma. A área da elipse é dada por  $A_e = \pi ab$ , onde  $a$  é a metade do eixo maior e  $b$  é metade do eixo menor. O índice de elipcidade ( $I_e$ ) é dado por:

$$I_e = \frac{2a}{2b} \text{ ou } \frac{L_1}{2b}$$

$$b = \frac{A_1}{\pi [L_1/2]}$$

## 2. ARTIGOS



Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: Considerações sobre a classificação do recife biogênico

*Marcelo de Oliveira Soares<sup>1</sup>, Valesca Brasil Lemos<sup>2</sup>, Ruy Kenji Papa de Kikuchi<sup>3</sup>*

1 – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [bio\\_marcelo@yahoo.com.br](mailto:bio_marcelo@yahoo.com.br)

2 – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [valesca.lemos@ufrgs.br](mailto:valesca.lemos@ufrgs.br)

3 – Laboratório de Estudos de Recifes de Corais, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Geremoabo, s/n, 40170-020, Federação, sala 209C, Salvador, BA, Brasil. E-mail: [kikuchi@ufba.br](mailto:kikuchi@ufba.br)

**Resumo** O Atol das Rocas é considerado o único atol do Atlântico Sul Equatorial e um dos menores do mundo. Devido ao fato de não possuir corais como principais bioconstrutores e ter características morfológicas diferenciadas em relação a recifes do Caribe e Indo-Pacífico sua classificação como Atol pode ser considerada polêmica ao longo do século XX. Análises de campo e de fotografias aéreas foram realizadas para investigar as características do recife biogênico e discutir a classificação como Atol. Os resultados demonstram que existe uma série de características que confirmam a classificação na categoria de Atol e o assemelha a outros recifes de morfologia similar como forma elipsóide, desenvolvimento sobre montes vulcânicos, ilhas arenosas e maior largura do anel recifal a sotavento. Características diferenciadas incluem o anel recifal constituído predominantemente por algas calcárias, foraminíferos e gastrópodes vermetídeos; a laguna com profundidade máxima de 6m e restrita a uma pequena porção do recife; a presença de calcarenito em uma das ilhas e a presença de prováveis resíduos recifais (denominadas “rocas”) derivados de oscilações eustáticas no Neógeno.

*Palavras-chave:* Classificação, Atol, Rocas, Recifes

**Abstract** *Rocas Atoll, Equatorial South Atlantic: considerations about the classification of biogenic reef.* The Rocas Atoll is considered the only atoll in the Equatorial South Atlantic and one of the lowest in the world. Due to not have corals as major bioconstructors and have morphological differences from the Caribbean and Indo-Pacific reefs their classification as Atoll as may be considered controversial during the twentieth century. Field analysis and Aerial photographs were taken to investigate the characteristics of the biogenic reef and discuss the classification as Atoll. The results show that there are a number of characteristics that confirm the classification in the category of Atoll and similar to other reefs of same morphology as ellipsoid form, development in volcanic mountains, sand cays and greater width of the ring reef on the leeward. Differentiated features include ring reef consisting predominantly of calcareous algae, foraminifera and vermetid gastropods; lagoon with a maximum depth of 6m and restricted to a small portion of the reef, the presence of calcarenite on one of the islands and the probably presence of reef residues (called “rocas”) derived from eustatic fluctuations in the Neogene.

*Keywords:* Classification, Atoll, Rocas, Reefs

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os trabalhos geológicos de Darwin (1842), Dana (1853), Daly (1910), Davis (1920 e 1928), a morfologia clássica de um atol em formato circular com a presença de pequenas ilhas ao redor de uma laguna central se transformou em um relevo padrão nos trabalhos de geologia. Barry *et al.* (2007) comentam que os atóis são recifes oceânicos que possuem um aspecto anular, onde comumente se encontra uma laguna interna e ilhas formadas por depósitos arenosos inconsolidados do Holoceno.

Considerando a evolução dos atóis baseada nos efeitos eustáticos e hidro-isostáticos do nível do mar, observou-se que essa configuração é apenas um estágio temporário que existiu em uma pequena fração de tempo durante o Quaternário. Assim, a morfologia clássica dos atóis atuais, um conceito bastante reconhecido no meio

científico, só passou a ter essa configuração no Quaternário tardio. Os atóis recentes existem em diferentes províncias geológicas dos mares tropicais. Tais ambientes recifais comumente diferem significativamente em relação ao número, tamanho, continuidade e morfologia das ilhas (Dickinson 2004).

A teoria geológica mais famosa para a formação dos atóis é de Darwin (1842). Para este autor é necessário que um monte vulcânico sofra um rebaixamento em relação ao nível do mar e possua um crescimento coralíneo concomitante à subsidência. Estes ambientes são recifes de mar aberto, incluídos aqueles que se desenvolvem na plataforma externa. Uma característica bastante comum é a presença de uma laguna de 30 a 80 metros de profundidade em muitos recifes. A profundidade é provavelmente dependente do diâmetro do atol. No caso ideal a laguna está totalmente rodeada de uma coroa recifal. À exceção dos atóis bem pequenos, que somente possuem centenas de metros ou poucos quilômetros e que, excepcionalmente, podem estar totalmente fechados, as lagoas dos atóis se comunicam com o oceano através de canais (Purdy & Winterer 2006).

Na história geológica recente observam-se 425 atóis. Desses, 27 estão localizados no Oceano Atlântico, sendo 26 situados no mar do Caribe. O único atol do Atlântico Sul está situado na costa do Brasil: Atol das Rocas (Kikuchi 1994).

O Atol das Rocas foi descoberto em 1503 devido ao naufrágio da nau de Gonçalo Coelho. A primeira menção por um naturalista ocorreu no final do século XIX, em 1880, por Jean de Léry, que fez uma breve e muito tênue descrição à distância do Atol, quando passava pelas suas cercanias no retorno à França de sua viagem ao Brasil (Vallaux 1940). Apenas com Andrade (1959) Rocas recebe sua primeira descrição científica mais aprofundada, apesar de baseada numa estadia de apenas um dia no Atol. Ele descreveu a morfologia do platô recifal, da laguna, de algumas piscinas, os cálices remanescentes e o arenito de praia em uma das ilhas.

Há várias décadas são realizadas pesquisas científicas no único Atol do Atlântico Sul Equatorial Ocidental, entretanto uma série de aspectos de sua classificação necessita ser mais bem elucidado. A classificação do Atol é considerada polêmica e foram realizadas várias classificações por diversos autores no século XX (Vallaux 1940, Andrade 1959, Ottman 1963, Kikuchi 1994, Kikuchi & Leão 1997, Gherardi & Bosence 1999). Assim, este trabalho tem por objetivo contribuir para a classificação do recife biogênico de Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

## 2.MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1.Área de estudo

O Atol das Rocas está localizado no topo de uma cadeia de montanhas submarinas no Oceano Atlântico Sul, cuja base encontra-se a 4000 m de profundidade no leito oceânico, a 3°51'S Latitude e 33°49'W Longitude, distante 266 km da cidade de Natal e 150 km, a oeste, do arquipélago de Fernando de Noronha, no Nordeste Brasileiro (Kikuchi & Leão 1997, Gherardi & Bosence 2005).

O crescimento recifal do Atol ocorreu sobre uma base vulcânica situada em um alinhamento de montes submarinos que consistiriam numa ramificação da dorsal meso-oceânica. Damuth & Palma (1979) e Gorini (1981) abordaram a morfologia desse alinhamento de montes submarinos, que o próprio Gorini (1981) nomeia como Zona de Fratura de Fernando de Noronha.

Os ventos de leste e sudeste são predominantes ao longo do ano com uma frequência de 45% e velocidades variando entre 6,0 a 10,0 m/s. Estes parâmetros possuem relativa sazonalidade: nos meses de inverno (de junho a agosto), observa-se 35% para ventos de SE e 15% para E, com velocidades variando entre 11,0 e 15,0 m/s; para o verão (de dezembro a abril), a frequência fica em torno de 20% para os ventos SE e E, com velocidade frequentemente acima de 20,0 m/s (Kikuchi & Leão 1997).

A temperatura da água do mar possui média de 27°C, podendo chegar a 42°C nas piscinas, com salinidade na superfície variando entre 36 e 37. O regime de mesomareis é semidiurno, com uma variação máxima de 2,7m, deixando exposto o platô recifal em maré de sizígia baixa (Gherardi & Bosence 1999).

### 2.2.Trabalhos de campo e laboratório

Os trabalhos de campo foram realizados na REBIO (Reserva Biológica) Atol das Rocas durante o período de 30 de janeiro a 25 de fevereiro de 2008. O tratamento do aspecto geral do Atol das Rocas requereu diferentes etapas como interpretação de imagens aéreas, confecção de mapas geológicos da área e visualização “*in situ*” das características morfológicas que auxiliam na classificação do recife.

As observações do recife foram efetuadas durante caminhadas no topo do recife, exposto nas marés baixas, e durante mergulhos, em apnéia e autônomo, nas partes submersas. Neste segundo deslocamento, utilizou-se um bote inflável. Os pontos de observação foram inicialmente plotados no mapa publicado por Kikuchi (1994) e georeferenciados. Esses dados foram completados com documentação fotográfica detalhada e com amostragens geológicas da estrutura recifal.

As observações foram feitas principalmente com equipamento de respiração autônoma “SCUBA” e também em apnéia ou “snorkeling”. Os dados foram registrados a lápis em placas de PVC branco quando referentes a dados subaquáticos. Na parte aérea foram realizados mapeamentos e perfis geológicos utilizando GPS. Uma ampla revisão bibliográfica foi realizada para discutir a classificação do considerado único Atol do Atlântico Sul Equatorial.

### **2.3. Análise de dados morfológicos**

Fórmulas de cálculo das características morfológicas geométricas dos atóis foram desenvolvidas principalmente por Stoddart (1965). Tais atributos matemáticos permitem a comparação da morfologia dos atóis dos oceanos tropicais. Baseado nas equações desenvolvidas preteritamente (Stoddart, 1965), foram calculados os índices F (Fator de Forma de Horton), Rc (Circularidade), Re (Razão de Alongamento) e Ie (índice de elipticidade) para o Complexo Recifal de Rocas. Tal procedimento visa averiguar a hipótese de sua morfologia ser semelhante à de outros atóis do Atlântico e do Indo-Pacífico.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O Complexo Recifal de Rocas apresenta em fotografias aéreas uma estrutura geométrica de elipsóide, praticamente circular no seu eixo maior E-W com aproximadamente 3,7 km, sendo o menor eixo na disposição georeferenciada N-S com 2,5 km. Os canais, que conectam o interior do recife ao oceano adjacente, estão dispostos nas porções N e NW. Pode-se observar a presença de ilhas arenosas resultantes de acumulação sedimentar a sotavento e uma laguna restrita a uma pequena porção do recife (NE), não se situando na porção central. A parte central do recife é

dominada por uma areia carbonática biogênica resultante dos processos denudacionais no recife sendo classificado como depósito arenoso intermarés (Figura 1).

### **Figura 1.**

O Recife biogênico de Rocas pode ser considerado um Atol oceânico pelas seguintes características: possui uma plataforma elíptica a circular; tem um anel recifal bem constituído com algas calcárias (Fig. 2A); desenvolveu-se no topo de montes vulcânicos submersos cuja base encontra-se a mais de 4000 m de profundidade no assoalho oceânico; possui uma laguna rasa (Fig. 2C) e ilhas arenosas no lado do platô recifal (Figs. 2B e 2D) oposto ao que recebe o vento predominante (como nos atóis caribenhos) e uma maior largura do anel recifal na porção barlavento.

### **Figura 2.**

Gherardi & Bosence (1999) diferenciaram características do Atol das Rocas em relação aos recifes do Caribe e Indo-Pacífico tais como: não possuir corais como principais bioconstrutores e uma laguna de baixa profundidade estando restrita a uma pequena porção da área recifal.

Dickinson (2004) aborda que os estudos dos efeitos eustáticos e hidro-isostáticos realizados nos níveis do mar do Quaternário tardio no Oceano Pacífico Tropical indicam que a configuração moderna dos atóis como um recife anular emergente é uma morfologia transitória que não se desenvolveu até o Holoceno tardio na Era Cenozóica.

Segundo a teoria de Darwin (1842), a origem dos atóis seria: “um abaixamento geológico e lento de uma ilha na qual em volta houveram recifes em franjas e com o crescimento dos corais formaria o atol”. De acordo com esse conceito clássico, o Atol das rocas não é considerado um verdadeiro atol devido a sua base de formação não ser de corais, e sim predominantemente de algas calcárias. Algumas características deste Atol fogem do padrão de outros atóis no mundo, tal como a laguna que na baixa-mar não chega a ocupar todo o interior do anel coralino. Na baixa-mar, a laguna fica reduzida a um corpo d'água onde a profundidade não passa de 3 metros. Considerando essa característica, Rocas é um atol incompleto, ou se admite que é um atol em evolução e muito recentemente formado. As lagunas dos Atóis do Pacífico possuem grandes profundidades (>10m), independente da dinâmica das marés (Vallaux 1940).

Charles Darwin durante sua famosa viagem a bordo do Beagle (1831-1836) elaborou a teoria dos recifes de coral, incluindo aspectos da gênese dos atóis. Desde o trabalho de Darwin, em 1842, até a década de 40 do século passado, persistiram duas correntes a respeito da evolução dos recifes biogênicos: I) aquelas teorias que postulam

a necessidade das variações eustáticas com relação ao substrato do recife, para que ele possa se desenvolver e II) aquelas para as quais não há necessidade dessa mudança no nível marinho.

O Grupo 1 inclui a Teoria da subsidência (Darwin 1842): “primitivo recife-barreira anular, que verticalmente cresceu à medida que suas fundações se rebaixavam de maneira contínua ou intermitente” e a Teoria do controle da glaciação (proposta por Daly 1910) enfatiza que o fenômeno da glaciação pleistocênica seria responsável pela formação e arrasamento dos recifes pela exposição subaérea, provocando dissolução na construção e amoldamento da geomorfologia recifal.

No Grupo 2 encontra-se a teoria da plataforma antecedente (proposta por Hoffmeister & Ladd 1944) que propõe que numa superfície localizada em profundidade adequada, dentro da zona de crescimento dos recifes, caso as condições ecológicas permitam, recifes se desenvolverão até a superfície do mar, sem que ocorra eustasia.

Toda litosfera oceânica está sujeita ao mecanismo de subsidência térmica, à medida que se afasta das cordilheiras meso-oceânicas (Allen & Allen 1990) e foi esse o mecanismo segundo o qual cresceram os atóis do Pacífico (Scoffin & Dixon 1983).

Considerando aspectos genéticos para classificação do recife a ocorrência de subsidência no Atol das Rocas foi comentada por diferentes autores. Andrade (1959) e Ottman (1963) sugeriram em seus estudos geológicos a provável ausência de subsidência no substrato de Rocas. Porém, Kikuchi (1994) argumenta após estudos sísmicos e de testemunhos, que é admissível uma subsidência à taxa de 0,19mm/ano desde pelo menos 120ka AP.

Os blocos residuais do recife no setor à barlavento da superfície do Atol das Rocas (Figs. 3A, 3B e 3C) e a existência do calcarenito de praia na ilha do Cemitério (Fig. 3D) não são elementos característicos de Atóis que invalidariam a classificação de Rocas como Atol, como afirmaram Andrade (1959) e depois Ottman (1963), em apoio às idéias de Vallaux (1940). Entretanto, no trabalho de Stoddart (1969) observa-se que tais características não são diagnósticas ao se adotar uma classificação morfológica, sendo as características-chave: a forma do recife, a presença de laguna, as ilhas a sotavento e o desenvolvimento sobre montes vulcânicos.

### **Figura 3.**

Os parâmetros geométricos, analisados para o recife de Rocas, sugerem valores que estão inseridos na faixa de amplitude para os atóis do Indo-Pacífico e Caribe (Tabela 01). Observa-se que este recife encontra-se com um baixo nível de elipticidade

(Ie) e no espectro de valores sugeridos, o que corrobora a hipótese de uma Forma de Atol. Stoddart (1965) considera o índice de elipticidade um parâmetro padrão para comparação dos atóis dos oceanos tropicais.

#### **Tabela 01.**

Darwin (1842) abordou que não existiam atóis verdadeiros no Oceano Atlântico. Davis (1928) classificou Rocas como “*a slightly emerged bank atoll, the only one of this kind in the open Atlantic*”. Vallaux (1940) atribuiu a categoria de “*almost-atoll*” devido classificá-lo como um recife-barreira anular e sua laguna ocupar uma pequena área. Kikuchi (1994) e Gherardi & Bosence (2005) classificaram o recife biogênico como o único Atol do Atlântico Sul Equatorial.

## **4. CONCLUSÕES**

O problema da classificação do Atol das Rocas decorre da disputa entre um critério morfológico versus genético. Outra questão é o fato das principais teorias de formação e de classificação de recifes coralíneos serem baseadas em recifes do Indo-Pacífico e só mais recentemente no Atlântico, principalmente no Caribe. A elaboração de um sistema de classificação genética para o Atol das Rocas é de difícil execução devido sua formação e crescimento ser resultante de um fenômeno multivariado de eustasia, subsidência, batimetria e crescimento dos bioconstrutores, o que dificulta a integração dos dados. Os critérios morfológicos (geométricos e geológicos) são aplicáveis de maneira prática e permitem a classificação do recife biogênico de Rocas como um Atol verdadeiro.

## **5. AGRADECIMENTOS**

O presente artigo faz parte da tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geociências (UFRGS) intitulada “Geobiologia do Atol das Rocas, Atlântico Sul”. M.O Soares agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico) pela concessão de bolsa de Doutorado. A Petrobras e Fundação SOS Mata Atlântica pelo financiamento da pesquisa dos trabalhos de campo. A Força Aérea Brasileira (FAB) pela obtenção de imagens aéreas do único Atol do Atlântico Sul. Ao Icmbio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) pela concessão de licença de pesquisa (número 12228-1) e apoio nas atividades de campo (principalmente

a Maurizélia Brita, coordenadora da Reserva Biológica Atol das Rocas). Ao Biólogo Carlos Augusto Oliveira Meirelles pelo auxílio na coleta e fotografias subaquáticas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen P.A. & Allen J.R. 1990. *Basin analysis – Principles and Applications*. Blackwell Scientific Publications. 451pp.

Andrade G.O. 1959. O recife anular das Rocas (Um registro das recentes variações eustáticas no Atlântico equatorial). *Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros.*, **12**: 29-61.

Barry S.J., Cowell P.J., Woodroffe C.D. 2007. A morphodynamic model of reef-island development on atolls. *Sedimentary Geology.*, **197**: 47-63.

Daly R.A. 1910. Pleistocene glaciation and the coral reef problem. *Am. J. Sci [Ser 4].*, **30**: 297-308.

Damuth J.E. & Palma J.C. 1979. Geomorfologia do fundo atlântico equatorial oeste. *Geomorfologia da Margem continental Brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/DINTEP, **7**: 53-88.

Dana J.D. 1853. *On Coral Reefs and Islands*. Putnam. 300pp.

Darwin C. 1842. *The structure and Distribution of Coral reefs*. Smith Elder. 256pp.

Davis W.M. 1920. The small islands of almost-atolls. *Nature.*, **105**: 292-293.

Davis W.M. 1928. The coral reef problem. *Am. Geogr. Soc. Spec. Pap.*, **9**: 1– 596.

Dickinson W.R. 2004. Impacts of eustasy and hidro-isostasy on the evolution and landforms of Pacific atolls. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.*, **213**: 251-269.

Gherardi D.F.M. & Bosence D.W.J. 1999. Modeling of the ecological succession of encrusting organisms in recent coralline-algal frameworks from Atol das Rocas, Brazil. *Palaios.*, **14**:145-158.

Gherardi D.F.M. & Bosence D.W.J. 2005. Late Holocene Reef growth and relative sea-level changes in Atol das Rocas, equatorial South Atlantic. *Coral Reefs.*, **24**: 264-272.

Gorini M.A. 1981. The tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern of Brazil. *Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na*

---

*avaliação do potencial de recursos minerais*. H.E. Asmus. Rio de Janeiro, PETROBRAS, CENPES, DINTEP., **9**: 11-116.

Hoffmeister J.E. & Ladd H.S. 1944. The antecedent platform theory. *J Geol.*, **52**:388-402.

Kikuchi R.K.P. 1994. *Geomorfologia, Estratigrafia e Sedimentologia do Atol das Rocas (REBIO-IBAMA/RN)*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 144p.

Kikuchi R.K.P. & Leão Z.M.A.N. 1997. Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): an atoll built primarily by coralline algae. *In: Int. Proc. Coral Reef Symposium, 8<sup>th</sup>*, Panamá, v. 1, 731- 736p.

Ottman F. 1963. “L’atol das Rocas” dans l’Atlantique sud tropical. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique.*, **2**: 101-107.

Purdy E.G. & Winterer E.L. 2006. Contradicting Barrier Reef relationships for Darwin’s evolution of reef types. *Int. J. Earth. Sci (Geol Rundsch).*, **95**: 143-167.

Scoffin T.P. & Dixon J.E. 1983. The distribution and structure of coral reefs: one hundred years since Darwin. *Biological Journal of the Linnean Society.*, **20**: 11-38.

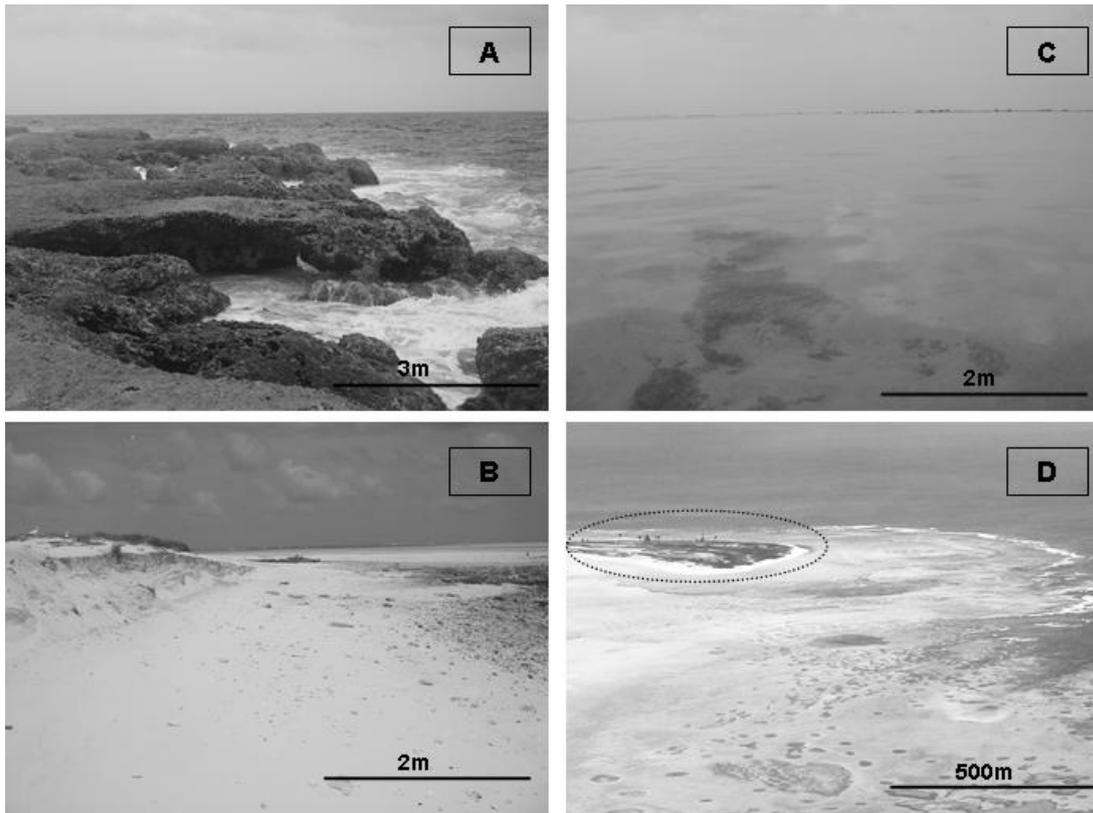
Stoddart D.R. 1965. The Shape of Atolls. *Marine Geology.*, **3**: 369-383.

Stoddart D.R. 1969. Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biological Reviews.*, **20**: 433-498.

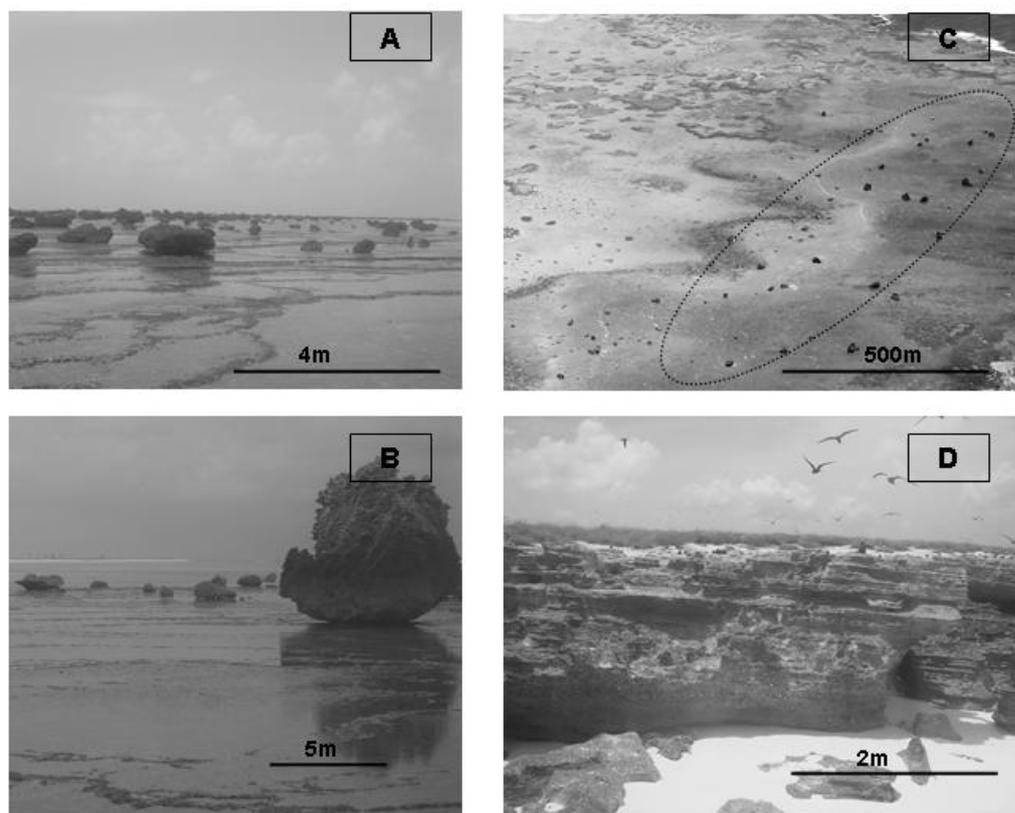
Vallaux C. 1940. La formation atollienne de Rocas (Brésil). *Bulletin de L’Institut Océanographique.*, **37**: p. 1-8.



**Figura 1.** Zonas geomorfológicas do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial) mostrando a forma elíptica, os canais (CA), Frente recifal (FR), ilhas arenosas (IA), Depósito arenoso intermarés (DAI), Laguna (LA), Resíduos de Recifes (RRS) e a direção predominante do vento que determina as posições a barlavento e sotavento. Imagem modificada a partir de fotografia aérea obtida pela Força Aérea Brasileira (FAB).



**Figura 2.** Feições morfológicas do Atol das Rocas que auxiliam na classificação do ambiente recifal. (A) Anel recifal bioconstruído por algas calcárias. (B) Visão da Ilha do Cemitério a Barlavento. (C) Visão da laguna rasa que se forma a NE no Recife onde se observa os sedimentos do fundo e parte de um recife em mancha (“*patch reef*”). (D) Foto aérea da Ilha do Farol (marcada pela elipse) mostrando a parte interna escura que representa a vegetação terrestre.



**Figura 3.** Elementos geomorfológicos do complexo recifal de Rocas que invalidariam a classificação como Atol oceânico, segundo autores citados no texto. (A) Resíduos recifais dispostos no lado à barlavento do recife. (B) Foto mostrando o maior dos blocos recifais que ocorrem na área. Imagem obtida em maré baixa. (C) Imagem aérea mostrando a zona de ocorrência das “Rocas” (resíduos de recife) no setor à barlavento (marcadas pela elipse). (D) Calcarenito (*beach rock*) ocorrente na ilha do Cemitério à barlavento.

**Tabela 01.** Parâmetros morfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul. Dados para Indo-Pacífico e Caribe segundo Stoddart (1965)\*.

<b>Atóis analisados/ Índices morfológicos</b>	<b>F (Horton)</b>	<b>Rc (Miller)</b>	<b>Re (Schumm)</b>	<b>Ie (índice de elipsidade)</b>
Atol das Rocas, Atlântico Sul	0,55	0,20	0,84	1,43
Atóis do Indo-Pacífico e Caribe*	0,1 – 0,8	0,1-1,0	0,3-1,0	1,02-7,91

---

Aspectos Biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial

*Marcelo de Oliveira Soares<sup>1</sup>, Valesca Brasil Lemos<sup>2</sup>, Ruy Kenji Papa de Kikuchi<sup>3</sup>*

1 – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [bio\\_marcelo@yahoo.com.br](mailto:bio_marcelo@yahoo.com.br)

2 – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [valesca.lemos@ufrgs.br](mailto:valesca.lemos@ufrgs.br)

3 – Laboratório de Estudos Recifais, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Geremoabo, s/n, 40170-020, Federação, sala 209C, Salvador, BA, Brasil. E-mail: [rkikuchi@cpgg.ufba.br](mailto:rkikuchi@cpgg.ufba.br)

**Resumo** Análises biogeomorfológicas e de mapeamento das unidades recifais foram realizadas no único Atol do Atlântico Sul Equatorial para a compreensão da dinâmica do relevo deste recife oceânico. O zoneamento demonstra a presença dos seguintes compartimentos geoambientais: frente recifal, fundo adjacente, margem recifal, platô recifal, anel recifal, resíduos de recifes, laguna recifal, depósito arenoso intermarés, canais, piscinas, poças-de-maré e as ilhas arenosas. Os resultados mostram que uma variedade de organismos atua no Atol em grupos de processos como: controle de erosão nas ilhas arenosas, bioproteção, bioerosão, cimentação de areia carbonática biogênica, produção de sedimentos biodetríticos e bioconstrução. Tais processos biogeomorfológicos geram algumas das características únicas do Atol das Rocas.

*Palavras-chave:* Atol, Rocas, Biogeomorfologia

**Abstract** *BIOGEOLOGICAL ASPECTS OF ROCAS ATOLL, EQUATORIAL SOUTH ATLANTIC* Biogeomorphological analysis and mapping of the reef units in the only Atoll from the Equatorial South Atlantic were held for understanding the dynamics of ocean reef. The zoning shows the presence of the following environmental compartments: reef front, adjacent bottom, reef margin, reef flat, reef ring, reef residues,

lagoon, sand flat, reef pass, pools, puddles-of-tide and the sand cays. The results show that a variety of organisms groups in Atoll that act in processes groups such: control of erosion on sand cays, bioprotection, bioerosion, cementation of biogenic carbonate sand, production of biodetritic sediments and bioconstruction. Such biogeomorphological processes generate some of the unique characteristics of Rocas Atoll.

*Keywords:* Atoll, Rocas, Biogeomorphology

## 1. INTRODUÇÃO

A Biogeomorfologia considera as relações entre os grupos de processos biológicos e geológicos, e o relevo que resulta dessa interação. Essa abordagem é bastante importante, principalmente em recifes coralíneos onde os organismos contribuem na geomorfologia recifal através de processos geobiológicos. Assim, em muitos sistemas carbonáticos a relação entre as alterações do relevo e os processos bioerosivos e de bioconstrução devem ser considerados. A Biogeomorfologia é considerada um dos campos da Geobiologia (Figura 01). A Geobiologia é baseada na premissa de que as atividades biológicas e geológicas são integradas, e que as complexas interações entre os sistemas bióticos e abióticos são variáveis na escala temporal e espacial (Spencer & Viles 2002).

### **Figura 01.**

Existem quatro processos biogeomorfológicos fundamentais para a compreensão de recifes de coral: a bioerosão, a bioturbação, a bioproteção e a bioconstrução. Tais processos não são mutuamente exclusivos, sendo suas interações variadas, complexas e dinâmicas (Naylor 2005).

Dentro de um ecossistema recifal coralíneo pode-se perceber que a produção de esqueletos de carbonato de cálcio forma a bioconstrução (o próprio recife). Uma grande quantidade de organismos ataca a estrutura através de processos ativos de bioerosão (envolvendo desde pequenos microorganismos a animais como peixes e moluscos) produzindo um suprimento de sedimento carbonático que é freqüentemente submetido à bioturbação. O próprio recife possui mecanismos de proteção, como bioproteção, que retarda os processos erosivos. Biofilmes na superfície das rochas podem ter vários papéis na alteração da superfície recifal (Naylor *et al.* 2002) como em recifes de franja, de barreira e atóis oceânicos.

O Atol das Rocas cresce na parte leste do topo de um monte submarino no Oceano Atlântico (Kikuchi & Leão 1997). Diversos trabalhos sobre Geomorfologia foram realizados no Atol, dentre os principais podem ser citados: Vallaux (1940), Andrade (1959), Ottman (1963), Kikuchi (1994), Kikuchi & Leão (1997), Gherardi & Bosence (1999) e Gherardi & Bosence (2005). Entretanto, estes estudos não realizaram a integração dos processos biológicos aos geológicos como preconiza a emergente área científica da Biogeomorfologia. Assim, os objetivos deste trabalho são: 1) Identificar os compartimentos biogeomorfológicos do Atol e o papel funcional das espécies na modelagem do relevo recifal; 2) Avaliar a interação entre os processos de bioturbação, bioerosão, bioconstrução e bioerosão no Atol das Rocas em um modelo biogeomorfológico integrado.

## **2.MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1.Área de estudo**

A região Equatorial do Oceano Atlântico compreende a plataforma continental e planície abissal do Norte do Ceará ao Sul de Pernambuco. Nesta área localiza-se a cadeia norte do Brasil e a cadeia de Fernando de Noronha, da qual também faz parte o Atol das Rocas. Denominada de Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), esta região é caracterizada por baixa pressão atmosférica, ventos fracos e alta precipitação, devido à influência dos dois sistemas de alta pressão localizados nas regiões subtropicais dos dois hemisférios, os anticiclones dos Açores ao Norte e o de Santa Helena no Sul (Schobbernhares 1984).

A cadeia de Fernando de Noronha está representada pelo Arquipélago de Noronha, Atol das Rocas, e vários bancos submarinos como Grande, Sírius, Guará e o Drina no extremo oeste (Mabesoone & Coutinho 1970).

Esta cadeia situa-se no sopé continental, composta por um segmento de montes, com direção Leste-oeste, que se elevam de profundidades superiores a 4000 m até à superfície. Estende-se do talude continental ao arquipélago de Fernando de Noronha que é o topo de um monte submarino, cuja base tem um diâmetro de aproximadamente 60km. Alguns montes caracterizam-se por apresentarem aplainados devido à erosão marinha, formando bancos tipo “guyots” (Larrazábal & Oliveira 2003). O Atol das Rocas é um dos bancos da cadeia com uma pequena parte emersa (Kikuchi, 1994).

O Atol das Rocas está localizado no topo de uma cadeia de montanhas submarinas no Oceano Atlântico Sul, cuja base encontra-se a 4000 metros de profundidade no leito oceânico, a 3°51'S Latitude e 33°49'W Longitude, distante 266 km da cidade de Natal e a 150 km a oeste do arquipélago de Fernando de Noronha, no Nordeste Brasileiro (Echeverría & Pires 1997, Kikuchi & Leão 1997). O substrato é composto, principalmente, por algas calcárias incrustantes, foraminíferos e moluscos vermetídeos (Gherardi & Bosence 1999).

Os ventos de leste e sudeste são predominantes ao longo do ano com uma frequência de 45% e velocidades variando entre 6,0 a 10,0 m/s. Estes parâmetros possuem relativa sazonalidade: nos meses de inverno (de junho a agosto), observa-se 35% para ventos de SE e 15% para E, com velocidades variando entre 11,0 e 15,0 m/s; para o verão (de dezembro a abril), a frequência fica em torno de 20% para os ventos SE e E, com velocidade frequentemente acima de 20,0 m/s (Kikuchi & Leão 1997).

A temperatura da água do mar possui média de 27,0 °C, podendo chegar a 42 °C nas piscinas, com salinidade na superfície variando entre 36,0 ‰ e 37 ‰. O regime de marés é semidiurno e mesomarés, com uma variação máxima de 2,7m, deixando exposto o platô recifal em marés baixas de sizígia (Gherardi & Bosence 1999).

## **2.2. Trabalhos de campo e laboratório**

As análises de campo foram realizadas na REBIO (Reserva Biológica) Atol das Rocas durante o período de 30 de janeiro a 25 de fevereiro de 2008. O tratamento do aspecto geral do Atol requereu diferentes etapas como interpretação de imagens aéreas e análise das características biogeomorfológicas em diferentes compartimentos.

A análise biogeomorfológica de coleta de dados foi realizada em diferentes compartimentos como: frente recifal, margem recifal, fundo adjacente, platô recifal, anel recifal, resíduos de recifes, laguna recifal, depósito arenoso intermarés, canais, piscinas, poças-de-maré e as ilhas arenosas de areia carbonática biogênica (Figuras 2 e 3).

### **Figura 2.**

### **Figura 3.**

As observações e coletas no complexo recifal foram efetuadas durante caminhadas no platô recifal, exposto nas marés baixas, e durante mergulhos, em apnéia e autônomo, nas partes submersas. Os pontos de observação foram inicialmente

plotados e georeferenciados. Os dados analisados nesses pontos de descrição foram: as zonas geomorfológicas do Atol, os organismos bioconstrutores, bioerosivos, bioprotetores e bioturbadores dos sedimentos no Atol. Esses dados foram completados com documentação fotográfica detalhada, amostragens dos sedimentos e do recife.

As observações foram feitas principalmente com equipamento de respiração autônoma “SCUBA” e também em apnéia ou “snorkeling”. Os dados foram registrados a lápis em placas de PVC branco quando referentes a dados subaquáticos. Na parte aérea foram realizados mapeamentos e perfis geológicos utilizando GPS.

A partir das amostras recifais foram confeccionadas lâminas petrográficas. A análise microscópica foi realizada com o auxílio de microscópio estereoscópico ZEISS e microscópio óptico na UFRGS.

### 3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Compartimentos biogeomorfológicos

##### Frente Recifal

Na parte externa do Recife, contígua à frente recifal, o fundo oceânico foi denominado por Kikuchi (1994) como fundo adjacente, sendo descrito em associação à frente recifal. À frente recifal estende-se da borda externa da margem recifal (Figura 4A), que na baixa-mar fica cerca de 1,5m acima do nível médio do oceano, até o fundo adjacente, em profundidades inferiores a 10m. A parede da frente recifal inicia-se como uma escarpa abrupta de cerca de 2 metros. Pode-se observar a continuidade do *spur-and-groove* ao longo da frente recifal (Figura 4C). Com o afastamento do atol ocorre a diminuição da estrutura recifal e o aumento de áreas de sedimento arenoso-cascalhoso em áreas de fendas na estrutura rochosa. Verificou-se a presença de fortes correntes de fundo próximo à frente recifal podendo-se caracterizar a zona como de alta energia no recife.

##### Figura 4.

Kikuchi & Leão (1997) comentam que à frente recifal é mais extensa na porção W do atol e sua extensão horizontal a partir da borda externa da margem recifal pode atingir até 600m com declividade aproximada de 1°15'. Ainda na porção W, apresenta um padrão denteado perpendicular ao perímetro do recife. Segundo Guilcher (1988) esta feição é bem comum em recifes Indo-Pacíficos e Caribenhos. Kikuchi (1994) observou

que, em determinados locais, no lado NW e N-NE pode ser verificado que o denteamento é uma sucessão de colunas que coalescem formando o topo recifal e que são gradativamente menores à medida que se afastam da borda do recife. Já as zonas intermediárias, intercolunares, estão preenchidas por sedimentos arenosos (Ottman 1963, Kikuchi & Leão 1997). Nos lados NE e SE, à frente recifal encontra-se com topografia bem abrupta constituindo uma escarpa de aproximadamente 10 m de profundidade, sendo que a partir deste ponto até 15 m, freqüentemente encontram-se depósitos sedimentares grossos de sopé de encosta.

Nos lados SW e NW observando-se a superfície da frente recifal encontram-se feições aproximadamente hemisféricas, sendo recobertas com algas clorofíceas. Diversos corais escleractíneos como *Siderastrea stellata*, *Porites* sp. e *Montastrea cavernosa* são encontrados nesse compartimento geoambiental atuando na bioconstrução, porém comumente sua distribuição é esparsa.

Nesta zona biogeomorfológica atuam macroalgas e zoantídeos no processo de bioproteção contra o impacto das ondas e correntes. Organismos bioerosivos como os peixes, esponjas, sipunculídeos e poliquetas são bastante comuns. Uma extensa bioconstrução de algas calcárias, vermetídeos e de corais tem um forte papel biogeomorfológico acrescentando carbonato de cálcio à estrutura recifal.

### **Fundo Adjacente**

No Atol das Rocas, mais especificamente na sua porção oeste, o fundo caracteriza-se por um substrato de areia carbonática com presença de elevações de construções recifais isoladas com aproximadamente de 1,5 m de altura com papel construtivo na biogeomorfologia recifal. Segundo Kikuchi (1994) as dimensões horizontais desses recifes podem variar de menos de 1 m até cerca de 5 m de largura e comprimento de até 10 m. O mesmo autor observa que esses recifes são alongados na direção E-W e são prolongamentos da feição denteada da frente recifal. Estudos sedimentológicos (Kikuchi 1994) indicaram pra superfície arenosa a presença de fácies de formas de leito onduladas com cristas lineares. No lado E e SE a presença de um terraço de topografia bastante plana e horizontal, a uma profundidade de 15 m, é possivelmente o topo de plataforma que serve de substrato ao Atol das Rocas.

Neste compartimento há pouca ação de organismos bioprotetores devido à dificuldade de fixação das larvas e de sobrevivência. Há impacto significativo de peixes bioerosivos, principalmente do gênero *Sparisoma* spp. que tem atuação direta na

bioerosão, pois atuam como organismos raspadores retirando fragmentos da estrutura recifal.

### **Margem Recifal**

Acompanhando a borda externa do recife observa-se a margem constituída de um alinhamento de convexidades. A largura é variável podendo atingir cerca de 5 m, e altura de até 0,5 m acima da superfície contígua do platô recifal.

Um aspecto biogeomorfológico fundamental é a presença da crista algálica, construída por algas coralináceas e gastrópodes vermetídeos (bioconstrutores) que apresenta um aspecto geral bem maciço, feição praticamente contínua e que forma a margem recifal.

Durante os períodos de baixa-mar a margem fica exposta ao ambiente aéreo. A área é geomorfologicamente e funcionalmente muito importante devido dissipar a energia das ondas vindas do oceano Atlântico. As macroalgas têm papel fundamental em recobrir a superfície recifal e diminuir os processos denudacionais.

### **Platô recifal**

Tal compartimento geoambiental é caracterizado por uma superfície aplainada da parte superior e interna do recife, estando contígua à margem recifal, e fica acima do nível do mar durante os períodos de baixa-mar. No platô recifal se encontram feições como os canais, poças-de-maré, as piscinas e as ilhas arenosas. Segundo Kikuchi (1994) e Kikuchi & Leão (1997) o platô compreende ainda o anel recifal e o depósito arenoso ( fácies sedimentar mais comum na porção interna do recife). No platô recifal é bastante comum à presença das macroalgas *Digenia simplex* e *Gelidiella acerosa* que atuam na bioproteção (Figura 5B).

### **Figura 5.**

### **Anel Recifal**

Na faixa periférica bioconstruída que delimita a parte interna do recife encontra-se o anel recifal. Segundo Kikuchi (1994) e Kikuchi & Leão (1997) o anel é circundado pela margem recifal e circunscribe o depósito arenoso e a laguna. Pode-se subdividir o anel nos arcos à sotavento e barlavento.

Pode-se observar em relação aos aspectos de bioconstrução que algas coralinas incrustantes (*Lythoporella* sp., *Lythophyllum* sp., *Sporolython* sp. e, principalmente,

*Porolithon pachydermum*) além de gastrópodes vermetídeos são os principais contribuintes da massa carbonática (Figura 06A). O crescimento destes bioconstrutores ocorre na forma de cristas algálicas lineares, com alguns centímetros de largura, contínuas ou segmentadas. O entrelaçamento das cristas algálicas leva a formação de poças-de-maré com presença de corais escleractíneos como *Favia gravida* e *Siderastrea stellata* e de depósitos de fundo arenoso-cascalhoso. Estas feições sedimentares apresentam-se perpendiculares à direção da movimentação da corrente que atravessa o recife.

### **Figura 6.**

#### **Resíduos De Recifes**

No setor a barlavento, nas posições E e SE do recife, encontram-se os cálices ou “rocas”, que são resquícios de uma estrutura mais elevada do recife em níveis de mar alto. Essas estruturas residuais são oriundas de um recife ajustado a um nível topograficamente mais elevado, que durante a descida do nível do mar sofreu processos erosivos e de intemperismo constituindo uma plataforma de abrasão pretérita. Tais cálices possuem algas coralinas incrustantes, gastrópodes vermetídeos e o foraminífero *Homotrema rubrum* atuando na bioconstrução. Essas rocas (ou cálices) são evidências de uma posição de nível eustático mais elevado do que o atual e dos processos biogeomorfológicos holocênicos.

#### **Depósito Arenoso Intermarés**

Andrade (1959) e Ottman (1963) comentam sobre a presença de uma “laguna muito rasa”, já Kikuchi (1994) aborda que a maior parte deste compartimento geoambiental pode ser descrito como depósito arenoso. O termo depósito arenoso intermarés faz menção a presença de sedimento inconsolidado com presença de formas de leito onduladas (“*ripple marks*”) derivados da dinâmica da maré (Figura 4B). Nota-se a presença de uma marcante assimetria, com cristas descontínuas e arqueadas. Kikuchi (1994) aborda que a transição do anel recifal para o depósito arenoso ocorre de maneira gradual, em termos de profundidade. Na parte NE o anel recifal passa diretamente para a laguna, observando-se a ausência do depósito arenoso.

Ao longo do depósito arenoso a planície de sedimento inconsolidado é interrompida pela presença de cristas algálicas. Biogeomorfológicamente observa-se a presença da alga calcárea *Porolithon pachydermum* e de Vermetídeos como

bioconstrutores. Cnidários como *Favia* sp., *Zoanthus sociatus* e *Porites* sp. atuam na bioproteção e na bioconstrução desta crista algálica. Importantes processos de bioturbação nos sedimentos são gerados por poliquetas (Figura 5C), nematódeos e moluscos que vivem neste sedimento constituindo a infauna bentônica.

### Canais

No anel recifal podem ser encontradas interrupções que comunicam a parte interna do atol com o seu entorno. Tais interrupções são denominadas de barretas ou canais de passagem. Há dois canais principais no Atol das Rocas um situado na parte W do atol, próxima à ilha do Farol e outra na porção N do anel recifal.

O canal próximo à ilha do Farol é menor, com profundidade aproximada de 4m, sendo conhecido como Barretinha. O fundo deste canal é de sedimento calcário bioclástico.

O canal maior encontra-se na porção N do anel recifal sendo denominado de Barreta Grande. A largura atinge 100m e a profundidade varia de 4 m (laguna) até 10 m (limite externo do canal). Este canal é formado por espaços entre colunas recifais com paredes verticalizadas. Em amostras recifais observa-se intensa bioerosão ocasionada por poliquetas e sipunculídeos (Figura 6C). O fundo deste canal é recoberto com sedimento bioclástico areno-cascalhoso onde há intensa bioturbação de organismos da infauna bentônica, principalmente por poliquetas.

### Piscinas

No platô recifal ocorrem descontinuidades denominadas de piscinas. Tais piscinas constituem depressões no platô recifal. As piscinas localizam-se em toda a extensão do platô. As profundidades variam de cerca de 1 a 5 metros. Andrade (1959) denominou as bordas das piscinas como bordas “em pala de boné”, conhecidas em países de língua inglesa como *overhangs*. Tais bordas são comumente projeções do topo recifal como bordas de telhados (beirais salientes) (Figura 4D). As piscinas possuem ligação com a parte externa do recife. O preenchimento do fundo é feito com sedimento arenoso e, nas maiores piscinas, encontram-se colunas recifais isoladas.

Nas piscinas é comum a presença de recifes em mancha (“*patch reefs*”), de dimensões variadas, ocorrendo em toda a sua extensão (Figura 6B). A cobertura de bioproteção inclui algas pardas, vermelhas e verdes, além de corais escleractíneos e zoantídeos (*Zoanthus sociatus* e *Palythoa caribaeorum*). O peixe *Acanthurus chirurgus*

é comum nesta zona geomorfológica do Atol das Rocas atuando de maneira indireta na bioerosão do recife (Figura 5A).

### **Ilhas Arenosas**

As ilhas arenosas estão localizadas a sotavento no interior do anel do Atol das Rocas, representando os únicos locais que ficam descobertos durante a preamar. Tais ilhas arenosas constituem as partes constantemente emersas, sendo denominadas de ilha do Farol e a do Cemitério. Tais compartimentos biogeomorfológicos são influenciados pela ação dos ventos, marés, correntes, ondas, biota marinha e terrestre.

A Ilha do Cemitério tem a forma aproximada de um trapézio, segundo observações de campo e de imagens aéreas, sendo que sua base maior é voltada para NE. A base maior tem medição aproximada de 400 m e a altura de 100 m. Seu contorno é delimitado por um depósito de praia, e por um afloramento de calcarenito de praia. A altura máxima da ilha em relação à superfície média do topo do recife é de pouco mais de 3 m. A Ilha do Farol é mais alongada, com a forma de um anzol, segundo Kikuchi (1994). Seu comprimento e largura máxima são de 800 e 300 m, respectivamente.

Na ilha do Farol pode-se observar o crescimento do esporão que se dá no sentido SW permitindo a formação de uma “baía” ou “enseada” que pode ser caracterizada como um canal de maré, principalmente na porção proximal com presença de “*ripple marks*” na parte inicial. As laterais são cobertas com *Sesuvium portucalstrum* e *Portulaca oleracea* que estabiliza as paredes dos taludes impedindo o processo erosivo. Observam-se recifes de calcarenito com baixo grau de diagênese com cimentação bem recente propiciada pelo fluxo de marés e sedimentação. No sedimento observa-se a presença de cascalho com coloração marrom-escura (semelhante à área próxima ao terraço de abrasão da ilha do Cemitério e da área a barlavento) introduzido na área antes da formação do esporão de agradação (com o fechamento o material ficou retido).

O sedimento transportado é colonizado de início por cianobactérias, que aceleram a estabilização da areia nas ilhas arenosas. Em seguida instala-se a beldroega, capaz de suportar a semi-imersão nas marés altas, que ajuda a segurar a areia trazida pelo vento, o que faz a ilha crescer aos poucos. A planta *Cyperus ligularis* é comum nas ilhas sendo fundamental biogeomorfológicamente na fixação das ilhas arenosas e atenuando os processos erosivos (Figura 5C).

A introdução de Nitrogênio e Fósforo decorrente do guano da avifauna e da matéria orgânica morta eleva a produtividade da área com crescimento de algas

clorofíceas, bactérias e grandes áreas com biofilmes de microorganismos sobre uma camada sedimentar de areia carbonática biogênica (Figura 6C). Pode-se observar uma zona anóxica com baixo grau de decomposição bacteriana aeróbia. Os próprios biofilmes podem agir biogeomorfologicamente protegendo a estrutura de intemperismo e erosão.

### **Laguna**

Na porção NE da região central do recife, adjacente ao anel recifal no seu limite N, e ao depósito arenoso, pelo S ocorre à presença de uma laguna. Diferentemente do depósito arenoso a lâmina d'água é persistente sendo submersa. Ocorre a presença de colunas recifais e sedimentos arenosos bioclásticos e cascalhosos. A profundidade máxima varia de acordo com as marés, sendo, nas de sizígia, a variação de, aproximadamente, 4 a 6 m (Kikuchi & Leão 1997, Gherardi & Bosence 1999). Nas colunas recifais há forte papel de bioconstrução onde foram observados corais escleractíneos das espécies *Montastrea cavernosa*, *Siderastrea stellata* e *Porites sp.*, além de algas calcárias.

### **3.2. Processos Biogeomorfológicos**

Foram identificadas pelo menos 51 espécies que atuam na modelagem do relevo do único Atol do Atlântico Sul (Tabela 01). Os táxons encontrados no recife oceânico apresentaram diferentes atividades, incluindo processos biogeomorfológicos como: estruturas de bioturbação, bioerosão recifal, bioproteção, cimentação de areia carbonática, produção de sedimentos biodetríticos, e bioconstrução recifal.

A interação entre os processos biogeomorfológicos (Figura 07) demonstra a conectividade na estruturação da morfologia do complexo recifal. Tal figura representa apenas parte dos importantes componentes dos sistemas geobiológicos do Atol e não ilustra os processos “inorgânicos” da superfície do recife ou a interação destes com os bioprocessos. Os processos exógenos (modos inorgânicos de erosão, transporte e deposição) e processos endógenos afetam os sistemas biogeomorfológicos do Atol das Rocas.

**Tabela 1.**

**Figura 7.**

### 3.2.1. Bioconstrução

Nas lâminas petrográficas analisadas as algas vermelhas, foraminíferos, corais e os vermetídeos são os bioconstrutores mais comumente encontrados nas fácies carbonáticas (Figura 8). Em estudos anteriores no Atol (Kikuchi 1994, Kikuchi & Leão 1997, Gherardi & Bosence 1999, Gherardi & Bosence 2005) foi verificada a predominância de algas calcárias, vermetídeos e moluscos na construção carbonática holocênica do Atol. Este fato ocorre em outros recifes do litoral tropical brasileiro (Leão 2003) com bioconstrução significativa por algas vermelhas e verdes.

Uma série de fatores limitantes foi encontrada no Atol das Rocas reduzindo a capacidade dos corais de serem os principais bioconstrutores no sistema biogeomorfológico recifal. A formação do Atol teve início provavelmente no lado à barlavento (Kikuchi 1994, Kikuchi & Leão 1997) com forte influência da ação dos ventos e da corrente sul equatorial. A paleohidrodinâmica e a alta energia do recife permitiram o desenvolvimento de organismos com adaptações como algas calcárias (Figura 8A), foraminíferos incrustantes (Figura 8C) e vermetídeos (Figura 8B). Atualmente no recife pode-se observar no lado à barlavento a forte ação das ondas e desarranjo de blocos recifais como um importante fator limitante para os corais. A hidrodinâmica de alta energia, durante o desenvolvimento holocênico, reduzia a bioconstrução por corais, permitindo o crescimento das algas calcárias competidoras (Figura 8D), de organismos filtradores como os vermetídeos (Figura 8F) e os foraminíferos incrustantes adaptados a este tipo de ambiente.

#### Figura 8.

Atualmente pode-se observar fatores limitantes para o crescimento dos corais no lado a sotavento como a forte sedimentação e a entrada da matéria orgânica pelas cadeias tróficas terrestres estabelecidas nas ilhas arenosas. Na história ecológica do Atol o aumento da sedimentação e da entrada de matéria orgânica agiu como um “feedback” positivo no crescimento das algas *Porolithon pachydermum*, *Lythophyllum* sp., *Lythoporella* sp., de vermetídeos, do foraminífero *Homotrema rubrum*, além do coral *Siderastrea stellata*. O coral escleractíneo com adaptações para suportar parte dos distúrbios atuais e pretéritos do Atol das Rocas é exatamente *S. stellata* que possui a maior abundância nas paredes recifais, segundo Maida & Ferreira (1997). *S. stellata* é conhecido por possuir resistência a fortes variações de temperatura (Laborel 1969), altos níveis de sedimentação e turbidez da água (Leão *et al.* 1988) e resistência a

hidrodinâmica quando a espécie encontra-se com pequenas colônias (Echeverría *et al.* 1997).

A dominância de *Porolithon pachydermum* pode ser devida ao hábito crostoso da alga calcária, visto que o talo bem aderido ao substrato (Figura 8E) se adapta a alta intensidade de exposição às ondas (Steneck 1986). As ondas que quebram em cima da crista recifal dificultam outras formas de macroalgas a se fixarem e crescerem, como o observado em ambientes com um alto distúrbio (Steneck & Dethier 1994). Estudos demonstram que as algas eretas de grande porte são menos resistentes às forças de dragagem das ondas sendo facilmente arrancadas do substrato (Norton 1991). Segundo Littler & Littler (2000) *Porolithon* é um gênero de algas calcárias essencialmente tropical. Em áreas com alta energia de ondas e onde a atividade de organismos pastadores é reduzida, as espécies clímax *Lithophyllum congestum* e *P. pachydermum* são capazes de construir o topo dos recifes, como em St. Croix no Caribe (Adey & Vassar 1975, Adey 1978).

### 3.2.2. Bioproteção e Bioerosão

As macroalgas e zoantídeos são organismos bioprotetores com importante papel na redução das taxas de bioerosão nos ambientes marinhos do Atol (Figuras 5B e 5D). Nas ilhas arenosas observam-se biofilmes microbiais e angiospermas com função bioprotetora no sistema insular (Figuras 6C e 7C). Naylor (2005) aborda que plantas e biofilmes microbiais têm papel biogeomorfológico fundamental na redução de processos erosivos, na estabilização de sedimentos e no provimento de habitats para outras espécies.

Áreas recifais com baixa cobertura de bioprotetores provavelmente têm incremento dos processos físicos de denudação e das taxas de bioerosão (Naylor *et al.* 2002). Leão & Kikuchi (2001) analisando a bioerosão no arquipélago de Abrolhos abordam que esponjas e poliquetas têm papel fundamental nos processos bioerosivos em recifes rasos, sendo que ambos atuam na produção de sedimentos pela sua atividade. Schroeder & Zankl (1974) comentam que a bioerosão é produzida freqüentemente por poliquetos, sipunculídeos, esponjas e moluscos, que disponibilizam o sedimento mais fino, reaproveitado ao longo da trajetória inorgânica, ou seja, no desenvolvimento de novas colônias.

Os peixes herbívoros da Família Scaridae (*Sparisoma aff. chrysopterum*, *Sparisoma aff. rubripinne*, *Sparisoma aff. viride*) foram encontrados em diversos compartimentos geoambientais do Atol das Rocas praticando a atividade bioerosiva. Este grupo de peixes pode ser classificado como raspadores, pois raspam o substrato coberto por algas, ingerindo grande quantidade de fragmentos da matriz calcária do recife. As espécies apresentam adaptações morfológicas (dentes fundidos em placa única, moinho faringeano) que possibilitam esse modo alimentar (Randall 1967). Moura (1998) afirma que esse grupo de peixes constitui um dos grupos dominantes em termos de biomassa e número de indivíduos.

Steneck (1983) sugere que existam 3 principais grupos de herbívoros importantes em recifes onde as algas são predominantes na construção do recife: 1) O que se alimenta sobre a alga, mas não se aproveitam do substrato primário (ex. poliquetas); 2) O que se aproveita do substrato primário mas não escavam o carbonato de cálcio (ex. moluscos e maioria dos ouriços e peixes) e 3) O que escava o carbonato de cálcio (quítions, lapas, alguns ouriços e peixes Scaridae). No entanto, somente o terceiro grupo de herbívoros apresenta um impacto ecológico e pode controlar o estabelecimento e desenvolvimento das algas calcárias nos recifes (Figueiredo *et al.* 1997).

Os peixes Scaridae são comuns em Rocas e apresentam tamanhos comparáveis aos encontrados no Arquipélago dos Abrolhos (Kikuchi & Leão 1997). Ferreira & Gonçalves (1999) descrevem cardumes destes peixes nos Abrolhos com maiores dimensões e sugerem a proliferação de macroalgas como resultado da sobrepesca nos recifes costeiros. De fato, a redução na colonização de algas calcárias incrustantes nos Abrolhos foi associada a maior frequência na ação dos peixes herbívoros Scaridae (Figueiredo *et al.* 1997).

A provável ação de herbívoros como moluscos do gênero *Fissurella* e peixes budiões (Scaridae) podem dificultar a colonização de algas calcárias no Atol das Rocas. Estes moluscos e peixes são capazes de raspar e escavar o substrato (Steneck 1983) e, dependendo da frequência e intensidade da herbivoria, podem limitar ou favorecer a abundância e competitividade das algas calcárias incrustantes (Figueiredo *et al.* 1997; Figueiredo e Steneck 2002). Por outro lado, as lepas removem os esporos de algas frondosas e filamentosas, assim aumentam a taxa de sobrevivência de *Porolythion pachydermum* na crista recifal dos recifes no Caribe (Littler *et al.* 1995). Porém, a baixa

densidade de lepas em Rocas leva a acreditar que estas não são as principais responsáveis pela bioerosão das algas calcárias bioconstrutoras recifais.

O desenvolvimento do recife de Rocas, ao longo da sua história ecológica no Holoceno, foi provavelmente influenciado pela ação dos organismos bioerosivos nas taxas de aumento e destruição da massa carbonática. Kikuchi & Leão (1997) sugeriram a hipótese de que a dominância de algas calcárias na bioconstrução do Atol das Rocas pode ter ocorrido pela baixa pressão de herbivoria decorrente da ausência do peixe-papagaio *Scarus* spp. em Rocas. Diversos autores (Adey & Vassar 1975, Steneck & Adey 1976, Adey 1978, Steneck 1986) argumentaram que a herbivoria por peixes-papagaio é um dos controles ecológicos mais importantes no desenvolvimento das algas coralinas nos recifes coralíneos.

### 3.2.3. Bioturbação

No ambiente marinho submerso do Atol das Rocas à NE podem-se observar estruturas de bioturbação referentes a escavações de peixes nos sedimentos de fundo da laguna (Fig. 9A). A laguna e o depósito arenoso intermarés compartilham uma infauna de poliquetas e nematódeos que são intensos agentes de retrabalhamento sedimentar. Nos períodos de maré baixa no depósito arenoso pode-se observar a geração de feições sedimentares bioturbadas pela ação destes anelídeos (Fig. 9B) com formação de glóbulos de areia carbonática biogênica. Feições sedimentares biogênicas de locomoção de *Chelonya midas*, aves e de artrópodes conferem depressões a superfície dos sedimentos carbonáticos no mesolitoral e supralitoral na ilha do Farol e Cemitério (Fig. 9D). Na ilha do Farol pode-se observar no canal de maré uma freqüente bioturbação de caranguejos *Goniopsis cruentata* em áreas de tapetes microbiais (Fig. 9C). Estruturas biogênicas marinhas são todos os tipos de elementos de rugosidade saliente ou depressões nos sedimentos produzidos por organismos bentônicos, sendo uma característica comum nas águas rasas do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial), sobretudo nas lagunas e piscinas deste recife oceânico. A interação destas estruturas com o fluxo de corrente próxima ao fundo da laguna ou em períodos de maré alta no depósito arenoso podem resultar em trapeamento ou ressuspensão das partículas na laguna e no depósito arenoso intermarés.

### Figura 9.

De todos os processos biogeomorfológicos de perturbação física dos sedimentos, a bioturbação é provavelmente o que tem recebido maior atenção e as principais espécies bioturbadoras são crustáceos e poliquetas que vivem em galerias e tubos (Hall 1994), semelhantes aos que vivem no Atol das Rocas na laguna e no depósito arenoso. Porém existem estudos envolvendo bolachas-do-mar, holotúrias, gastrópodos e peixes, entre outros (Posey 1987). Entre as principais espécies estudadas estão os talassinídeos (maior número de estudos) e os poliquetas. Há poucos estudos envolvendo espécies tartarugas e aves como agentes de bioturbação (Snelgrove & Buttman 1994) como verificado para o único Atol do Atlântico Sul Equatorial. As poucas estruturas de bioturbações de organismos como moluscos, crustáceos e equinodermos podem ser resultado de sua baixa diversidade e abundância, constatada no trabalho de Netto *et al.* (1999), devido intenso stress físico no depósito arenoso e na laguna do Atol.

## CONCLUSÕES

Os diferentes compartimentos recifais do Atol das Rocas, Atlântico Sul, são afetados por variados processos biogeomorfológicos como: controle de erosão e intemperismo, bioproteção, bioerosão recifal, bioturbação, cimentação de areia carbonática biogênica, produção de sedimentos biodetríticos e bioconstrução (principalmente de algas calcárias, vermetídeos e foraminíferos). Organismos diversos incluindo aves, tartarugas, corais, algas, moluscos, peixes, poliquetas, nematódeos, oligoquetas, foraminíferos, esponjas e microorganismos atuam nos diferentes grupos de processos e sistemas biogeomorfológicos gerando as características únicas do único Atol do Atlântico Sul Equatorial. Estudos posteriores podem identificar novas espécies com papel biogeomorfológico e focar aspectos quantitativos, como taxas dos processos biogeomorfológicos (bioerosão, bioturbação, etc..)

## AGRADECIMENTOS

O presente artigo faz parte da tese de doutorado do programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) intitulada “Geobiologia do Atol das Rocas, Atlântico Sul”. M.O Soares agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico) pela concessão de bolsa de Doutorado. A PETROBRAS e a Fundação SOS Mata Atlântica pelo financiamento

da pesquisa dos trabalhos de campo no Atol. Ao ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) pela concessão de licença de pesquisa (número 12228-1) e apoio nas atividades de campo (principalmente à Maurizélia Brito, coordenadora da Reserva Biológica Atol das Rocas). Ao Biólogo Carlos Augusto Oliveira Meirelles pelo auxílio na coleta e fotografias subaquáticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adey, W. H. & Vassar, J. M. 1975. Colonization, succession and growth rates of tropical crustose coralline algae (Rhodophyta, Cryptonemiales). *Phycologia.*, **14**: 55-69.

Adey, W. H. 1978. Algal ridges of the Caribbean sea and West Indies. *Phycologia.*, **17**: 361-367.

Andrade G.O. 1959. O recife anular das Rocas (Um registro das recentes variações eustáticas no Atlântico equatorial). *Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros.*, **11**: 29-61.

Echeverría C.A. & Pires D.O. 1997. Cnidarians of the Atol das Rocas. *In: Proc. 8<sup>th</sup>. Int. Coral Reef Symposium*, 1, 736p.

Ferreira, C.E.L. & Gonçalves, J. E. A. 1999. The unique Abrolhos reef formation (Brazil): need for specific management strategies. *Coral Reefs.*, **18**: 352.

Figueiredo, M. A. O., Norton, T. A. & Kain, J. M. 1997. Settlement and survival of epiphytes on two intertidal crustose coralline alga. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **213**: 247- 260.

Figueiredo, M. A. O. & Steneck, R. S. 2002. Floristic and ecological studies of crustose coralline algae on Brazil's Abrolhos reefs. *In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium*, 1, p.98.

Gherardi D.F.M. & Bosence D.W.J. 1999. Modeling of the ecological succession of encrusting organisms in recent coralline-algal frameworks from Atol das Rocas, Brazil. *Palaios.*, **14**: 145-158.

Gherardi D.F.M. & Bosence D.W.J. 2005. Late Holocene Reef growth and relative sea-level changes in Atol das Rocas, equatorial South Atlantic. *Coral Reefs.*, **24**: 264-272.

Guilcher A. 1988. *Coral reef geomorphology*. 1<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons. 228pp.

- Hall, S.J. 1994. Physical disturbance and marine benthic communities: life in unconsolidated sediments. *Oceanography Marine Biology Annuals Reviews.*, **32**: 179-239.
- Kikuchi R.K.P. 1994. *Geomorfologia, Estratigrafia e Sedimentologia do Atol das Rocas (REBIO-IBAMA/RN)*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 144p.
- Kikuchi R.K.P. & Leão Z.M.A.N. 1997. Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): an atoll built primarily by coralline algae. *In: Proc. 8<sup>th</sup>. Int. Coral Reef Symposium*, 1, p.731- 736.
- Laborel, J., 1969. Madréporaires et hydrocoralliaires recifaux des côtes brésiliennes. Systematique, ecologie, repartition d tical et geographie. *Ann. Inst. Oceanogr.*,**47**:171-229.
- Larrazábal M.E. & Oliveira V.S. 2003. Thecosomota e Gymnosomota (Mollusca, Gastropoda) da cadeia Fernando de Noronha, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia.*, **20**: 351-360.
- Leão, Z.M.A.N; Araújo, T.M.F. & Nolasco, M.C. 1988. The coral reefs off the coast of Eastern Brazil. *In: Proc. 6<sup>th</sup>. Int. Coral Reef. Symp.*, Austrália, 3, p. 339-347.
- Leão, Z.M.A.N. & Kikuchi, R.K.P. 2001. The Abrolhos Reefs of Brazil. *Ecological Studies.*, **144**: 84-96.
- Leão, Z. M. A. N. 2003. Corals and coral reefs of Brazil. *Latin American Coral Reefs*. Elsevier Science p. 9-52.
- Littler, M. M. 1995. Selective herbivore increase biomass of its prey: a chiton-coraline reef-building association. *Ecology.*, **76**: 1666-1681.
- Littler, M. M. & Littler, D. S .2000. *Caribbean reef plant. An identification guide to the reef plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico*. Off Shore Grafics, Inc., 542pp.
- Mabesoone J.M. & Coutinho P.N. 1970. Litoral and shallow marine geology of Northeastern Brazil. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico Universidade Federal de Pernambuco.*,**12**: 1-214.
- Maida, M. & Ferreira, B.P. 1997. Coral reefs of Brazil: an overview. *In: Proc. 8<sup>th</sup>. International Coral Reef Symposium*,1, p. 263-274.

- Moura, R.L. 1998. Atividade, distribuição e táticas alimentares de uma comunidade de peixes do Atol das Rocas. Dissertação (Mestrado em Zoologia). Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. 108p.
- Naylor L.A., Viles H.A., Carter N.E.A. 2002. Biogeomorphology revisited: looking towards the future. *Geomorphology* ., **47**: 3-14.
- Naylor L.A. 2005. The Contributions of biogeomorphology to emerging field of geobiology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.*, **219**: 35-51.
- Netto, S.A., Attrill, M.J. & Warwick, R.M. 1999. The effect of a natural water-movement related disturbance on the structure of meiofauna and macrofauna communities in the intertidal sand flat of Rocas Atoll (NE, Brazil). *Journal of Sea Research.*, **42**: 291-302.
- Norton, T. A. 1991. Conflicting constraints on the form of intertidal algae. *British Phycological Journal.*, **26**: 203-18.
- Ottman F. 1963. "L'atol das Rocas" dans l'Atlantique sud tropical. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique.*, **2**: 101-107.
- Posey, M.H. 1987. Influence of relative mobilities on the composition of benthic communities. *Marine Ecology Progress Series.*, **39**: 99-104.
- Randall, J.E. 1974. The effects of fishes on coral reefs. *In: Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Coral Reef Symp.*, 1, p.159-166.
- Schobbernhares C. ( d.) 1984. *Geologia do Brasil*. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 501pp.
- Schroeder, J.H. & Zankl, H. 1974. Dynamic reef-formation: a sedimentological concept based on studies of Recent Bermuda and Bahama reefs. *In: Proc. 2<sup>nd</sup> International Coral Reef Symposium*, 3, p.413-428.
- Snelgrove, P.V.R. & Buttman, C.A. 1994. Animal-sediment relationships revisited: cause versus effect. *Oceanography Marine Biology Annuals Reviews.*, **32**: 111-177.
- Spencer T. & Viles H. 2002. Bioconstruction, bioerosion and disturbance on tropical coasts: coral reefs and rocky limestone shores. *Geomorphology.*, **48**: 23-50.
- Steneck, R. S. & Adey, R.W. 1976. The role of the environment in control of morphology in *Lithophyllum congestum*, a Caribbean algal ridge builder. *Botanica Marina.*, **19**: 197-215.
- Steneck, R. S. 1983. Escalating herbivory and resulting adaptative trends in calcareous

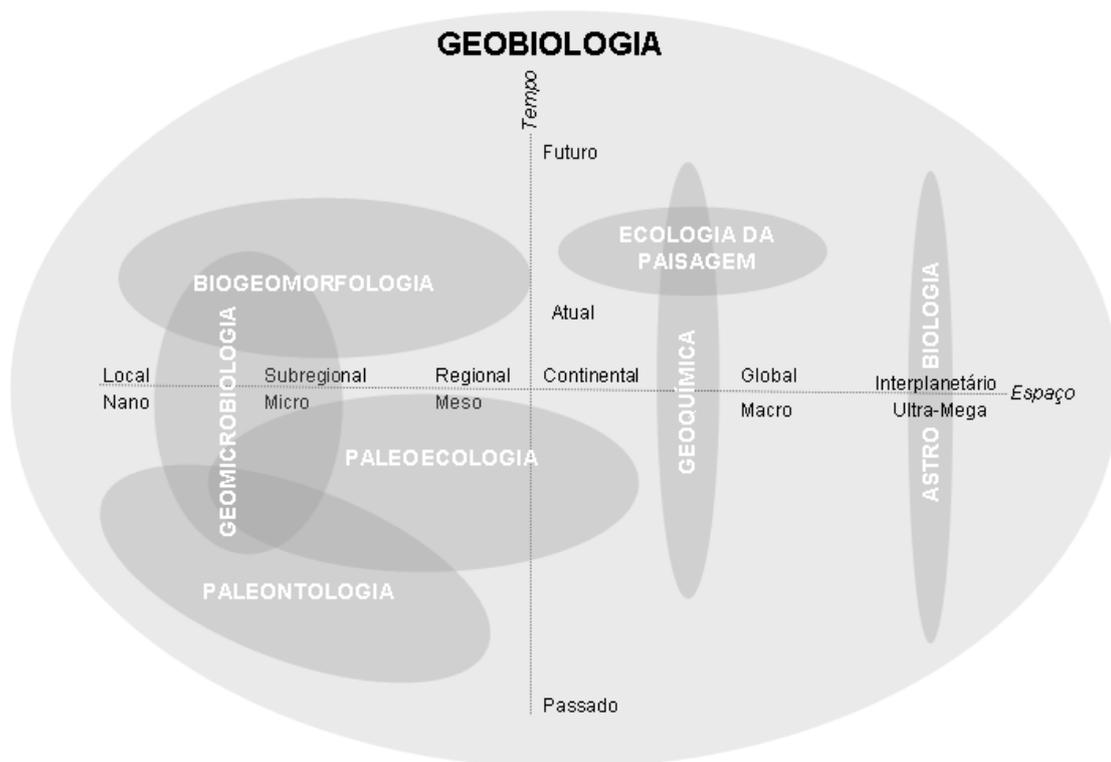
---

algae. *Paleobiology*, **9**: 45-63.

Steneck, R. S. 1986. The ecology of coralline algal crusts: Convergent Patterns and Adaptative Strategies. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **17**: 273-303.

Steneck, R. S. & Dethier, M. N. 1994. A functional group approach to the structure of algal-dominated communities. *Oikos*, **69**: 476-98.

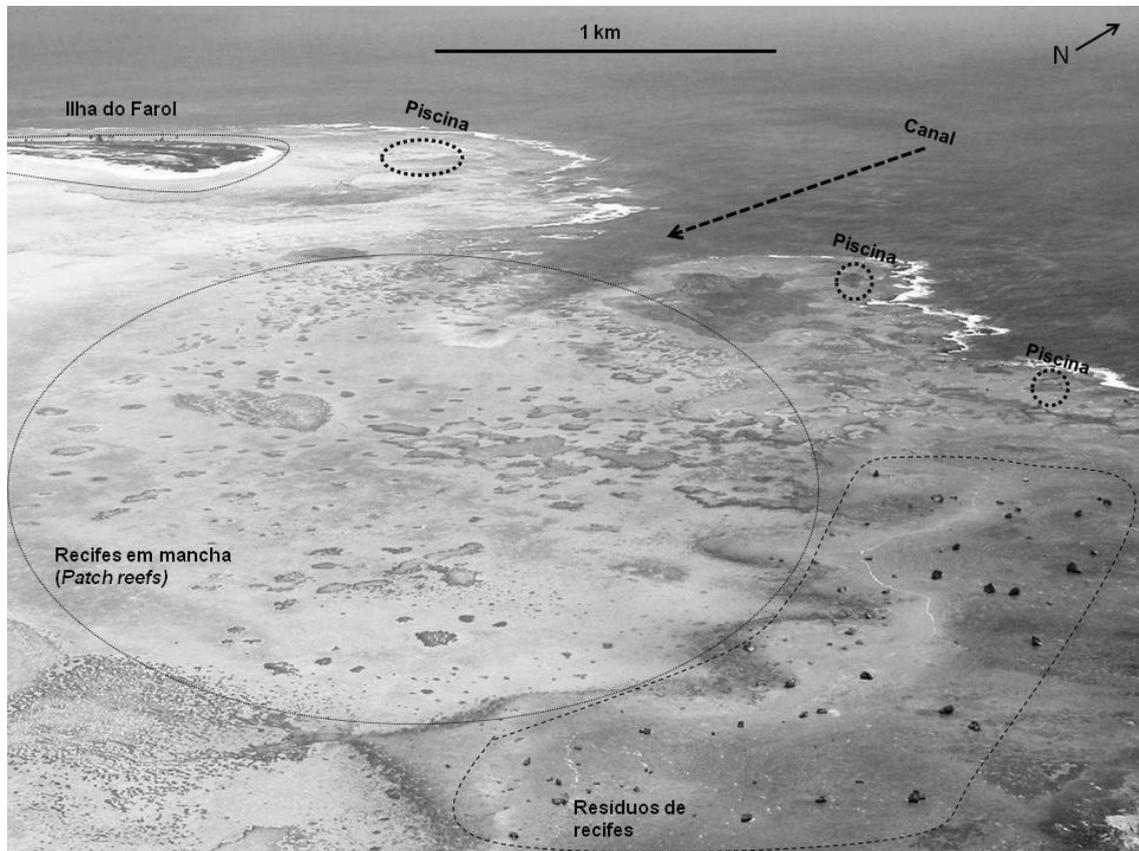
Vallaux, C. 1940. La formation atollienne de Rocas (Brésil). *Bulletin de L'Institut Océanographique*, **37**: 1-8.



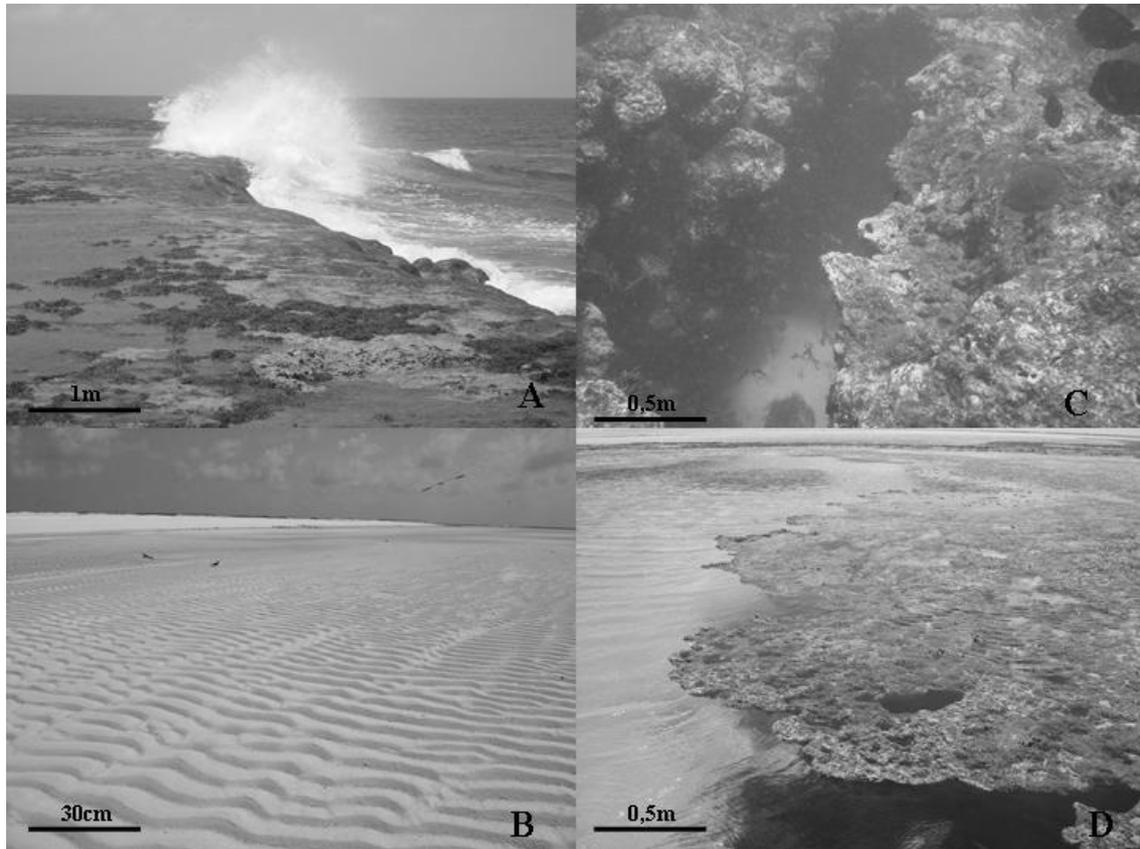
**Figura 1.** Áreas de conhecimento da Geobiologia. Modificado de Naylor (2005).



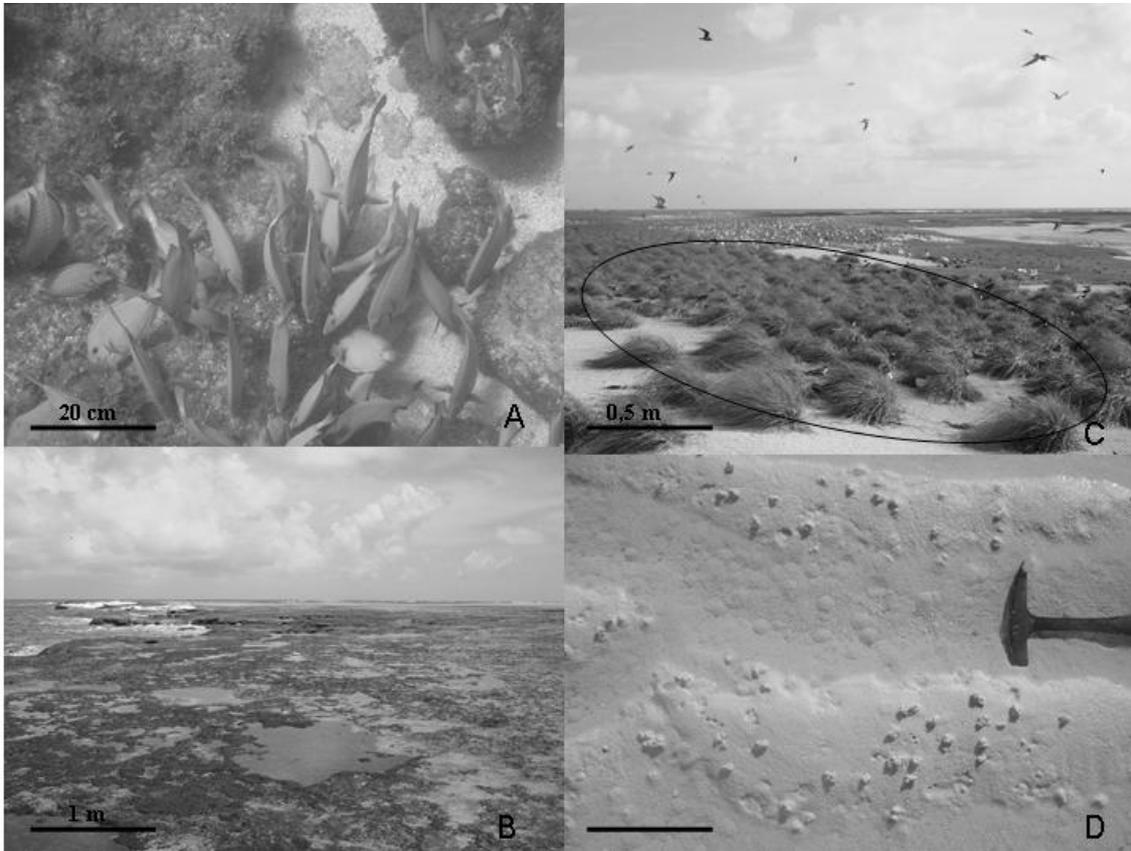
**Figura 2.** Áreas principais de coleta de dados biogeomorfológicos. Legenda: Ilha Arenosa do Farol (IAF), Ilha Arenosa do Cemitério (IAC), Laguna (LA), Canais (CA), Frente recifal (FR), Depósito Arenoso Intermarés (DAI), Zona dos Resíduos de Recifes (RRS). Mapa modificado a partir de aerofotografia da Força Aérea Brasileira (FAB) retirada nas atividades de campo em janeiro de 2008 em maré baixa de sizígia.



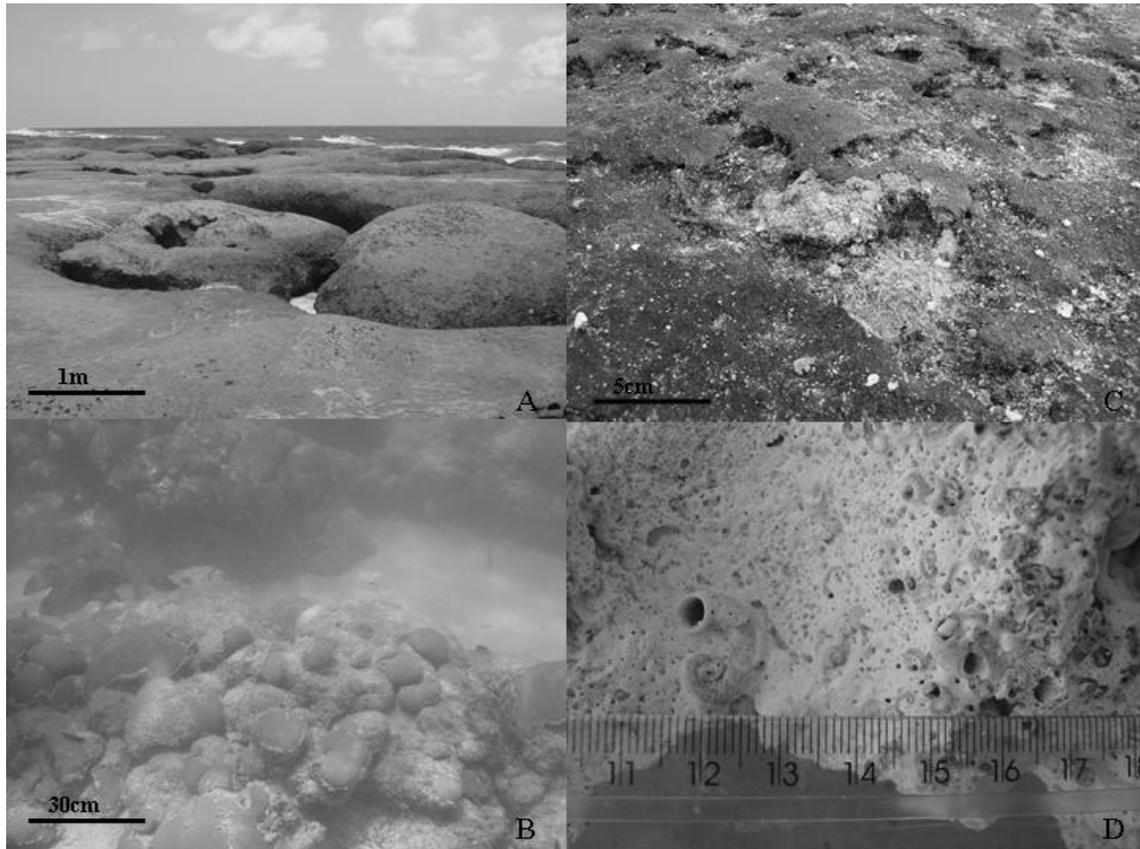
**Figura 3.** Aerofotografia do Atol das Rocas (NE, Brasil) mostrando parte do platô recifal onde ocorrem Resíduos de Recifes, recifes em mancha, a ilha do Farol a sotavento e o maior canal que liga a área interna do Atol à zona adjacente do Oceano Atlântico. Observam-se piscinas ocorrendo no anel recifal. Foto da Força Aérea Brasileira (FAB) obtida em janeiro de 2008 em maré baixa de sizígia.



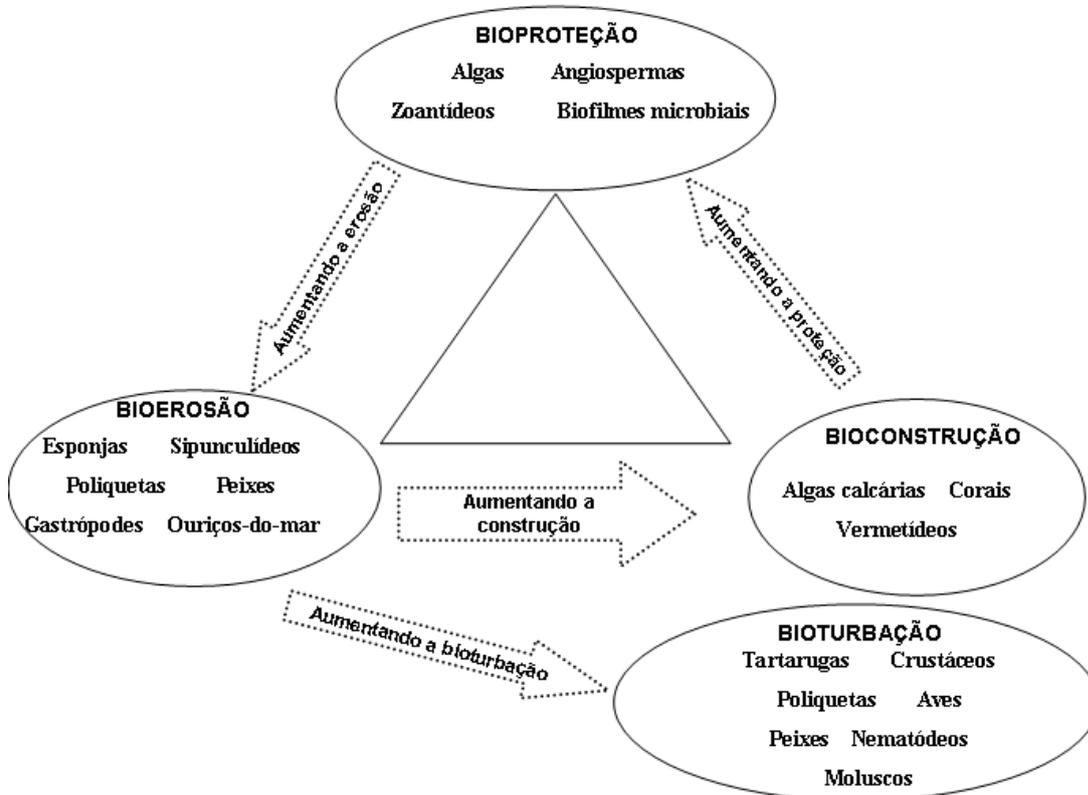
**Figura 4.** Zonas geomorfológicas no Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial): (A) Frente recifal do Atol das Rocas, NE do Brasil. Zona de alta energia do Recife oceânico; (B) Depósito arenoso intermarés do Atol das Rocas, NE do Brasil, exibindo “*ripple marks*”, pela ação das marés. Imagem obtida na maré baixa; (C) Foto subaquática da frente recifal na parte externa do Atol das Rocas, NE do Brasil mostrando ranhura como continuação do sistema “*spur-and-groove*” e acumulação de sedimento bioclástico no fundo. Profundidade: 10 metros; (D) Piscina no Atol das Rocas mostrando a estrutura de “*overhangs*” (palas-de-boné) nas suas margens com intensa bioproteção de algas.



**Figura 5.** Aspectos biogeomorfológicos no Atol das Rocas nas piscinas, platô recifal, ilhas arenosas e depósito arenoso intermarés: (A) Peixes-cirurgiões *Acanthurus chirurgus* atuam de maneira indireta na bioerosão ao diminuir a bioproteção proporcionada pelas macroalgas. Observar sedimento carbonático depositado no fundo entre os recifes em mancha (*patch-reefs*) de uma piscina; (B) Platô recifal com forte cobertura de macroalgas que proporcionam uma bioproteção a estrutura recifal; (C) Vegetação formada por *Cyperus ligularis* (marcada pela elipse) que auxilia no processo de fixação das areias carbonáticas bioclásticas para formação das ilhas arenosas e na proteção contra erosão; (D) Bioturbação de poliquetas (formas globulares) no sedimento carbonático do Depósito Arenoso Intermarés.



**Figura 6.** Aspectos biogeomorfológicos no Atol das Rocas mostrando aspectos da bioconstrução, bioerosão e formação de biofilmes microbiais sobre sedimentos carbonáticos bioclásticos: (A) Anel recifal bioconstruído (a barlavento) principalmente pela alga calcárea *Porolithon pachydermum*; (B) Recife em mancha formado principalmente pela bioconstrução do coral *Siderastrea stellata*; (C) Formação de biofilmes sobre sedimentos carbonáticos na Ilha do Farol; (D) Marcas de bioerosão de poliquetas/sipunculídeos (formas arredondadas menores) em amostras do recife do Atol das Rocas, Atlântico sul Ocidental.



**Figura 7.** Modelo de Interação entre diferentes processos biogeomorfológicos no Atol das Rocas, Atlântico Sul.

**Tabela 1.** Principais táxons e seu papel biogeomorfológico no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. Abreviaturas: Fr (Frente recifal), Fa (Fundo Adjacente), Mr (Margem recifal), Pr (Parede Recifal), Ar (Anel recifal), Rrs (Resíduos de Recifes), Daí (Depósito arenoso intermarés), Ca (Canais), Pi (Piscinas), Ia (Ilhas arenosas), La (Laguna).

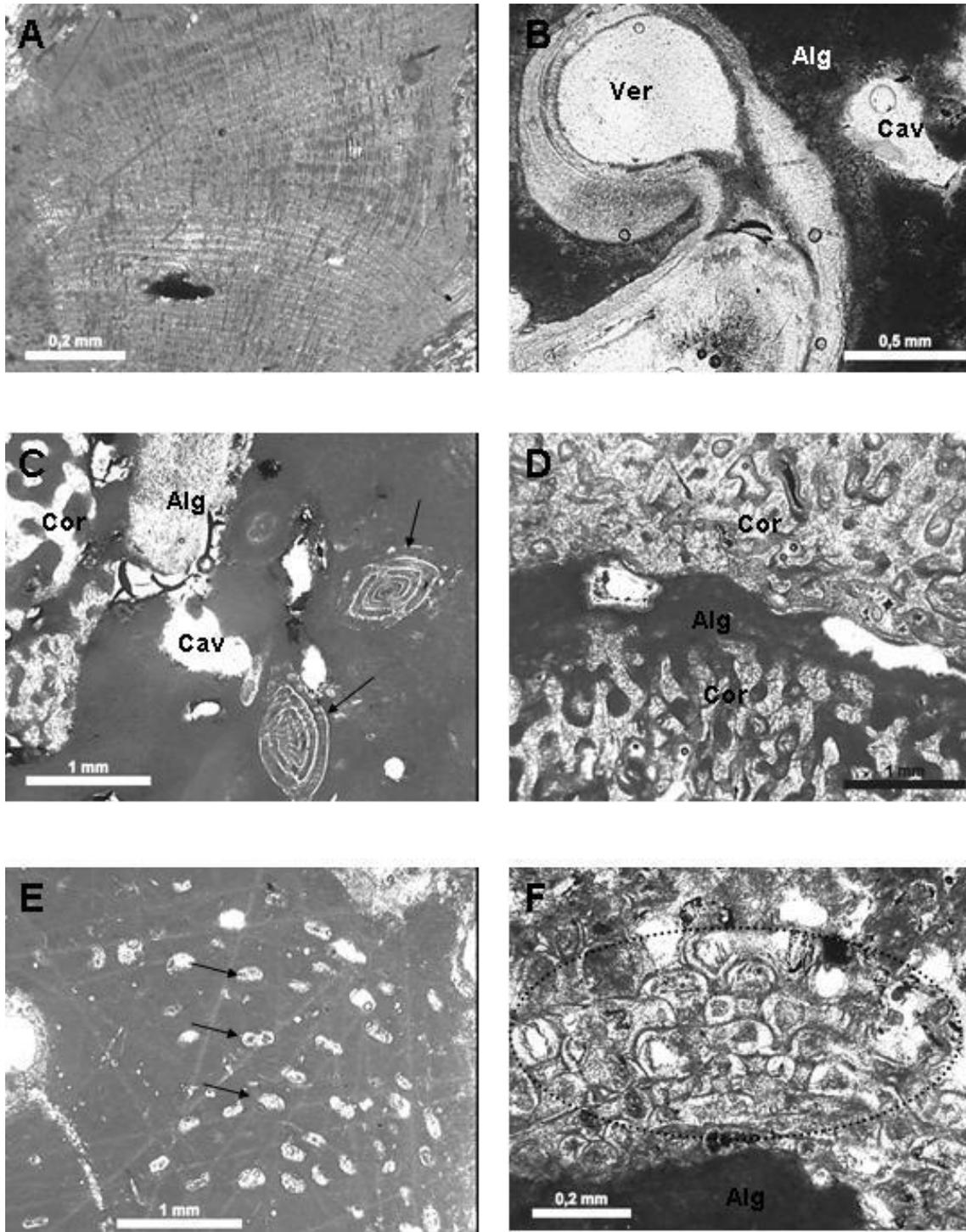
<i>Organismo</i>	<i>Táxon</i>	<i>Função Biogeomorfológica</i>	<i>Compartimentos recifais de ocorrência</i>
Plantae: Aizoaceae	<i>Sesuvium portulacastrum</i> Linnaeus, 1758	Fixação das ilhas arenosas no pós-praia a sotavento e bioproteção contra erosão	Ia
Plantae: Portulacaceae	<i>Portulaca oleracea</i> Linnaeus, 1758	Fixação das ilhas arenosas no pós-praia a sotavento e bioproteção contra erosão	Ia
Plantae: Cyperaceae	<i>Cyperus ligularis</i> Linnaeus, 1758	Fixação das ilhas arenosas no pós-praia a sotavento e bioproteção contra erosão	Ia
Biofilmes microbiais	Bacteria spp.	Fixação das ilhas e bioproteção contra erosão	Ia, Dai
Rhodophyta: Ceramiales	<i>Digenia simplex</i> (Wulfen) C. Agardh, 1822	Bioproteção da estrutura recifal	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La
Rhodophyta: Gelidiales	<i>Gelidiella acerosa</i> (Forskall) J. Feldmann & g. Hamel	Bioproteção da estrutura recifal	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La
Anthozoa: Zoanthidea	<i>Zoanthus sociatus</i> Ellis, 1767	Bioproteção da estrutura recifal	Ar, Pi, Pr

Anthozoa: Zoanthidea	<i>Palythoa caribaeorum</i> (Duchassaing & Michellotti, 1860)	Bioproteção da estrutura recifal	Ar, Pi, Pr
Porifera: Demospongiae	<i>Cliona</i> spp.	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La
Sipunculidea	<i>Sipuncula</i> spp.	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La
Echinodermata: Echinoidea	<i>Tripneustis</i> sp.	Bioerosão	Fr, Pi
Echinodermata: Echinoidea	<i>Echinometra lucunter</i> (Linnaeus, 1758)	Bioerosão	Mr, Ar, Pi, La
Pisces: Actinopterygii	<i>Scartella cristata</i> (Linnaeus, 1758)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Pomacanthus paru</i> (Bloch, 1787)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Stegastes pictus</i> (Castelnau, 1855)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Stegastes rocasensis</i> (Emery, 1972)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Ophioblennius atlanticus</i> (Valenciennes, 1836)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Abudefduf saxatilis</i> (Linnaeus, 1758)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa

Pisces: Actinopterygii	<i>Acanthurus chirurgus</i> (Bloch, 1787)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Acanthurus coeruleus</i> (Bloch and Schneider, 1801)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Sparisoma aff. chrysopterum</i> (Bloch and Schneider, 1801)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Sparisoma aff. rubripinne</i> Valenciennes, 1839	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Pisces: Actinopterygii	<i>Sparisoma aff. viride</i> (Bonaterre, 1788)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Mollusca: Gastropoda	<i>Fissurella rosea</i> (Gmelin, 1791)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai
Mollusca: Polyplacophora	<i>Ischnochiton cf. striolatus</i> (Gray, 1828)	Bioerosão	Fr, Mr, Ar
Mollusca: Gastropoda	<i>Lythophaga bisulcata</i> (d'Orbigny, 1842)	Bioerosão	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Daí
Rhodophyta	<i>Porolython pachydermum</i> Foslie, 1909	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Rhodophyta	<i>Lythoporella sp.</i>	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Rhodophyta	<i>Lythophyllum sp.</i>	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa

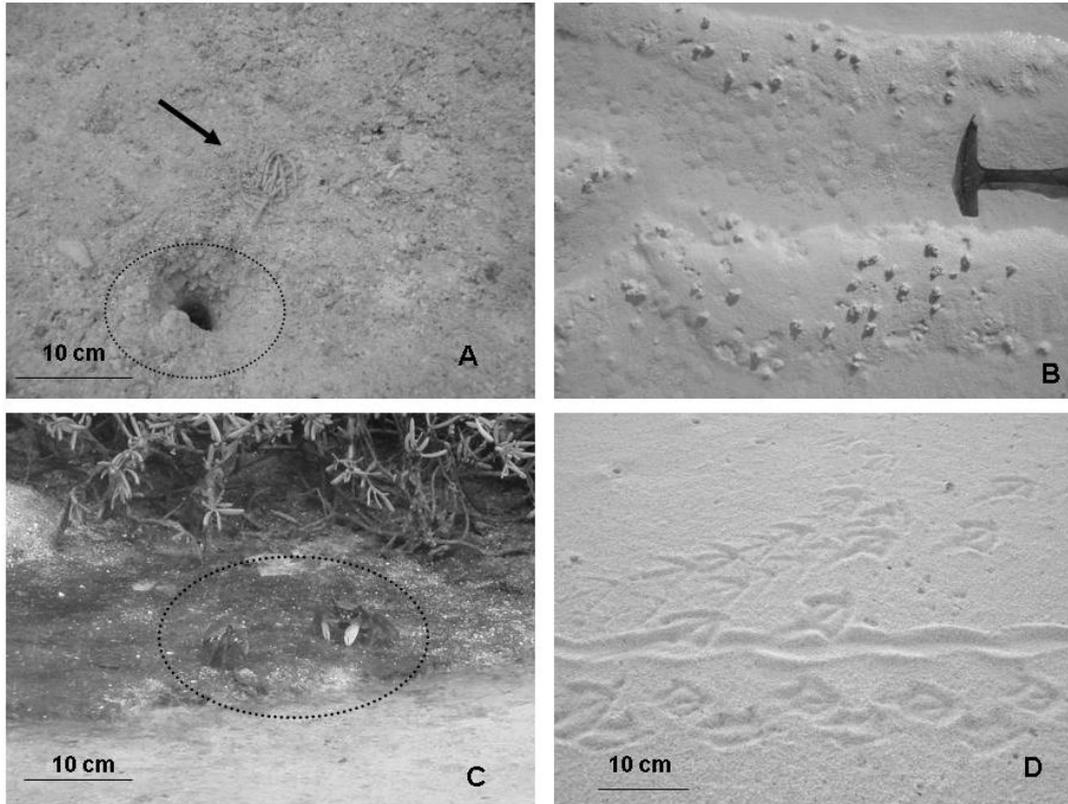
Rhodophyta	<i>Sporolythron sp.</i>	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Granuloreticulosa: Foraminiferida	<i>Homotrema rubrum</i> (Lamarck, 1816)	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Gastropoda: Vermetidae	<i>Dendropoma irregulare</i> (d'Orbigny, 1842)	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Gastropoda: Vermetidae	<i>Petalococonchus sp.</i>	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Anthozoa: Scleractinia	<i>Siderastrea stellata</i> Verrill, 1868	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Anthozoa: Scleractinia	<i>Favia gravida</i> Verrill, 1868	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Anthozoa: Scleractinia	<i>Porites sp.</i>	Bioconstrução carbonática	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Fa
Chelonya: Testudines	<i>Chelonya midas</i> (Linnaeus, 1758)	Bioturbação	Ia, Dai
Crustacea: Brachyura	<i>Gecarcinus lagostoma</i> H.Milne Edwards, 1837	Bioturbação	Ia
Aves: Laridae	<i>Anous stolidus</i> (Linnaeus, 1758)	Bioturbação	Ia
Aves: Sulidae	<i>Sula sp.</i>	Bioturbação	Ia
Annelida: Polychaeta	<i>Syllis sp.</i>	Bioturbação	La, Dai
Annelida: Polychaeta	<i>Sphaeromopsis sp.</i>	Bioturbação	Dai
Annelida: Polychaeta	<i>Metoncholaimus sp.</i>	Bioturbação	Dai
Annelida: Polychaeta	<i>Mesacanthion sp.</i>	Bioturbação	Dai

Nematoda	Nematoda spp.	Bioturbação	La
Annelida: Olygochaeta	Oligochaeta spp.	Bioturbação	Dai
Arthropoda Crustacea	Arthropoda sp.1	Bioturbação	Ia
Arthropoda: Crustacea	Arthropoda sp.2	Bioturbação	Ia, Dai
Arthropoda: Crustacea	Arthropoda sp.3	Bioturbação	Ia, Dai
Pisces: Actinopterygii	<i>Malacanthus plumieri</i> (Bloch, 1786)	Bioturbação	Fr, Mr, Pr, Ar, Ca, Pi, La, Dai, Fa
Crustacea: Brachyura	<i>Goniopsis cruentata</i> (Latreille, 1803)	Bioturbação	Ia



**Figura 8.** Processos biogeomorfológicos (bioconstrução) no Atol das Rocas: (A) Biolito de alga vermelha encrustante parcialmente micritizado. A micrita de calcita-magnésiana é responsável pela extensiva micritização dos talos dessa alga; (B) Concha de gastrópode vermetídeo com porosidade interna não preenchida (Ver). Presença da alga *Porolython pachydermum* atuando como competidor por espaço (Alg) e cavidade/perfuração (Cav); (C) Assembléia fossilífera polítipica formada por corais escleractíneos (Co), foraminíferos bentônicos (seta), alga coralina vermelha (Alg) e

cavidade/perfuração por bioerosão (Cav); (D) Evidência de competição por espaço, por algas coralinas e corais escleractíneos, no processo bioconstrutivo; (E) Detalhe de biolito de alga vermelha com esporângio (estruturas reprodutivas) indicada pelas setas; (F) Bioconstrução (elipse) de conchas de gastrópodes vermetídeos (*Dendropoma irregulare*) no topo de uma alga vermelha bioconstrutora (Alg).



**Figura 9.** Processos biogeomorfológicos (bioturbação) em ambiente lagunar, canal de maré e zona de mesolitoral das ilhas arenosas do Atol das Rocas: (A) Atividade de bioturbação do peixe *Malacanthus plumieri* na laguna do recife. Círculo representa escavação no sedimento carbonático e as setas mostram pelotas fecais com partículas sedimentares; (B) Intensa atividade de bioturbação de poliquetas no depósito arenoso intermarés originando glóbulos de sedimentos; (C) Atividade de bioturbação do caranguejo *Goniopsis cruentata* em tapetes microbiais que trapeiam o sedimento no canal de maré da ilha do Farol (ambiente hipersalino e com alto acúmulo de matéria orgânica particulada); (D) Mistura de estruturas de bioturbação com crustáceos e aves *Sula* sp. no mesolitoral da ilha do Cemitério.

## HOLOCENE SEA-LEVEL HISTORY AND PALEOECOLOGY ON THE ROCAS ATOLL, NORTHEASTERN SOUTH ATLANTIC

MARCELO DE OLIVEIRA SOARES <sup>1</sup>\*, CARLOS AUGUSTO OLIVEIRA  
MEIRELLES <sup>2</sup>, MARIA MARLÚCIA FREITAS SANTIAGO <sup>3</sup>, CARLA MARIA  
SALGADO VIDAL SILVA <sup>3</sup>, MARCELA MARQUES VIEIRA <sup>4</sup>, NARENDRA  
KUMAR SRIVASTAVA <sup>4</sup>, VALESCA BRASIL LEMOS <sup>1</sup>, RUY KENJI PAPA DE  
KIKUCHI <sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900,  
Porto Alegre, RS, Brasil.;* <sup>2</sup> *Departamento de Biologia, Centro de Ciências,  
Universidade Federal do Ceará, Av. Mister Hull, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil.;*  
<sup>3</sup>*Departamento de Física, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará,  
Av. Mister Hull, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil.;* <sup>4</sup> *Departamento de Geologia,  
Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte,  
59072-970, Natal, RN, Brasil.;* <sup>5</sup> *Laboratório de Estudos Recifais, Instituto de  
Geociências, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, 40170-  
115, Federação, Salvador, BA, Brasil.*

e-mail: [paleomarcelo@gmail.com](mailto:paleomarcelo@gmail.com)

\* Corresponding author

RRH: HOLOCENE SEA-LEVEL HISTORY AND PALEOECOLOGY

LRH: SOARES ET AL.

Keywords: Atoll, Rocas, Reef, Atlantic Ocean, Paleoecology

### ABSTRACT

**Rocas Atoll is one of the smallest oceanic reefs in the world and is located 266 km from the Northeast coast of Brazil. Aiming at the elaboration of a paleocommunity succession and sea-level history, the aspects of reef bioconstruction and dating of geo-biological events were analyzed. In this paper we attempted to establish the sea-level indicators for Rocas Atoll, based on radiocarbon dates used to model relative sea-level changes. Petrographic analyses and paleontological survey are used to analyse new paleoecological data (biotic composition and**

paleocommunities). A glacio-isostatic prediction generated by the global sea-level model and the relative mean sea-level curve for the coast of Bahia and Rio Grande do Norte states were compared with field data. The Rocas Atoll oceanic reef is one of the most recent atolls in geological history (developed in the last 7000 years), in comparison with the reefs with similar geomorphology, located in the Indo-Pacific and Caribbean Oceans. The paleohydrodynamics, the variations of energy gradient on the leeward and windward sides and, above all, the eustatic holocenic oscillations greatly influenced reef evolution and biotic composition in beach rocks. Under high sea level, a large lagoon with great biological diversity, composed by unconsolidated bottom benthonic communities and patch reefs, was formed. A drop in sea level led to the formation of a shallow, small-sized lagoon of an extensive sand deposit and leeward islands in the only atoll from South Atlantic.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Paleocology and Atolls

Paleocology is defined as the study of ancient communities in their environmental contexts. Considering that such communities are adapted and controlled by a series of interacting and particular environmentally limiting factors, paleocology is concerned with finding about the nature of these adaptations and the interactions of ancient organisms with their environment and between each other (Clarkson, 1984; Doyle et al., 1995).

Atolls are mid-ocean reefs with an annular reef rim, enclosing a lagoon (Darwin, 1842). Atoll lagoonal facies occupy a significant proportion of the total carbonate facies associated with modern coral reefs (Yamano et al., 2002). Reef-islands are the small islands that form on the reef rim; they are composed predominantly of unconsolidated Holocene sands and gravels, mainly bioclastic skeletal sands derived from reef organisms, such as coral, coralline algae, mollusks, and foraminifera. Such islands are geologically very young, having accreted during the late Holocene. Although superficially similar to each other, atolls differ significantly in terms of the number, size, continuity, and morphology of reef-islands (Barry et al., 2007).

Considering the atoll evolution in the light of eustatic and hydro-isostatic effects indicates, however, that the observed configuration of atolls is a transient state that has lasted for only a fraction of Quaternary time (Dickinson, 2004). Geologists and paleontologists working together in coral-reef areas can provide useful information on the development of the reefs throughout the geological past (Best, 1999).

## 1.2. Holocene sea-level history of coastal reefs and atolls in the South Atlantic

Holocene reefs are of great geoscientific significance as they not only provide insight into questions regarding fossil reef facies and reef paleoecology, but they also help to reconstruct sea-level and high-resolution paleoclimatological variations in the Quaternary (Perry and Hepburn, 2008). In the Recent epoch, the presence of coral reefs reflects peculiar environmental conditions of sea waters (e.g., nutrient content, turbidity, light, water depth, temperature, and salinity) (Harriot and Banks, 2002).

The absence of important framework builders in Brazil such as the coral species *Acropora palmata* and *Acropora cervicornis* adds complexity to the interpretation of the relationship between sea-level change and paleoecology of reef growth in the southern Atlantic. In the Caribbean, these corals are found in association with the coralline algae *Porolithon pachydermum* and *Lithophyllum* sp., building reefs in high–moderate wave energy environments (Gherardi and Bosence, 2005). Therefore, it is important to understand how coralline-algal reefs may have responded to sea-level changes because of their dominance as framework builders (Macintyre, 1997; Leão et al., 2003).

Rocas is an oceanic atoll with reefs built by an assemblage of encrusting coralline red algae, vermetid gastropods, and encrusting foraminiferans (Kikuchi, 1994; Gherardi and Bosence 1999). Few works on this atoll have been done (Andrade, 1959; Ottman, 1963; Kikuchi, 1994; 2002; Gherardi and Bosence, 1999; 2001; 2005). Paleontologically, Rocas Atoll was constructed predominantly by calcareous algae, mollusks, foraminifers and only secondarily by corals (Kikuchi, 1994; 2002; Gherardi and Bosence, 2005). This fact is important because it is generally accepted that coralline algae lack potential to erect or be primary constructors of reefs in the Quaternary (Macintyre, 1997). Cores obtained on this oceanic reef presented calcareous algae as the predominant organism, forming more than 60% of the reef structure; the corals contributed with about 10% of the structure. The site represents the first record of coralline algae as primary reef builders during the Quaternary period (Kikuchi, 1994; 2002, Gherardi and Bosence, 2005).

Despite its importance as the only South Atlantic Atoll and being bioconstructed especially by calcareous algae, there are no paleoecological studies focusing on a succession model of the the paleocommunities throughout the Holocene. A few studies discuss the Holocene sea-level history in the Rocas Atoll, comparing with Northeast coast. Therefore, the aim of this study is: 1) compare new radiometric data in sea-level

indicators, beach rocks and reefs, with published data and mean sea-level behavior for the coast of Northeast Brazil; 2) analyse the paleoecological data, to understand the holocene sea-level history and geobiological changes in Rocas Atoll.

## 2. MATERIALS and METHODS

### 2.1. Study Site

Rocas Atoll ( $3^{\circ} 51'S$ ,  $33^{\circ} 49'W$ ) is located 266 km off the northeastern Brazilian coast (Gherardi and Bosence, 2005). Fernando de Noronha Archipelago is located 100 km east of Rocas Atoll ( $3^{\circ} 51'S$ - $32^{\circ}26' W$ ) (Fig. 01). The present day Rocas reefs are mainly built by encrusting coralline red algae, while the secondary framework builders are vermetid gastropods, encrusting foraminiferans, mollusks, corals, and tube-building polychaetes (Kikuchi, 1994; Gherardi and Bosence, 2001). The atoll reef rim has a slightly elliptical shape, 3.5 km long (E-W) and 2.5 km wide, interrupted by the north and north-west passes. The reef perimeter, which can be as wide as 600 m, present a number of intertidal pools varying in size and shape, from narrow fissures to large pools with sandy bottoms up to 1200 m long and 4 m deep (Leão et al., 2003).

#### **FIGURE 01** - Ocean region adjacent to Rocas Atoll

A highly unstable, discontinuous sheet of detrital carbonate sediments (up to 30 cm deep) covers the central tidal flat of Rocas Atoll. The sediment depth of the flat varies and the reef framework ground may be exposed in some parts. The carbonate sediments, mainly originating from the windward reefs, tend to be continuously transported towards the leeward side of the island by tidal currents, producing a sequence of bedforms with clearly defined edges and culminating as part of the two sand cays (Farol and Cemitério Islands, which are equivalent to 7.2 km<sup>2</sup> of the emerged area), and/or exported from the atoll by the north-west pass (Gherardi and Bosence, 2001).

The lagoon, restricted to the north-eastern area of the atoll, has an average 3.5 m in depth and is connected to oceanic waters by the north reef pass. On the outer edge of

the reef rim, carbonate sediments are patchily distributed between submerged reefs and coral heads. Sediments start to dominate the sea floor at 10 m depth on the leeward side and 20 m depth on the windward; Rocas Atoll is dominated by the South Equatorial Current and south-east to easterly winds (Gherardi and Bosence, 1999).

The east and southeast winds are predominant throughout the year, with a frequency of 45% and speeds varying between 6.0 and 10.0 m/s. These parameters have relative seasonality: during the winter months (from June to August), winds can be observed 35% to the SE and 15% to the E, with speed varying between 11.0 and 15.0 m/s; for the summer (from December to April), the frequency stays around 20% SE and E winds, with speed frequently over 20.0 m/s (Kikuchi, 2002).

The seawater temperature has an average of 27.0 °C, and can reach 42 °C in the pools, with salinity on the surface varying between 36 and 37. The tide regime is semidiurnal and mesotidal, with a maximum variation of 2.7 m, leaving exposed the reef flat in low tide (Kikuchi, 2002; Gherardi and Bosence, 2005).

## 2.2. Field and laboratory techniques

The field analysis was done at REBIO (Biological Reserve) on the Rocas Atoll, Rio Grande do Norte State, during an oceanographic expedition in the beginning (January-February) of 2008. The treatment of the general aspect of this oceanic reef required different steps, such as interpretation of aerial images, analysis of biogeomorphological characteristics, and collection of reef materials (Fig. 02) indicators of paleoenvironmental characteristics.

### **FIGURE 02** - Rocas Atoll Environments and location of samples

The reef was observed from its top exposed during low tides, and during free (snorkeling) and SCUBA diving, in its submerged parts. The observation points were initially plotted in geological maps (using GPS).

Geological and paleontological sampling was done in the sediments derived from erosion of the windward paleo-reef and in the beach calcarenite of Cemitério Island (Fig. 03) These samples, together with data derived from cores obtained in previous works (Kikuchi, 1994), were used in the elaboration of the paleoecological model. The samples were dated with Carbon-14 at the Radiometric Dating Laboratory (Universidade Federal do Ceará, Brazil).

### **FIG.03.** Sampling sites for geological and radiometric studies.

The calcarenite subfossil sampling was preceded by the geological survey of the area, the description of carbonate facies and the determination of outcrop position and orientation. Fossil collecting was such that taphonomically relevant information was not lost, and the procedures suggested by Simões and Kowalewski (1998) and Simões et al. (2000) were adopted.

The material was taken to the Marine Invertebrate Laboratory (Universidade Federal do Ceará, Brazil), where it was submitted to mechanical preparation, with the aid of hammers, needles and paintbrushes. Removal of skeletons from the calcarenite was accompanied by photographic documentation so that the orientation and the relative position of the macrofossils were not lost. The following aspects were taken into account: subfossil orientation, degree of articulation, evidence of predatory action, and taphocoenosis composition.

An extensive review of carbon-14 ages obtained at Rocas Atoll (Kikuchi, 1994; Gherardi and Bosence, 2001; Kikuchi, 2002; Leão et al., 2003; Gherardi and Bosence, 2005) and of its flora and fauna (Oliveira-Filho and Ugadim, 1976; Kikuchi, 1994; Machado and Souza, 1994; Gherardi and Bosence, 1999; Netto et al., 1999; Almeida and Costa, 2000; Villaça et al., 2001; Marques, 2003) was done in order to provide complementary data for the elaboration of the paleocommunities and holocene sea-level history proposed in this work.

### 3. RESULTS

#### 3.1. Sea-level indicators and paleoecology

The carbon-14 dating of the paleocommunity samples varied from  $1,543 \pm 51$  (Fig. 3D, level 2) to  $3,374 \pm 55$  (Fig. 3D, level 1) ky BP. Raised beachrock ages range from  $3,112 \pm 0.35$  ky BP to  $1,590 \pm 0.45$  ky BP (Table I). A chronostratigraphy correlation between the top of calcarenite (2 m up MSL) in Cemitério Island ( $3,11 \pm 35$  ky BP) and top of Rocas (3 m up MSL) was observed, suggesting a higher sea-level in the past. The paleosynecologic and paleoautoecological analysis of the fossils (Table II) found in the calcarenite suggest that the recent zone of the sand cays (Fig. 02, IV) represent a lagoon paleoecosystem that existed ca. 1-3 ky BP. This subtidal sand plain was formed when sea level was higher than today's. According to present established sea level curves

(Martin et al. 1985; Bezerra et al. 2003) sea level was 2-3 m above the current level approximately 3.000 to 4.000 years ago.

In the lithofacies and the beach sandstone stratigraphy, the planar cross bedded laminations was observed (Fig. 03C). Surface is slightly inclined toward the sea and sedimentation probably occurred in a phase when sea level was higher.

Considering data from the radiometric dating, the fossils, the calcarenite stratigraphy and the current evidences a model can be proposed of the paleo-communities corresponding to the invertebrate taphocoenosis found in these outcrops on Cemitério island (Fig. 04) in Rocas Atoll.

The fossiliferous assembly is probably representative of a low energy subtidal environment. A lagoon ecosystem with a benthic community represented by two biofacies (I and II). Biofacies I is representative of an unconsolidated bottom assembly populating bioclastic carbonate sediments. Biofacies II is a community that lives in the consolidated bottom of the coralline patch-reefs distributed in the bottom of the lagoon evidencing a higher sea level in the Holocene for approximately 3.000 years ago.

**TABLE I.** Radiometric dating done

**TABLE II.** Data from the paleontological survey of calcarenite (beach rocks) invertebrates

**FIG. 04.** Paleoecologic model of the Rocas Atoll in a higher sea-level

This paleoenvironmental system is composed by 3 main communities. The Massive coralline algal ridge community which took place in the Reef-Front, is composed of calcareous algae, foraminifers, coral and mollusks (Fig. 05, Fig. 06A-B). The coralline algae were predominant, chiefly *Porolithon pachydermum* and secondarily *Lythophyllum* sp., *Lythoporella* sp. and *Sporolithon* sp. In the reef taphocoenosis there are corals (*Siderastrea stellata* and *Favia gravida*), foraminifers (*Homotrema rubrum* and acervulinidae) and vermetid mollusks (especially *Dendropoma irregulare*) as secondary bioconstructors. In the lagoon a system composed of two biocenoses (biofacies I and II) predominated: carbonate bioclastic sediment paleocommunity (mollusks, crustaceans, echinoderm of infauna/epifauna) (Fig. 06E-F) and patch-reef paleocommunity (Fig. 06C and Fig. 07C-D) composed by corals (*Siderastrea stellata*, *Favia gravida*, *Porites* spp. and *Montastrea cavernosa*),

calcareous algae, vermetids, and fauna associated to the reef (mollusks, echinoderms, and crustaceans).

**FIG. 05.** Massive Coralline Algal Ridge Paleocommunity

**FIG. 06.** Lithofacies and paleocommunities identified on Rocas Atoll. Massive Coralline Algal Ridge Paleocommunity and Carbonate Bioclastic Sediment infauna paleocommunity

**FIG. 07.** Patch-reef paleocommunity

The Rocas paleocommunity may correspond to the stacking of parasequences during the end of a TST (Transgressive Systems Tract) and a HST (Highstand Systems Tract) phases during the end of the Quaternary. In this depositional environment, the presence of the high energy reef front (reef crest and reef wall) is observed, while in the back-reef there is a large lagoon with lower hydraulic energy. In the lagoon, naticid mollusks and crustaceans were important bivalve predators in the unconsolidated sediments and in the underwater reef areas (Fig. 06E-F).

The presence of the scleractinian corals *Favia gravida* and *Siderastrea stellata* indicates shallow environments, of high thermal amplitude, of waters with a low turbidity level and consolidated bottom components (patch-reefs paleocommunity) and are present in the fossiliferous assembly of calcarenite (beach rocks). The coralites of one of the examples are quite preserved (Fig. 06C) and without apparent signals of corrosion suggesting little time in the interface water/sediment and in the taphonomically active zone. This example suggests short distance transport, which might indicate an autoctonous/parautoctonous assembly.

Calcarenite biofacies in the Rocas Atoll are related to eustatic variations that generated shallow lagoon paleoenvironments (0-5 m) with patch reefs and bioclastic carbonate sediments in periods of high sea-level. When the sea level dropped, with strong subaerial erosion of reef tops, sediment production was enhanced forming the recent wide intertidal sandy deposits (sand flat in Fig. 02).

The windward reef, after an extensive growth (progradation phase) were intercepted by a drop in sea level which led to a coalescence of the reef ring (evidence by aggradation phase and sea-level curve). In this regressive phase (Fig. 08) the biocoenose was affected by the strong solar radiation and sedimentation. The tops of the reefs were exposed, leading to a strong erosion of the reef (Massive coralline

paleocommunity) (Fig. 06A-B), resulting in the bioclastic sedimentary filling of the lagoon and of the intertidal sand flat in the back-reef. Three different time intervals are observed which led to the modifications of the paleocommunities and the aggradation/progradation of the reef over probably during the past 7,000 years of ecological history (Fig. 08).

**FIG. 08.** Relative sea-level curve for the coast of Bahia

After the progressive coalescence of the entire reef ring (aggradation phase), infilling of the lagoon and generation of the sandy deposit, the formation of the leeward islands started. The recent cyanobacteria and plants were fundamental to the fixation of sandy islands (Fig. 09). In the past 2.000 years, with the slow regression in sea level (time interval I in Figure 08), the formation of hypersaline ponds with microbial carpets (microbial community) of cyanobacteria (current evidence starting with the microbialite facies) and green algae began. An important source of organic material for the formation of these carpets came from the guano of migratory birds in islands. The cyanobacteria and its biogenic structures aided in the fixation of the sandy island and fertilization of the soil (Figs. 09A-B) for later colonization by pioneer herbaceous plants and fauna (recent sand cay communities on Farol and Cemitério islands) (Fig. 09E). In the proposed paleoecological model, seven different communities (Tab. III), which varied in time and space over the last 7 ky, were identified by current and past evidences.

**FIG. 09.** Sedimentary facies and associated communities

**TABLE III.** Distribution of main taxa in communities

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Ecological history of coralline algal reef in the South Atlantic Ocean

Kikuchi (1994) obtained the oldest dating for the Rocas Atoll, which was  $4,860 \pm 20$  yr BP for the deepest core (11.6 m), however it is observed that this sampling was done on the leeward side of the reef. This may not be representative of the reef age, since it might have started to grow on its windward side, as pointed out by the author. Different  $^{14}\text{C}$  ages obtained for the Rocas Atoll were plotted on the sea level curve for the coast of Bahia (Martin et al., 1985) and Rio Grande do Norte (Bezerra et al., 2003) (Figs. 08 and 10). The maximum of the transgressive phase probably took place

approximately 5,100 years ago according to the sea level curve for the coast of Bahia and the South Atlantic proposed by Martin et al. (1985) and Raicich (2008). In this drowning phase, the progradation (vertical growth) took place with a level approximately 5 m above the current sea level.

**FIG. 10.** Sea-level curve for the coast of Rio Grande do Norte state and present radiometric data for sea-level indicators in Rocas Atoll

The ecological history of Rocas Atoll began in the Neogene Period (Kikuchi, 2002; Leão, 2003). Considering a Transgressive Systems Tract (TST), the drowning of a Pleistocene terrace developed on a “guyot” of the Fernando de Noronha chain (Northeast of Brazil) took place. The base of the reef carbonate structure is located approximately 15 m below the current sea level, as observed during scuba-diving and coring (Kikuchi, 2002). During this phase of rising of sea level (maximum inundation surface at approximately 5 ky BP), the growth of reef columns started at the top of the underwater mountain, in the time interval between 7,000 and 5,000 years ago, during the Holocene (Fig. 08). The Equatorial South oceanic current in the area (E-SE region), resulting in an arch disposition of the reef (which currently presents an ellipsoid form) and its origin on the windward side (Kikuchi, 2002; Guerardi & Bosence, 2005).

The “Rocas” (Zone III in Fig.2) interpreted as the product of the breaking of the reef ring by storm waves (Gherardi, 1996), are classified by Kikuchi (2002) as reef residues, due to the holocenic eustatic variations, adjusted to a high sea level.

Some of the reef blocks (allochthonous) are upside down in relation to original orientation of growth (reef frameworks are inverted) (Fig. 03B), this blocks are not used for interpretations. A taphonomic process known as time-averaging possibly takes place in this zone.

The reef structure used in radiometric dating (Fig. 03D) and interpretations of the aggradation and progradation stages is probably an autochthonous/parautochthonous sample. The evidences for this hypothesis are: the presence of *Siderastrea stellata* coral in life position (corallite structure in taphonomic analysis); the absence of high energy to transport the large reef blocks; and the dated samples in this paper that indicate a higher sea-level in accordance to sea-level curves developed for Northeast of Brazil.

#### 4.2. Reef Paleocommunity

Gischler & Lomando (1997) show that the main invertebrates found in the calcarenites of the barrier reefs and atolls of Belize were mollusks and corals. Kikuchi & Leão (1997), Kikuchi (2002) and Gherardi & Bosence (2005) indicate the presence of coral and mollusk fragments in beach rocks of Cemitério Island. However, there is no identification of this taphocoenosis or paleoecologic inferences about this paleoinvertebrates, to understand the holocene sea-level history in Rocas Atoll.

Two aspects of beachrock formation have been the centre of controversy (Vieira & De Ros, 2006; Vieira et al., 2007) in Northeast of Brazil. First, the exact portion of the beach profile in which the original sands have been deposited: intertidal or adjacent supratidal and subtidal zones. Second, there are some uncertainties between sea level changes and beachrock cementation. Carbon 14 ages, paleoecological and taphonomic data, obtained from beachrocks and biogenic reef, indicate a past higher sea level in Rocas Atoll and are a powerful tool to understand the holocene sea-level history in South Atlantic Ocean.

Kikuchi (2002) suggest that the sea level was 3m above the current level approximately 3.000 to 4.000 years ago at the Rocas Atoll. In higher sea level, the mollusks and crustaceans dominate the unconsolidated bottom benthic community in the lagoon paleoecosystem according to the calcarenite taphocoenosis data (Biofacies I). The analysis of the species composition, trophic structure and abundance of both meiobenthos and macrobenthos on the Rocas sand flat showed that the recent fauna comprise a community subjected to intense physical stress (vermiform taxa) by water-movement (Netto et al. 1999) very different from than that found in the beachrocks (mollusks and crustaceans, common in carbonate sediments, as shown by Alongi, 1989; Nacorda & Yap, 1997).

Warwick & Clarke (1993) showed that vermiform organisms have an increasing dominance in disturbed sites (e.g. high energy), whereas mollusks and crustaceans decrease in abundance. Rocas Atoll is presently a high energy reef (Gherardi & Bosence, 2005). This paleoecologic hypothesis, about benthic communities of unconsolidated environments being modified according to the hydrodynamic and sedimentary stress, explains the change in biotic composition of beachrocks in Cemitério Island.

### 4.3. Sea-level

Martins's relative sea level curve indicates that sea level rose and dropped several times over the last 7.000 years, that is, three times over the level it is at today (Fig. 08). Reef growth in the coast of Bahia, Northeast of Brazil conforms to this sea-level behavior (Leão et al., 2003). The growth of South Atlantic reef accompanied the sea level rise reaching its climax approximately 5.000 years before present, coinciding with the maximum height of the sea was 5 m above its current level (Martin et al. 1985; Kikuchi, 2002; Leão et al., 2003; Vieira et al., 2007).

A phase of sea level stability, which lasted approximately 1.000 years, must have favored the growth of several reef structures in a phase of progradation on the South Atlantic coast and in the oceanic reefs of the underwater mountain chains like the Rocas Atoll. However, since 4.000 years ago, due to the various quick drops and rises of the sea level, which left the tops of the different reefs emerged and subject to erosion, the reef structures could only grow laterally (Leão et al., 2003) in a phase of aggradation of the carbonate structure.

Reconstruction of Holocene relative sea-level changes based on deglaciation models (Tushingham and Peltier, 1992) show a high sea-level stand at around 5ky BP for Northeast Brazil, strongly influenced by the Antarctic melt water. A compilation of Holocene relative sea-level data carried out by Isla (1989) showed that MSL for the southern hemisphere was higher than at present. Relative sea levels up to +3 m above present-day MSL for the last 5.000 years have also been recorded for parts of the west African coast (Delibrias, 1973). A lower than present-day mean sea-level around 2,700 years BP and a higher than present (+2 m above MSL) sea-level at 2,5ky BP for the central part of the Brazilian coast was presented by Martin et al. (1993).

A review of the 'smooth vs. oscillating sea-level curve' discussion (Angulo and Lessa, 1997; Lessa and Angulo, 1998; Martin et al., 1998) is necessary to address this point for Rocas Atoll. Vertical uncertainty related to paleosea-level indicators and sample positions is a central point for this debate. Bezerra et al. (2003) suggest these opposing views can be accommodated if age-height uncertainty, regional glacio-isostatic rebound and local factors that influence sea level are taken into account. A more cautious approach is presented in this study.

The sea-level data obtained in Rocas Atoll, about 230 km to the east of the study by Bezerra *et al.* (2003), have a deviations from the curve developed for Rio Grande do

Norte state coast (northeastern of Brazil) (Fig. 10). This relative inconsistency between prediction and field data for Rocas Atoll indicates that local factors (subsidence rate, wind, waves) that contribute to sea-level changes cannot be ignored. The subsidence rate, 0,19 mm/year (Kikuchi, 1994), possibly have a strong impact in the Holocene sea-level history in Rocas Atoll and in deviations from curves by Bezerra et al. (2003) and Martin et al. (1985) developed for Northeast of Brazil.

## 5. CONCLUSIONS

Paleohydrodynamics, energy gradient on the windward/leeward sides and the eustatic oscillations had a fundamental role in the biotic composition of beachrocks in Cemitério Island and biogenic reefs in Rocas Atoll. The Rocas Atoll paleocommunity probably correspond to the stacking of two parasequences correlated to Holocene sea-level oscillations. The biofacies model suggests that the difference, between the paleofauna of calcarenite and the recent fauna of sand flat, is due to changes in sea-level and hydrodynamics. The radiometric and paleoecological data for sea-level in this reef does not match Peltier's model entirely nor the curve for the Central Brazilian coast. Factors such as tectonics of Fernando de Noronha chain, or wind and wave patterns makes generalization on sea-level changes difficult. The local factors (subsidence rate, winds and waves) have an important contribution to understand the Holocene sea-level and the ecological history in the only atoll from South Atlantic.

## 6. ACKNOWLEDGMENTS

This article is part of the doctorate thesis of the Post-Graduation program in Geosciences of Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) entitled "*Geobiologia do Atol das Rocas, Atlântico Sul* [Geobiology of Rocas Atoll, South Atlantic]". M.O Soares thanks the CNPq (National Scientific Research and Development Board) for granting the Doctorate scholarship; PETROBRAS and Fundação SOS Mata Atlântica for financing the research of the field works; ICMBIO for granting the research license and supporting the field activities (mainly the coordinator of Reserva Biológica Maurizélia Brito).

---

## 7. REFERENCES

- ALMEIDA, J.R., and COSTA, J., 2000, Entomological fauna from Reserva Biológica do Atol das Rocas, RN, Brasil: I- Morphospecies composition: *Revista brasileira de Zoologia*, v. 60, n.2, p. 291-298.
- ALONGI, D.M., 1989, The role of soft-bottom benthic communities in tropical mangrove and coral reef ecosystems: *Crit. Rev. Aquatic Sci*, v.1, p. 243–280.
- ANDRADE, G.O., 1959, O recife anular das Rocas (Um registro das recentes variações eustáticas no Atlântico equatorial): *Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros*, v.XI, p. 29-61.
- ANGULO, R.J. and LESSA, G.C., 1997, The Brazilian sea level curves: a critical review with emphasis on the curves from Paranagua. and Cananeia regions: *Mar. Geol*, v. 140, p. 141-166.
- BARRY, S.J., COWELL, P.J., and WOODROFFE, C.D., 2007, A morphodynamic model of reef-island development on atolls: *Sedimentary Geology*, v.197, p.47-63.
- BEST, M.B., 1999, Coral as speaking stones: *Geologie en Mijnbouw*, v.78, p.141-145.
- BEZERRA, F.H.R., BARRETO, A.M.F. and SUGUIO, K., 2003, Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte coast, Brazil: *Marine Geology*, v. 196, p. 73-89.
- CLARKSON, E.N.K., 1984, *Invertebrate paleontology and Evolution*: Butler & Tanner Ltda, London, 323p.
- DARWIN, C., 1842, *The structure and Distribution of Coral Reefs*: Smith Elder, London. 256p.
- DELIBRIAS, G., 1973, Variation du niveau de la mer sur la cote ouest africaine, depuis 26.000 ans: *Colloques Internationaux du CNRS*, v.219, p.127–134.
- DICKINSON, W.R., 2004, Impacts of eustasy and hidro-isostasy on the evolution and landforms of Pacific atolls: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 213, p. 251-269.
- DOYLE, P., BENNETT, M.R., and BAXTER, A.N., 1994, *The Key to Earth History*: John Wiley & Sons, Chichester, 231p.

GHERARDI, D.F.M., 1996, Recent carbonate sedimentation on the coralline-algal Atol das Rocas, Equatorial South Atlantic, Brazil: Unpublished Phd. thesis, University of London, London, 350p.

GHERARDI, D.F.M., and BOSENCE, D.W.J., 1999, Modeling of the Ecological Succession of Encrusting Organisms in Recent Coralline-Algal Frameworks from Atol das Rocas, Brazil: *Palaios*, v. 14, p. 145– 158.

GHERARDI, D.F.M., and BOSENCE, D.W.J., 2001, Composition and community structure of the coralline-algal reefs from Atol das Rocas, South Atlantic, Brazil: *Coral Reefs*, v.19, p. 205–219.

GHERARDI, D.F.M., and BOSENCE, D.W.J., 2005, Late Holocene reef growth and relative sea-level changes in Atol das Rocas, equatorial South Atlantic: *Coral Reefs*, v.24, p.264-272.

GISCHLER, E., and LOMANDO, A.J., 1997. Holocene cemented beach deposits in Belize: *Sedimentary Geology*, v.110, p. 277-297.

HARRIOTT, V.J., and BANKS, S.A., 2002, Latitudinal variation in coral communities in eastern Australia: a qualitative biophysical model of factors regulating coral reefs: *Coral Reefs*, v. 21, p. 83–94.

ISLA, F.I., 1989, Holocene sea-level fluctuation in the southern hemisphere: *Quaternary Science Reviews*, v.8, p. 359–368.

KIKUCHI, R.K.P., 1994, Geomorfologia, Estratigrafia e Sedimentologia do Atol das Rocas (REBIO-IBAMA/RN): Unpublished MSc thesis, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 144p.

KIKUCHI, R. K. P. (2002). Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial Ocidental, Brasil. Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil. C. Schobbenhaus, D. A. Campos, E. T. Queiroz, M. Winge and M. Berbert-Born. Brasília, DNPM. 1: 379-390.

LEÃO, Z. M. A. N., KIKUCHI, R. K. P. and TESTA, V. 2003, Corals and coral reefs of Brazil, in Cortés, J., ed., *Latin American Coral Reefs*: Elsevier Science, Netherlands, p. 9-52.

LESSA, G.C. and ANGULO, R.J., 1998, Oscillations or not oscillations, that is the question – Reply: *Mar. Geol*, v. 150, p. 189-196.

MACHADO, A.J., and SOUZA, F.B.C., 1994, Principais espécies de foraminíferos e briozoários do Atol das Rocas: *Revista Brasileira de Geociências*, v.24, n.4, p. 247-261.

- MARQUES, L.V., 2003, Influência de peixes herbívoros na palatabilidade de macroalgas do Atol das Rocas: Unpublished MSc. thesis, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 49p.
- MARTIN, L., FLEXOR, J.M., BLITZKOW, D., and SUGUIO, K., 1985, Geoid change indications along the Brazilian coast during the last 7000 years, in Gabriel, C. and Salvat, B., eds., Proceedings 5<sup>th</sup> International Coral Reef Congress: ICRS Commission, Tahiti, p. 85-90.
- MARTIN, L., FOURNIER, M., MOURGUIART, P., SIFEDDINE, A., TURQ, B., ABSY, M.L., and FLEXOR, J.M., 1993, Southern oscillation signal in South American paleoclimatic data of the last 7.000 years: *Quaternary Research*, v. 39, p. 338–346.
- MARTIN, L., BITTENCOURT, A.C.S.P., DOMINGUEZ, J.M.L., FLEXOR, J.M., and SUGUIO, K., 1998, Oscillations or not oscillations, that is the question: Comment on ANGULO, R.J. and LESSA, G.C. “The Brazilian sea level curves a critical review with emphasis on the curves from Paranagua and Cananea regions” [*Mar. Geol.* 140, 141-166]: *Mar. Geol.*, v.150, p. 178-187.
- NACORDA, H.M.E. and YAP, H.T., 1997, Structure and temporal dynamics of macroinfaunal communities of a sandy reef flat in the northwestern Philippines: *Hydrobiologia*, v.353, p.91–106.
- NETTO, S.A., ATTRILL, M.J., and WARMICK, R.M., 1999, The effect of a natural water-movement related disturbances on the structure of meiofauna and macrofauna communities in the intertidal sand flat of Rocas Atoll (NE, Brazil): *Journal of Sea Research*, v.42, p.291-302.
- OLIVEIRA-FILHO, E.C., and UGADIM, Y., 1976, A survey of the marine algae of the Atol das Rocas (Brasil): *Phycologia*, v.15, n.1, p. 41-44.
- OTTMAN, F., 1963, “L’atol das Rocas” dans l’Atlantique sud tropical: *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, v.2, p. 101-107.
- PELTIER, W.R., 1998, Global glacial isostatic adjustment and coastal tectonics: In: Stewart, I., Vita-Finzi, C. (Eds.), *Coastal Tectonics*. Geol. Soc. London Spec. Publ. 146, 1-29.
- PERRY, C.T., and HEPBURN, L.J., 2008, Syn-depositional alteration of coral reef framework through bioerosion, encrustation and cementation: Taphonomic signatures of reef accretion and reef depositional events: *Earth-Science Reviews*, v. 86, p. 106-144.
- RAICICH, F., 2008, A review of sea level observations and low-frequency sea-level variability in South Atlantic: *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 33, p. 239-249.

SIMÕES, M.G., and KOWALEWSKI, M., 1998, Complex shell beds as paleoecological puzzles: a case study from the upper Permian of The Paraná Basin, Brazil: *Facies*, v.38, p.175-196.

SIMÕES, M.G., MARQUES, A.C., MELLO, L.H.C., GHILARDI, R.P., and MELLO, L.H.C., 2000, Early onset of modern-style shell beds in the Permian sequences of the Parana Basin: implications for the Phanerozoic trend in bioclastic accumulations: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n.3, p.495-499.

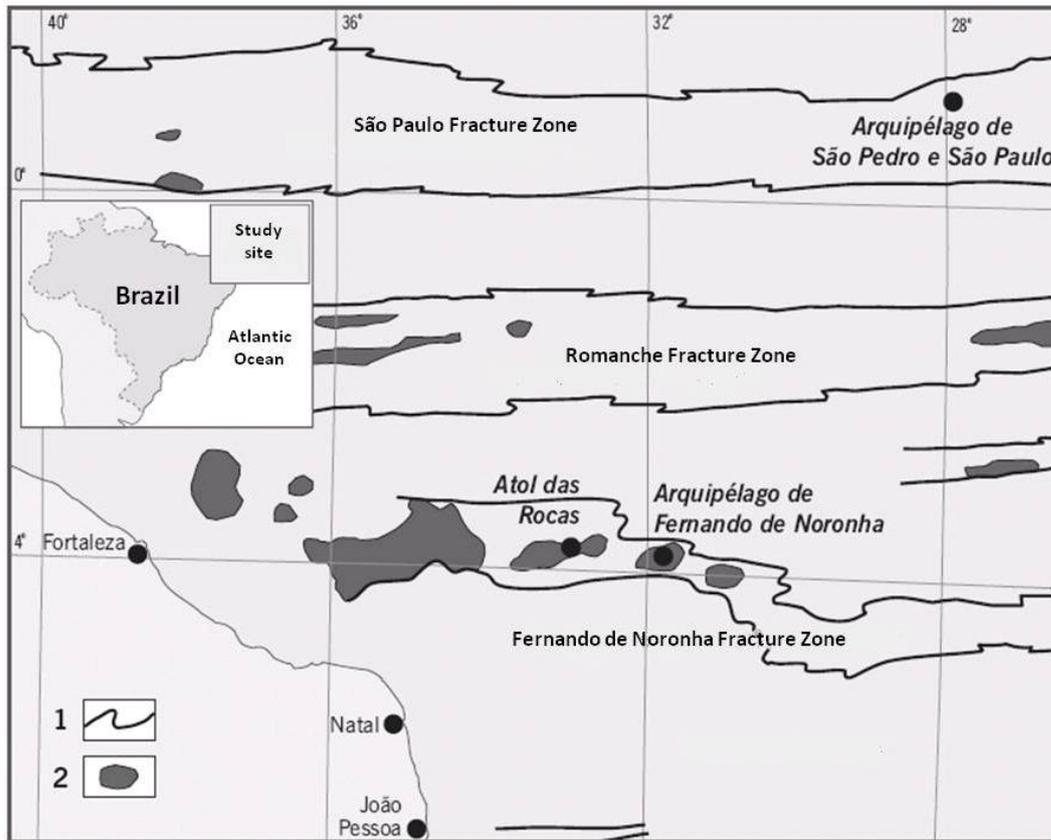
TUSHINGHAM, A.M., and PELTIER, W.R., 1992, Validation of the ICE-3G model of Würm-Wisconsin deglaciation using a global data base of relative sea-level histories: *Journal of Geophysical Research*, v.97, p. 3285–3304.

VIEIRA, M.M., and DE ROS, L.F., 2006, Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil: *Sedimentary Geology*, v. 192, p. 207-230.

VIEIRA, M.M., DE ROS, L.F., and BEZERRA, F.H.R., 2007, Lithofaciology and palaeoenvironmental analysis of Holocene beachrocks in northeastern Brazil: *Journal of Coastal Research*, v. 23, n. 6, p. 1535–1548.

VILLAÇA, R.C., FONSECA, A.C., PEZZELA, C.A.C., and JENSEN, V.K., 2001, Ecology of macroalgae from the Atol das Rocas Reef, Brazil, *in* Moustaka- Gouni, M., Bird, C.J., Cox, E.J., and Raven, J.A., eds., 7<sup>th</sup> International Phycological Congress: Phycology Association. Greece, p. 112-113.

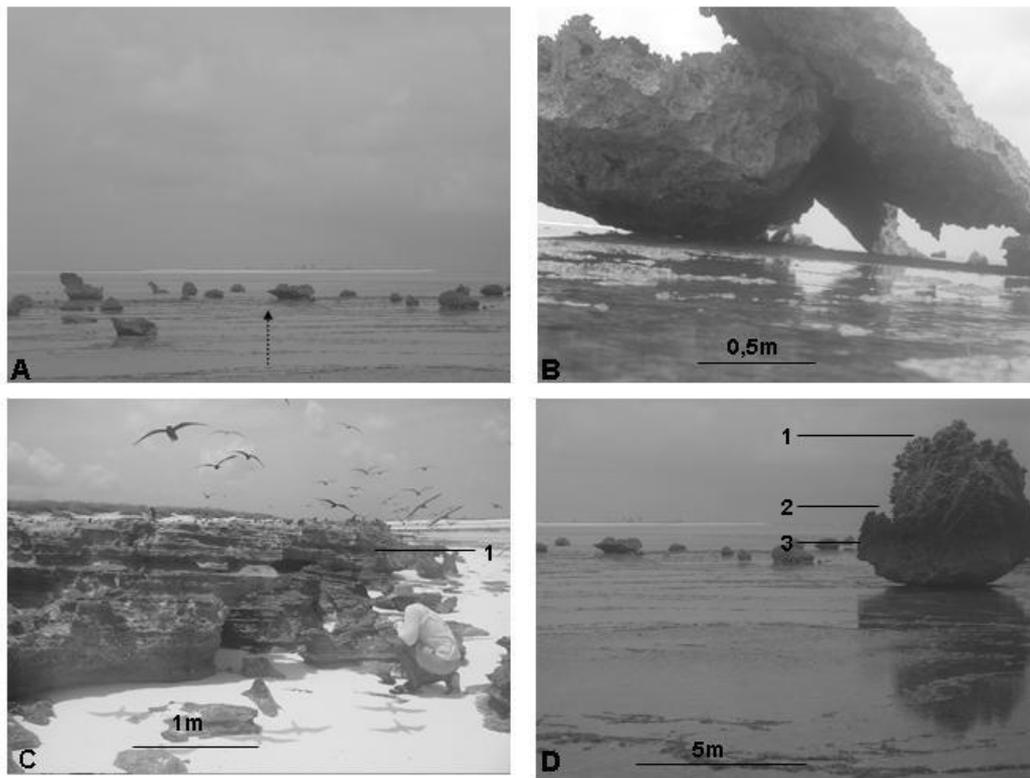
YAMANO, H., KAYANNE, H., MATSUDA, F.; and TSUJI, Y., 2002, Lagoonal facies, ages, and sedimentation in three atolls in the Pacific: *Marine Geology*, v.185, p. 233-247.



**Figure 01.** Ocean region adjacent to Northeast Brazil: situation of Atol das Rocas in Fernando de Noronha Fracture Zone and another islands from Atlantic Ocean. 1. Fracture zones limits; 2. Magmatic rocks.



**Figure 02.** Rocas Atoll environments and location of geologic and radiometric samples. Geological samples: (I) Permanent lagoon; (II) Sand Flat; (III) Reef residues; (IV) Sand Sand Cays: A- Farol Island, B- Cemitério Island; (V) Reef-Flat; (VI) Reef Ridge. Aerial image obtained during field work with the aid of Brazilian Air Force (FAB) under 0.1 spring low tide. Radiometric samples: Bioclastic/peloidal Grainstone in environment IV-B (calcarenite) and algal-coralline framestone in environment III (reef residues).



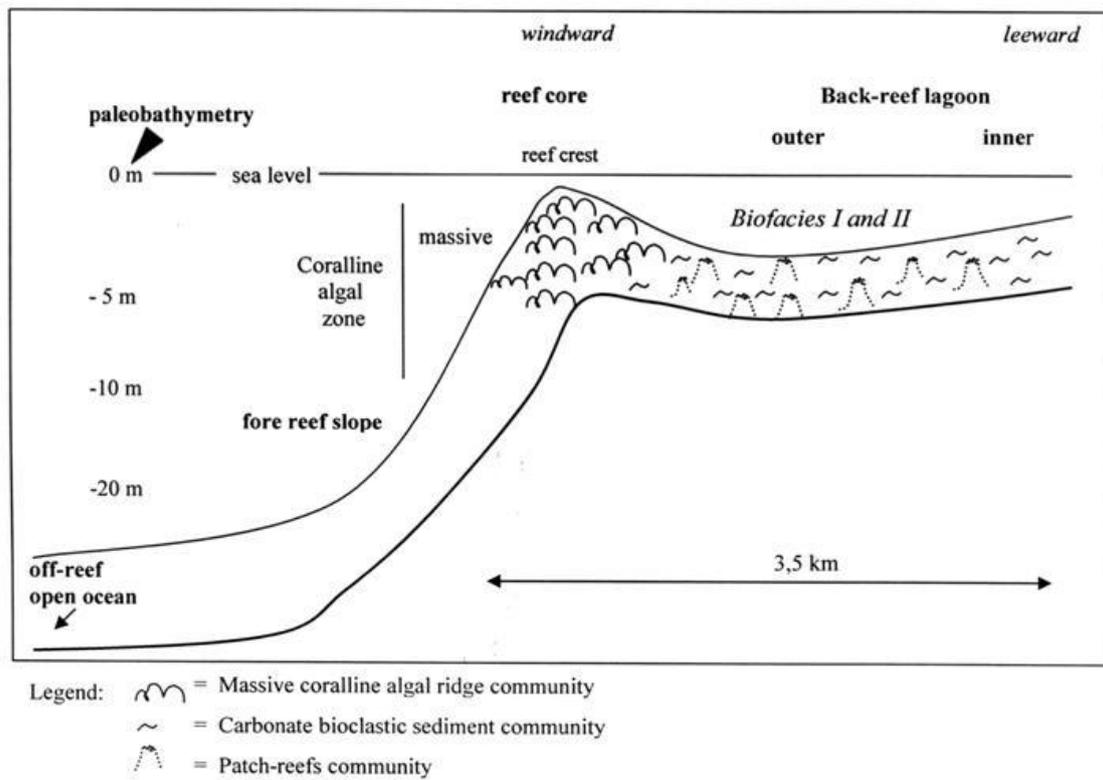
**Figure 03.** Geological and radiometric sampling from Rocas Atoll. (A) Part of the Reef Residue Zone. In the back, Farol Island, which is composed of bioclastic carbonate sediments. The arrow shows the direction of the unidirectional hydrodynamic current which predominated throughout the Holocene; (B) Allochthonous bioconstructed reef elements, on the windward zone of Rocas Atoll, showing signs of transportation and intense corrosion; (C) Bioclastic Grainstone (beach-rocks) on Cemitério Island, showing the seaward dipping low-angle cross stratification and stratigraphic level (level 1) corresponding to the position of the sample used for  $^{14}\text{C}$  ( $3033 \pm 63$  ky BP); (D) Largest residue of the paleoreef generated under conditions of a higher sea level, during a carbonate progradation phase (Autochthonous/Paraautochthonous). Level 1 presents oldest phase in which the paleoreef was exposed during a regressive event (dating by  $^{14}\text{C}$ :  $3374 \pm 55$  ka BP in this work). Level 2 represents more recent phase in which the reef tried to adjust to a lower sea level by aggradation (dating by  $^{14}\text{C}$ :  $1543 \pm 51$  ky BP in this work). Level 3 represents the current sea level. Photo obtained during spring low tide.

**Table 01.** Radiometric dating done on the calcarenite (beach rocks) on the Rocas Atoll (Equatorial South Atlantic). Abbreviations: MSL = mean sea level, m = meters. \* Data source: Kikuchi & Leão (1997). # Data source: Gherardi & Bosence (2005).

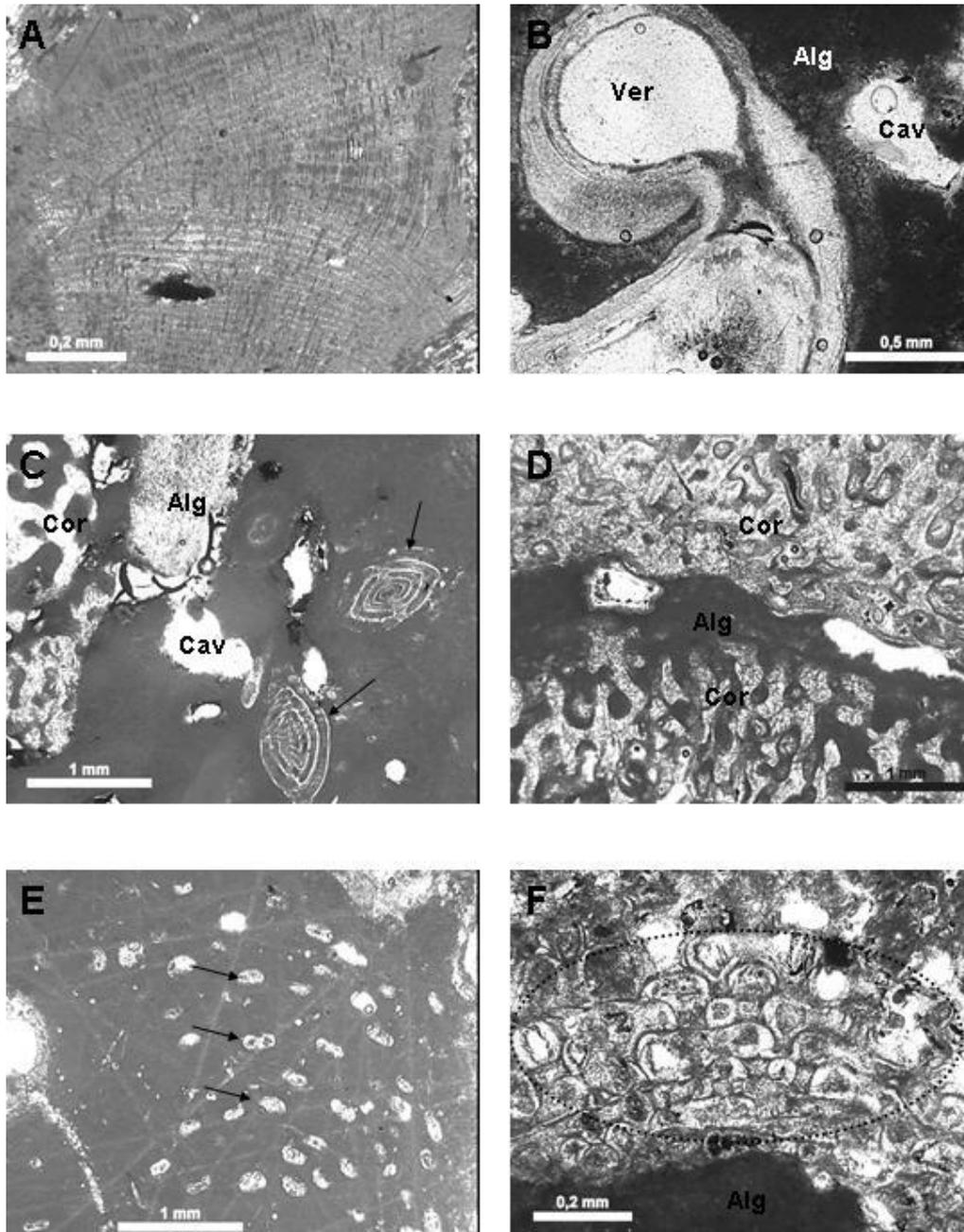
	Conventional age $^{14}\text{C}$ ky BP (measured age $\pm 1 \sigma$ )	Datum (m MSL)
Gastropod <i>Astraea</i> sp.	3,11 $\pm$ 0,35	2,0 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,83 $\pm$ 0,16	2,0 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,63 $\pm$ 0,15	0,5 m
#Gastropod <i>Astraea</i> sp.	2,60 $\pm$ 0,45	1,65 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,51 $\pm$ 0,17	1,8 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	1,91 $\pm$ 0,15	1,5 m
#Coralline algae	1,59 $\pm$ 0,45	0,75 m

**Table 02.** Data from the survey of calcarenite (beach rocks in Cemitério Island) invertebrates of the Rocas Atoll, Western South Atlantic.

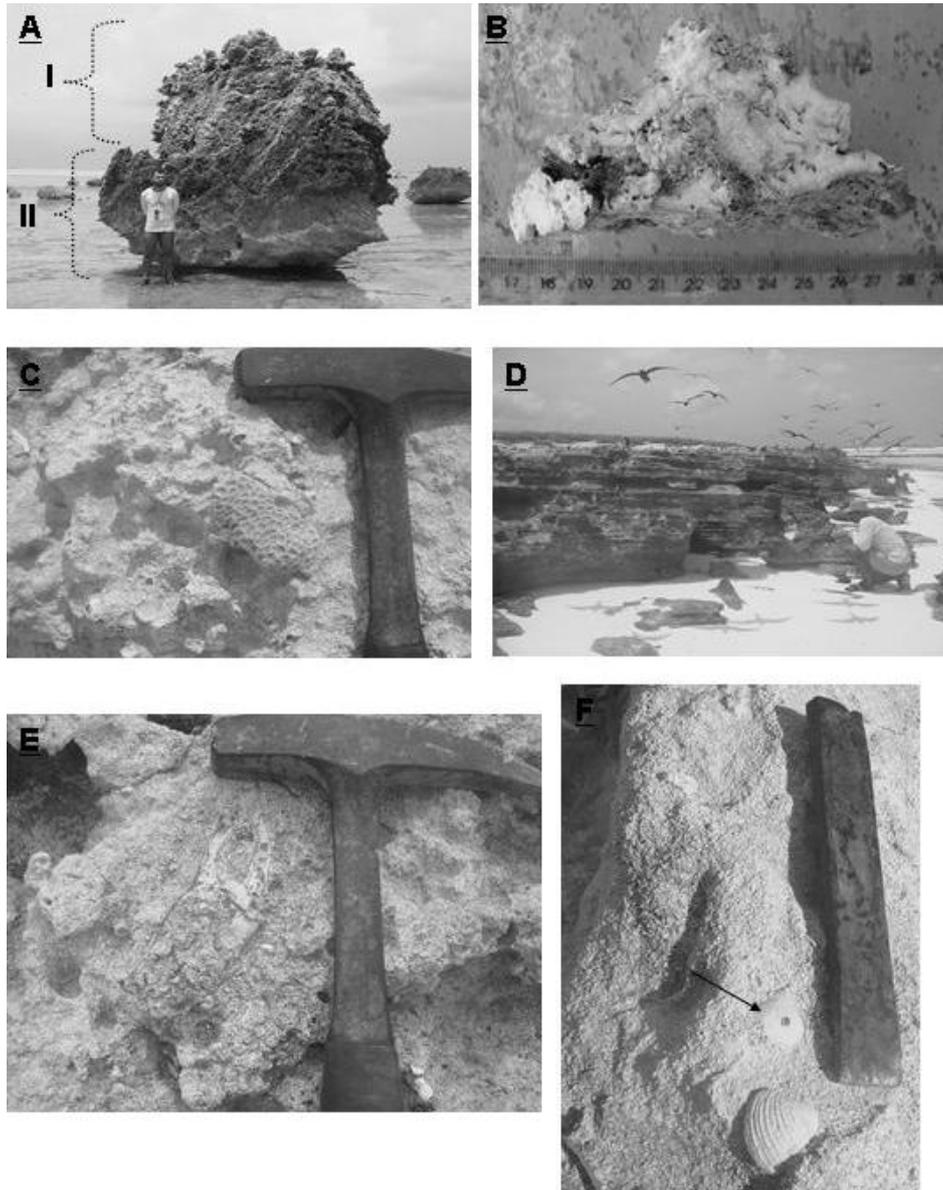
<i>Paleobiological taxa</i>	<i>Species</i>
Mollusca, Gastropoda	<i>Tonna maculosa</i> (Dillwyn, 1817) <i>Astraea</i> sp. <i>Capullus incurvatus</i> (Gmelin, 1871) <i>Malea noronhensis</i> Kempf & Matthews, 1969
Mollusca, Bivalvia	<i>Codakia orbicularis</i> (Linnaeus, 1758) Bivalvia sp.1
Cnidaria, Anthozoa	<i>Siderastrea stellata</i> Verrill, 1868 <i>Favia gravida</i> Verrill, 1868
Arthropoda, Crustacea	Decapoda sp.1



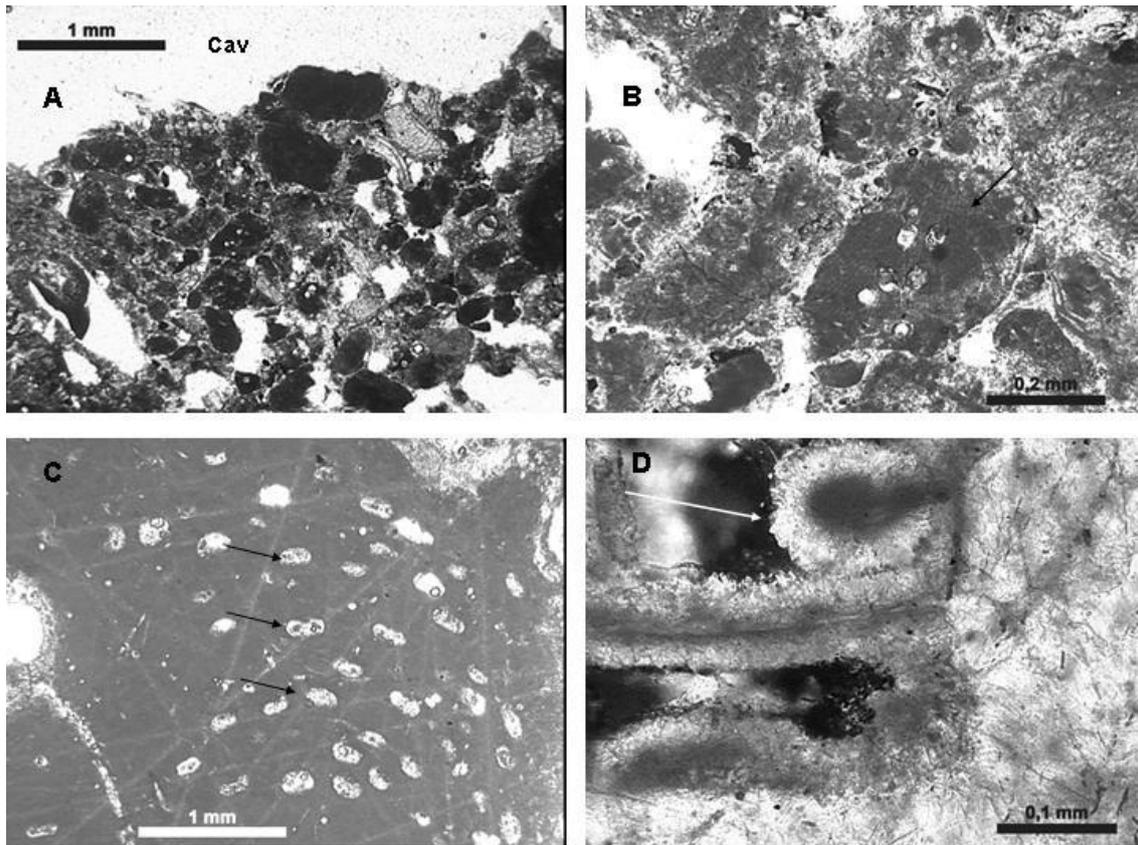
**Figure 4.** Paleoecologic model of the Rocas Atoll in a higher sea-level probably between 3000 and 4000 years ago. Paleobathymetry 0m = +2-3 m above the current sea-level. Biofacies I and II belong to the taphocoenosis found in the calcarenite (beach rocks) (Bioclastic/Peloidal Grainstone and Coralline Framestone Lithofacies).



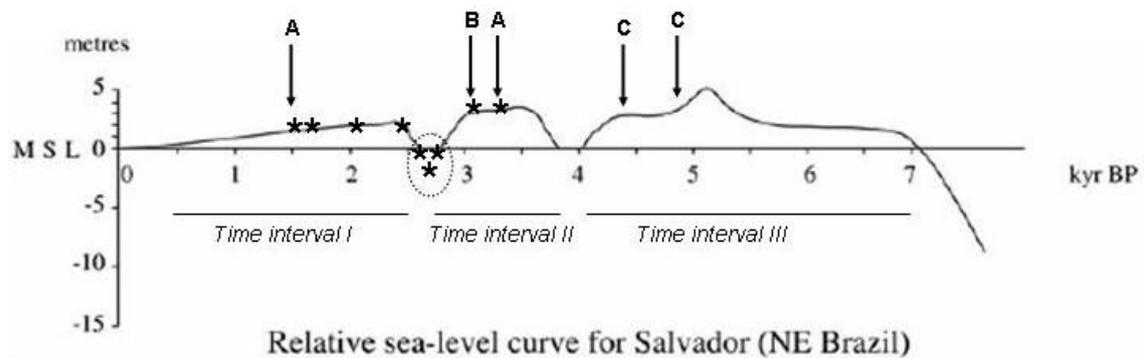
**Figure 5.** Massive Coralline Algal Ridge Paleocommunity: (A) Red encrusting coralline biolite algae partially micritized. The magnesium-calcite micrite is responsible for the extensive micritization of the stalks of these algae; (B) Vermetid gastropod shell with not-filled in internal porosity (Ver). Presence of *Porolytho pachydermum* algae acting as a competitor for the space (Alg) and cavity/ boring (Cav); (C) Polytypic fossilifer assembly formed by scleractinian corals (Co), benthic foraminifers (arrows), red coralline algae (Alg) and cavity / boring by bioerosion (Cav); (D) Evidence of competition for space by coralline algae and scleractinian corals in the bioconstructive process; (E) Detail of the red algae biolite with sporangium (reproductive structures) indicated by arrows; (F) Bioconstruction (ellipse) of vermetid gastropod shells (*Dendropoma irregulare*) on top of bioconstructing red algae (Alg). Such gastropods are one of the main bioconstructors of the Rocas Atoll reef and indicators of the variations of the sea level due to being in intertidal or immediately subtidal zones.



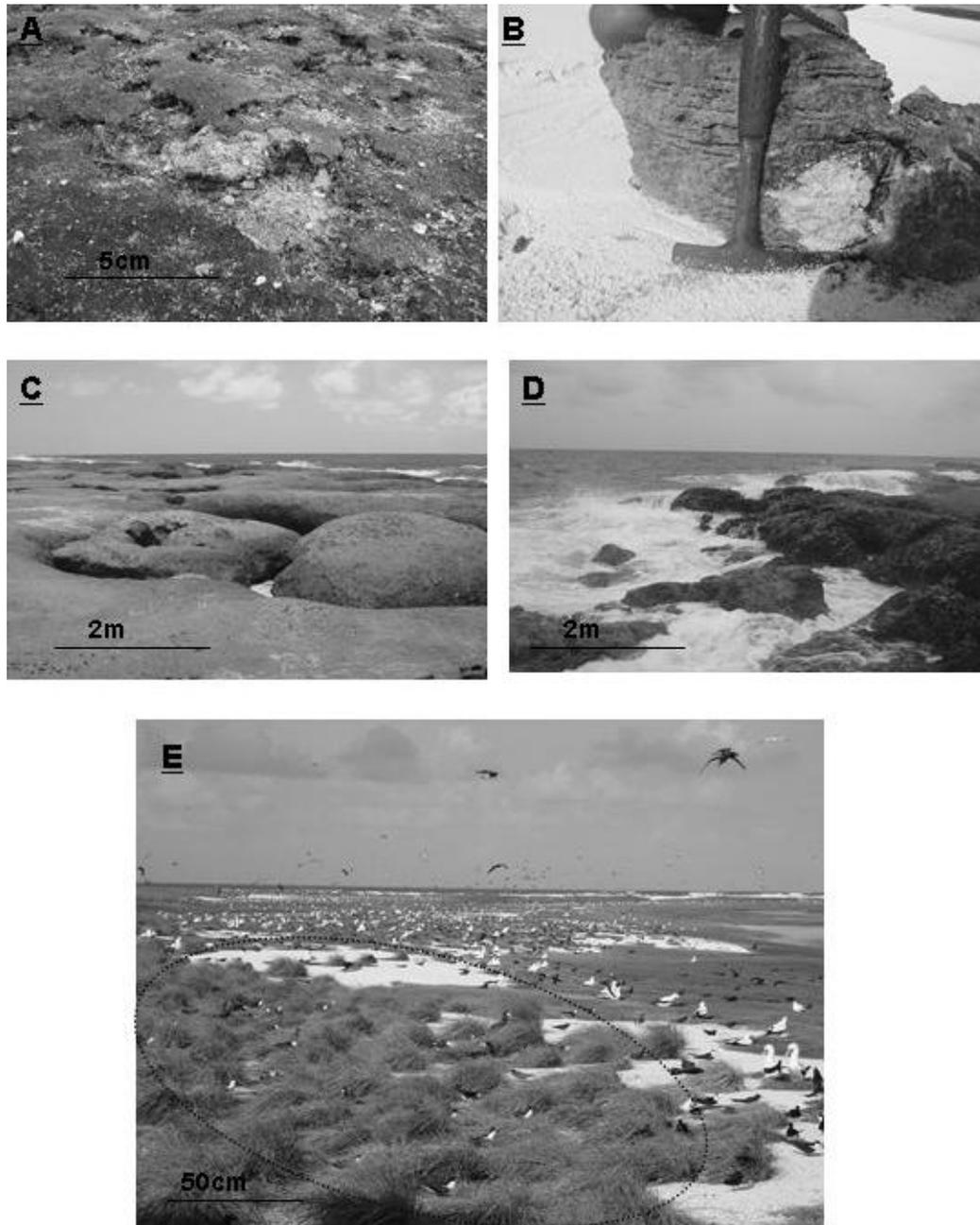
**Figure 06.** Lithofacies and paleocommunities identified on Rocas Atoll, in reefs and beach rocks: (A) Reef residues. Such blocks evidence a previous position of a more elevated sea level which occurred approximately 3300 years ago, having resulted in carbonate progradation. In (I) Progradation phase, (II) Agraddation phase; (B) Coralline Algal Framestone Facies corresponding to the paleocommunity. Massive Coralline Algal Ridge Paleocommunity; (C) *Siderastrea stellata* Coral in the calcarenite taphocoenosis (bioclastic grainstone) of Cemitério island. Observe the good taphonomic preservation of the corallites, which probably belonged to a patch-reef community; (D) Bioclastic Grainstone Facies exhibiting seaward dipping low angle cross stratification on Cemitério Island. Such lithofacies is found in the shallow lagoon depositional environment with carbonate bioclastic sediment community and patch-reefs community; (E) Crab quelea of the unconsolidated bentonic environment at sea level preserved in the calcarenite of Cemitério Island; (F) Evidence of predatory action by naticid mollusks on bivalve shell of infauna of the bottom of the paleolagoon preserved in the bioclastic grainstone facies (beach-rock) on Cemitério Island.



**Figure 07.** Facies and cements of beach rocks from Atol das Rocas: (A) Cavity with high filling-in of peloids (majority algae) and micrite. Bioclastic/Peloidal Grainstone Facies; (B) Red coralline algae stalk (*Porolython pachydermum*) with sporangium cellular structure (indicated by arrow). High presence of peloidal/bioclastic material from other algae. Extensive micritization. Bioclastic/Peloidal Grainstone Facies; (C) Detail of the red algae biolite with sporangium (reproductive structures) indicated by arrows. Coralline Framestone Facies; (D) *Pore-lining* of isopach fringes of prismatic crystals on top micritic cuticle (magnesium calcite). Indicates freatic marine precipitation where the pores were saturated with water. This mineralogical process evidences the sea level and the submersion of the reef in the past. Coralline Framestone Facies. Samples of beach rock approximately 2m above the current sea level. Images obtained in Uncrossed polarizers microscopic.



**Figure 08.** Relative sea-level curve for Salvador (NE Brazil). Modified from Martin et al. (1985). Time interval III represents the beginning of the formation of the only South Atlantic Atoll with drowning and progradation of the carbonate structure with its growth up to approximately 5 m above current level. Letter C represents the oldest dating obtained in cores by Kikuchi (1994):  $4.86 \pm 0.21$  ky BP (11.2m deep in core obtained on leeward side) and  $4.41 \pm 0.20$  ky BP (10.5m deep in core obtained on leeward side). Time interval II represents a growth by progradation of the reef. The paleoreef residues (Coralline Framestone Facies) (letter A) and the calcarenite (Bioclastic/Peloidal Grainstone facies) (letter B) dated in this paper are found at high sea level (approximately 2-3m). Time interval I represents the formation of current environments characterized a gentle drop in sea level which resulted in the aggradation phase of the Rocas Atoll reef (dating represented by letter A in stratigraphic position 2 - Fig. 3D) to the current sea level. The circle represents dating done on calcarenite by Kikuchi (1994) and Gherardi and Bosence (2005) whose average values put the depositional event at low sea level. However, considering the standard deviation of the  $^{14}\text{C}$  dating, we can include such events in time intervals I or II by the fossil assembly characteristics.

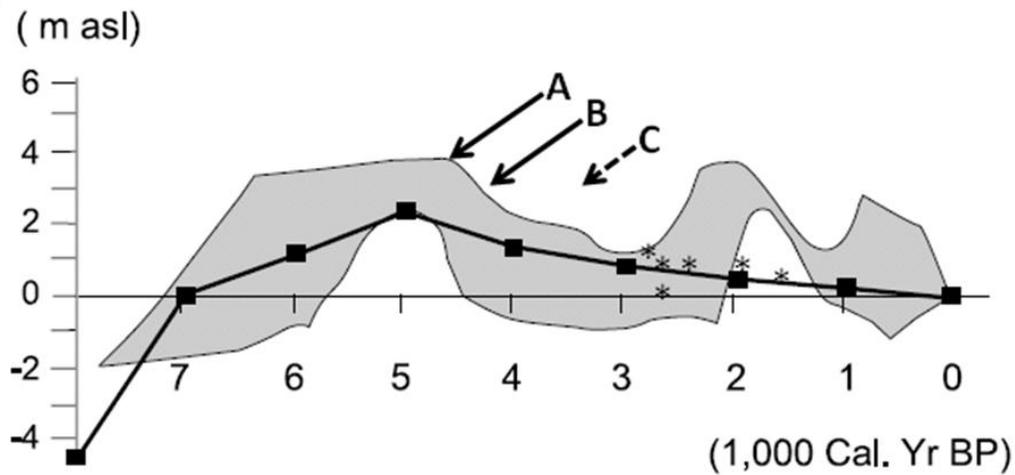


**Figure 09.** Island and windward side with current biological communities. (A) Formation of microbial carpets in hypersaline and high organic area of Farol Island. Such cyanobacteria formations and algae work in the trapping of carbonate bioclastic sediment. This current evidence is suggested as a model of fixation of the leeward carbonate sandy islands on Rocas Atoll; (B) Formation of columnar microbialite on Farol Island exhibiting laminations similar to the flat-parallel ones; (C) Windward reef ring exhibiting solid aspect being the predominant component of this taphocoenosis calcareous algae *Porolython pachydermum*; (D) High level of hydraulic energy on a windward portion of the atoll, resulting in the observed erosive aspects; (E) Part of the Fauna (Birds) and Flora (*Cyperus ligularis* herbaceous marked with an elliptical form) community. Such characteristic pioneer plants of primary succession, after the action of the microbial community, allowed the colonization of the sandy islands. The picture also shows part of the largest population of marine birds of the South Atlantic Ocean islands.

**Table 03.** Distribution of the taxons in the respective current and preterit communities throughout ecological history of the Rocas Atoll in the Holocene. Massive Coralline Algal Community = Evidence by autochthonous rocks (reef residues). Carbonate Bioclastic Sediment Community and Patch-reef community = Evidence by calcarenite rocks in Cemitério Island. Paleoreef community = Evidence by cores (Kikuchi, 1994; Gherardi & Bosence, 1999). Sand cay community and Microbial community = Evidence in current community.

TAXA	Massive coralline algal community	Carbonate bioclastic sediment community	Patch-reef community	Microbial community	Paleoreef community	Sand cay community (Farol island).	Sand cay Community (Cemiterio island)
Algae <i>Porolithon pachydermum</i> Foslie, 1909	X		X		X		
Algae <i>Lythophyllum</i> sp.	X		X		X		
Algae <i>Lythoporella</i> sp.	X		X		X		
Algae <i>Sporolithon</i> sp.	X		X		X		
Coral <i>Siderastrea stellata</i> Verrill, 1868	X		X		X		
Coral <i>Favia gravida</i> Verrill, 1868			X		X		
Coral <i>Porites</i> spp.			X				
Sponge <i>Cliona</i> borings	X		X		X		
Sipunculid / polychaete borings	X		X		X		
Vermetid <i>Dendropoma irregulare</i> (d'Orbigny, 1842)	X				X		
Foraminifera <i>Homotrema rubrum</i> (Lamarck, 1816)	X		X		X		
Gastropoda <i>Tonna maculosa</i> (Dillwyn, 1817)		X	X				
Gastropoda <i>Astraea</i> sp.			X				
Gastropoda <i>Capullus incurvatus</i> Gmelin, 1871		X					

Gastropoda <i>Malea noronhensis</i> Kempf & Matthews, 1969			X				
Bivalvia <i>Codakia orbicularis</i> (Linnaeus, 1758)		X					
Crustacea Decapoda sp.1		X					
Crustacea <i>Gecarcinus lagostoma</i> H.Milne Edwards, 1837						X	X
Crustacea <i>Goniopsis cruentata</i> (Latreille, 1803)						X	
Unidentified Cyanobacteria				X		X	
Unidentified Unicellular Chlorophyta				X		X	
Ave <i>Sula dactylatra</i> Lesson, 1831						X	X
Ave <i>Sula leucogaster</i> (Boddaert, 1783)						X	X
Ave <i>Anous stolidus</i> (Linnaeus, 1758)						X	X
Ave <i>Anous minutes</i> Boie, 1844						X	X
Ave <i>Sterna fuscata</i> Linnaeus, 1766						X	X
Insecta						X	X
Plantae <i>Cyperus ligularis</i> Linnaeus, 1759						X	X
Plantae <i>Sesuvium portulacastrum</i> Linnaeus, 1759						X	
Plantae <i>Portulaca oleracea</i> Linnaeus, 1759						X	



**Figure 10.** Sea-level curve for the coast of Rio Grande do Norte state (gray area) and present radiometric data for sea-level indicators in Rocas Atoll (points and arrows). The glacio-isostatic prediction of Peltier (1998) are plotted by solid line. Letters A and B represents the oldest dating obtained in cores by Kikuchi (1994):  $4.86 \pm 0.21$  ky BP (11.2 m deep in core obtained on leeward side) and  $4.41 \pm 0.20$  ky BP (10.5 m deep in core obtained on leeward side). Letter C represents the top of Rocas (level 1 in Fig. 3D), dated in this paper, a high sea level (approximately 3 m) with significant deviation from this curve. The points represents the dated samples from beachrocks in Cemitério Island (Gherardi, 1996; Kikuchi, 2002 and this paper). Modified from Bezerra et al. (2003).

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

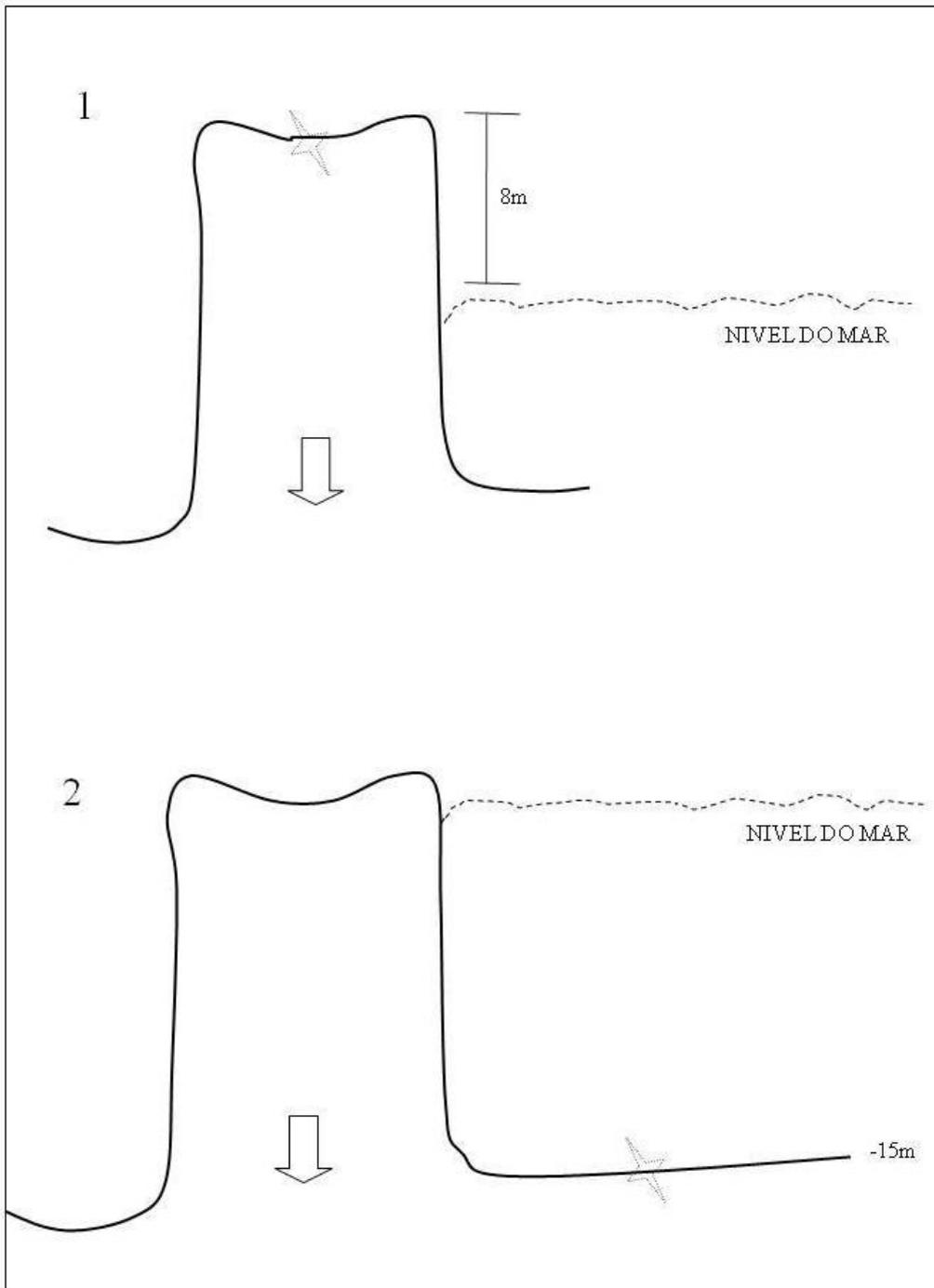


### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

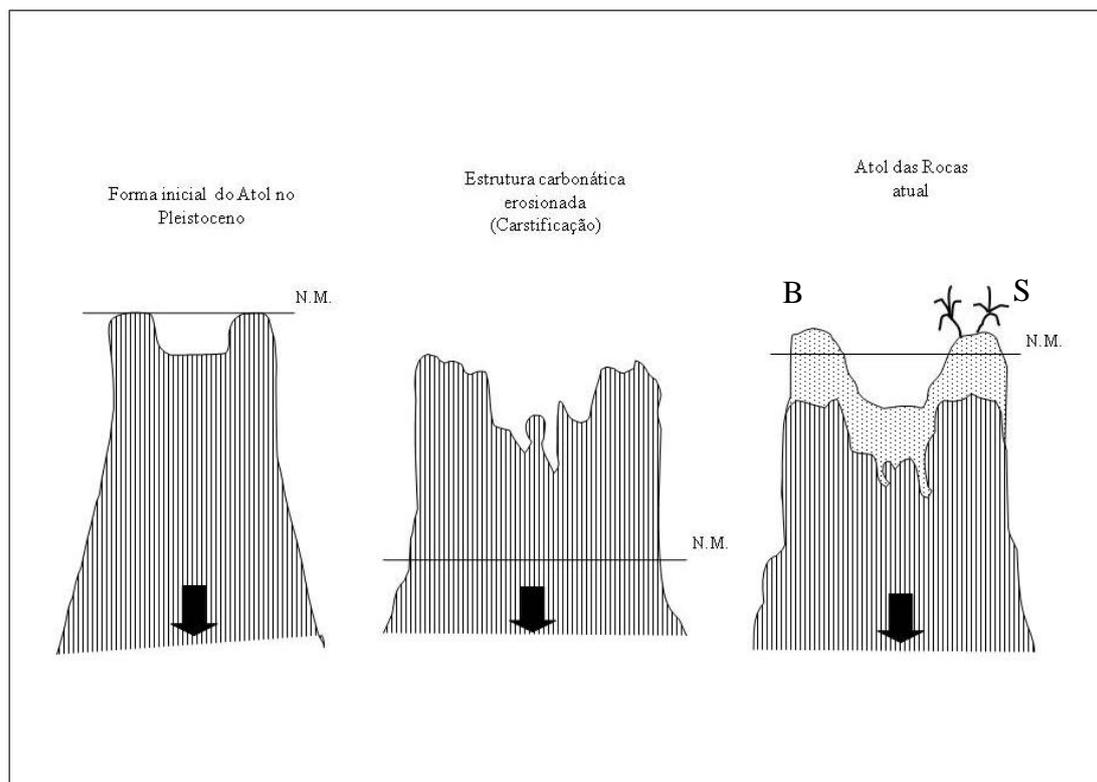
Foram estudados aspectos da Geobiologia do Atol das Rocas utilizando-se de uma abordagem interdisciplinar e holística com o mínimo de compartimentalização possível. Abordagens inéditas da biogeomorfologia, paleoecologia, estudo das fácies sedimentares, variações do nível do mar e evolução foram realizadas revelando um novo conhecimento da dinâmica temporal e espacial desta importante reserva de Biodiversidade e Geodiversidade.

A História do Atol das Rocas inicia-se provavelmente no Mioceno (Terciário) a partir de montes vulcânicos derivados da dorsal meso-oceânica (Cadeia de Fernando de Noronha). Por se situar a W do Arquipélago de Fernando de Noronha, mais distante da dorsal meso-atlântica, o substrato vulcânico do Atol deve ter idades maiores que 39 milhões de anos em relação à datação apresentada por Cordani (1970). Kikuchi (1994) abordou a presença de um provável calcário pleistocênico que serve de base para o recife atual. Esta estrutura carbonática pode ter configurado um paleoatol que teria atingido cerca de 8m acima do nível do mar atual na fase de superfície de inundação máxima (SIM) no Pleistoceno há aproximadamente 120ka AP. Atualmente, um terraço a cerca de 15m de profundidade, verificado nos mergulhos autônomos, pode representar o topo de uma plataforma carbonática pretérita que sofreu um processo de subsidência (FIG. 23).



**FIGURA 23.** Hipótese de sucessão dos ambientes recifais no intervalo Pleistoceno / Holoceno. O paleoatol (modelo 1) no Pleistoceno em uma fase de superfície de inundação máxima (SIM) com a fábrica carbonática respondendo a oscilação eustática e a configuração morfológica correspondente atualmente. O terraço no fundo adjacente seria o topo pleistocênico após subsidência (modelo 2) no Atol das Rocas no nível de mar atual. A seta representa o fenômeno da subsidência. Segundo Kikuchi (1994) a taxa de subsidência estaria em 0,19mm/ano. Assim, seriam necessários 120 ka AP (após a fase de SIM) para rebaixamento de aproximadamente 23 metros o que corrobora o modelo proposto.

Após a superfície de inundação máxima cobrir o trato de sistema transgressivo tem início um evento regressivo gradual que culmina no trato de mar baixo. Nesta fase ocorre a eliminação gradual da fábrica carbonática e ocorre intensa carstificação do que viria a ser a superfície de onde o atual recife no Oceano Atlântico Equatorial, denominado Atol das Rocas, cresceu no Holoceno (FIG.24).



**FIGURA 24.** Modelo esquemático da evolução do Recife do Atol das Rocas baseado nas oscilações eustáticas e na subsidência. Legenda: N.M.= Nível do Mar, B= Barlavento, S= Sotavento, Seta indica subsidência.

Ao analisar-se o histórico da classificação do Sistema Recifal de Rocas, ao longo do século XIX e XX, observam-se opiniões diferenciadas. Darwin (1842) sugeriu que não existiam atóis verdadeiros no Oceano Atlântico. Davis (1928) classificou Rocas como: “*a slightly emerged bank atoll, the only one of this kind in the open Atlantic*”. Vallaux (1940) atribuiu a Rocas a categoria de “*almost-atoll*” devido classificá-lo como um recife-barreira anular algálico e observar que sua laguna ocupava uma pequena área. Kikuchi (1994); Kikuchi & Leão (1997) e Gherardi & Bosence (1999) classificaram o recife biogênico analisado como o único Atol do Atlântico Sul Equatorial.

Segundo a teoria de Darwin (1842), Atol significa: “um abaixamento geológico e lento de uma ilha na qual em volta houveram recifes em franjas e com o crescimento dos corais formaria o atol”. De acordo com esse conceito clássico, o Atol das Rocas não

é considerado um verdadeiro atol devido a sua base de formação não ser de corais, e sim de algas calcárias. Um aspecto histórico importante é que na viagem do Beagle o naturalista passou por Fernando de Noronha, mas não passou pelo Atol das Rocas (apenas a 150 km de Noronha). Caso tivesse tido a oportunidade de visitá-lo teria conhecido um Atol que fugiria dos padrões reconhecidos em seu famoso livro “*The Structure and Distribution of Coral Reefs*”, pois o Atol representa, na literatura científica, o primeiro recife oceânico do Quaternário bioconstruído principalmente por algas calcárias, e não por corais escleractíneos.

A teoria de subsidência de Darwin (1842) é baseada na premissa de que o crescimento recifal e a subsidência podem gerar a seqüência unidirecional de franjas, barreira e, no último estágio, o atol. Para o único Atol do Atlântico Sul observa-se que a aplicabilidade desse modelo não é corroborada, tendo em vista que os principais fatores na sucessão barreira-atol no Holoceno foram às variações eustáticas e a exposição subaérea. A baixa profundidade da laguna do Atol é outra evidência de que a subsidência não é o fator principal na evolução recifal. As baixas taxas de subsidência (por resfriamento da litosfera) podem explicar este padrão. Em alguns atóis do Indo-Pacífico também se observou a inaplicabilidade do modelo darwiniano (Purdy & Winterer, 2006).

Kikuchi & Leão (1997) e Gherardi & Bosence (1999) diferenciaram características do Atol das Rocas em relação aos recifes do Caribe e Indo-Pacífico tais como: não possuir corais como principais bioconstrutores e uma laguna de baixa profundidade estando restrita a uma pequena porção da área recifal.

O Recife biogênico estudado pode ser considerado um Atol oceânico pelas seguintes características: possui uma plataforma elíptica a circular; possui um anel recifal bem constituído com algas calcárias (principalmente *Porolithon pachydermum*); desenvolveu-se no topo de montes vulcânicos submersos cuja base encontra-se a mais de 4000m de profundidade no assoalho oceânico; possui uma laguna rasa e ilhas arenosas no lado do anel recifal oposto ao que recebe o vento predominante (como nos atóis caribenhos) e uma maior largura do anel do recife na porção barlavento.

O problema da classificação do Atol das Rocas decorre da disputa entre um critério morfológico versus genético. Outra questão é o fato das principais teorias de formação e de classificação de recifes coralíneos serem baseadas em recifes do Indo-Pacífico e só mais recentemente no Atlântico, principalmente no Mar do Caribe. A elaboração de um sistema de classificação genética para o Atol das Rocas é de difícil

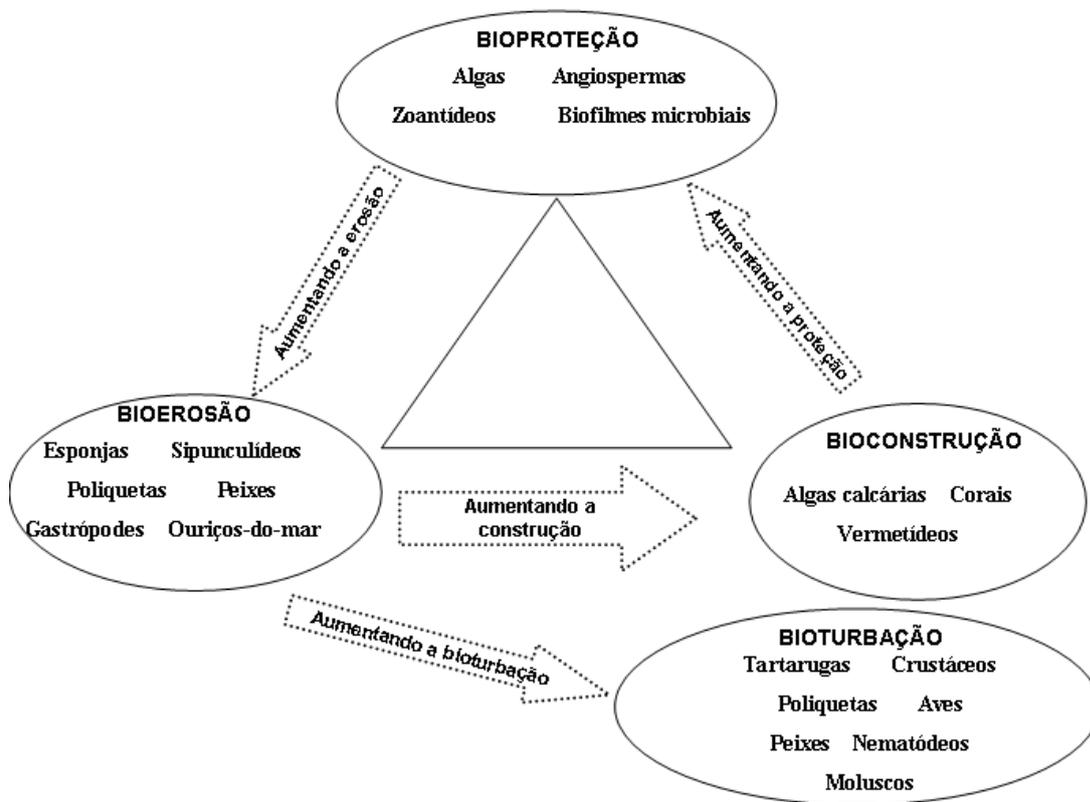
execução devido sua formação e crescimento ser resultante de um fenômeno multivariado de eustasia, subsidência, topografia antecedente e crescimento dos bioconstrutores, o que dificulta a integração dos dados. Os critérios morfológicos são aplicáveis de maneira prática e permitem a classificação do recife biogênico de Rocas como um Atol verdadeiro.

Os parâmetros geométricos, analisados para o recife de Rocas, sugerem valores que estão inseridos na faixa de amplitude para os atóis do Indo-Pacífico e Caribe (TAB. 03). Observa-se que este recife encontra-se com um baixo nível de elipticidade (Ie) e no espectro de valores sugeridos, o que corrobora a hipótese de uma Forma de Atol (Hipótese 7). Stoddart (1965) considera o índice de elipticidade um parâmetro padrão para comparação dos atóis dos oceanos tropicais.

**TABELA 03.** Parâmetros morfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul. Dados para Indo-Pacífico e Caribe segundo Stoddart (1965)\*.

<b>Atóis analisados/ Índices morfológicos</b>	<b>F (Horton)</b>	<b>Rc (Miller)</b>	<b>Re (Schumm)</b>	<b>Ie (índice de elipsidade)</b>
Atol das Rocas, Atlântico Sul	0,55	0,20	0,84	1,43
Atóis do Indo-Pacífico e Caribe*	0,1 – 0,8	0,1-1,0	0,3-1,0	1,02-7,91

Ao longo da História Ecológica do Atol das Rocas o relevo do recife foi afetado por diferentes processos biogeomorfológicos como: controle de processos erosivos, bioproteção, bioerosão recifal, bioturbação, cimentação de areia carbonática biogênica, produção de sedimentos biodetríticos e bioconstrução (principalmente de algas calcárias, vermetídeos, foraminíferos e corais). Organismos incluindo aves, tartarugas, corais, zoantídeos, algas, gastrópodes, bivalves, vermetídeos, crustáceos, poliquetas, sipunculídeos, ouriços-do-mar, nematódeos, esponjas, foraminíferos, plantas herbáceas e microorganismos atuam nos diferentes grupos de processos biogeomorfológicos gerando as características únicas deste recife oceânico no Atlântico Sul Equatorial (FIG.25).



**FIGURA 25.** Interação entre diferentes processos biogeomorfológicos no recife do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial). Modificado de Soares *et al.* (submetido).

A figura 25 representa apenas parte dos importantes componentes dos sistemas biogeomorfológicos e não ilustra os processos “inorgânicos” da superfície do recife oceânico ou a interação destes com os bioprocessos. Os processos exógenos (modos inorgânicos de erosão, transporte e deposição) e processos endógenos afetam os sistemas biogeomorfológicos.

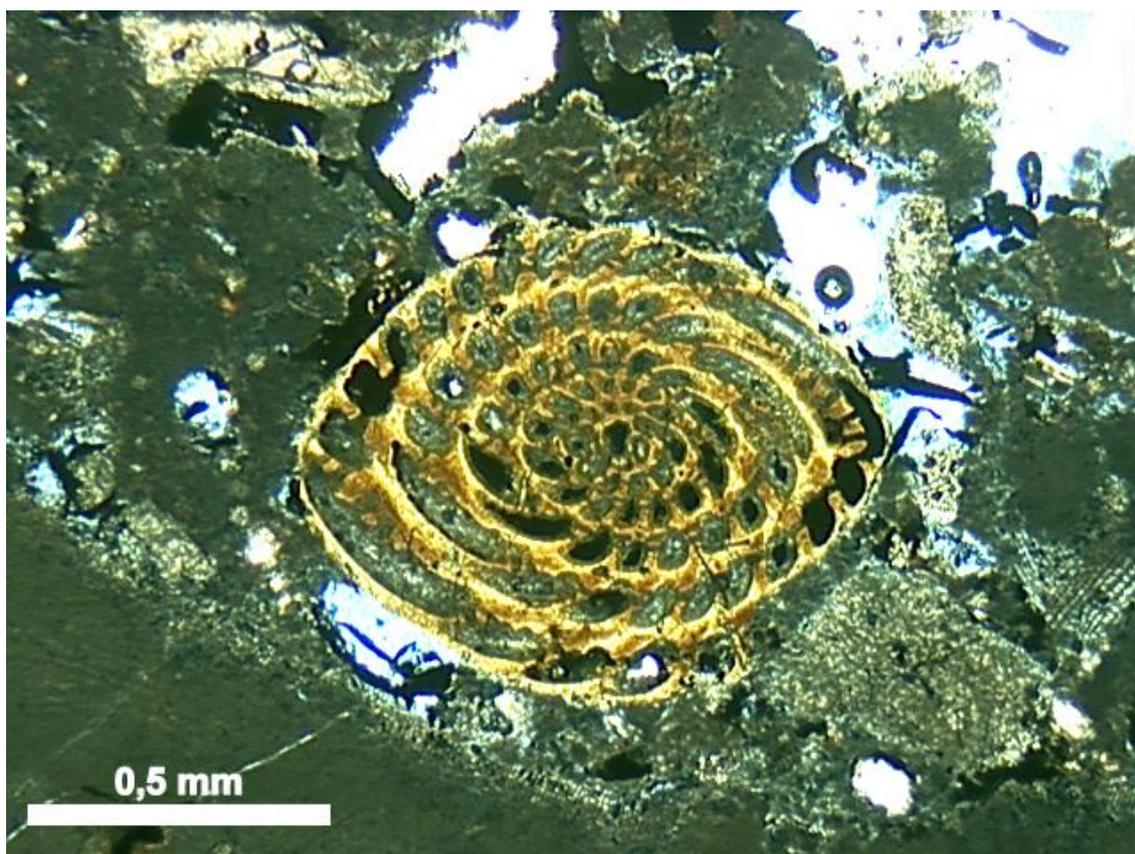
Esta abordagem biogeomorfológica é interessante, principalmente em ambientes recifais, e ainda incipiente no Brasil devido à extrema compartimentalização e ausência de abordagem interdisciplinar na investigação científica nacional.

Diferentes fases do desenvolvimento recifal (Fases de agradação, progradação, níveis de mar alto, mar baixo, formação de paleoambientes) foram reconhecidas através do uso de geologia isotópica com  $^{14}\text{C}$  e com dados geomorfológicos, paleontológicos e biológicos. A integração de tais dados permitiu a formação de modelo paleoambiental para o reconhecimento das paleocomunidades biológicas e das zonas paleogeomorfológicas.

O recife oceânico do Atol das Rocas é um dos atóis mais recentes na história geológica, comparativamente com recifes de morfologia similar do Indo-Pacífico e do

Caribe, tendo se desenvolvido nos últimos 7000 anos no Período Neógeno. A paleohidrodinâmica da corrente oceânica, variações no gradiente de energia no lado a barlavento e sotavento e, sobretudo, as oscilações eustáticas holocênicas foram preponderantes na evolução recifal.

Na zona dos resíduos do paleorecife onde se situam as “rocas” observaram-se evidências de nível de mar mais alto há cerca de 3000-4000 anos atrás. No topo do Garapirá (a rocha mais alta desta zona) encontrou-se o foraminífero *Amphistegina lessoni* em rocha datada ( $3.374 \pm 55$  anos AP). Este foraminífero é um indicador paleoecológico de salinidade superior a 34‰, temperatura entre 25 e 26 °C, substrato carbonático com sedimentos e recifes coralíneos (algas e corais) e profundidade entre 5 e 20m (FIG.26) na paleolaguna. Existe uma correlação estratigráfica entre a datação obtida no topo do paleorecife e a camada de topo do calcarenito ( $3.110 \pm 35$  anos AP) estando ambas em relacionadas a um nível de mar alto (TAB.04).



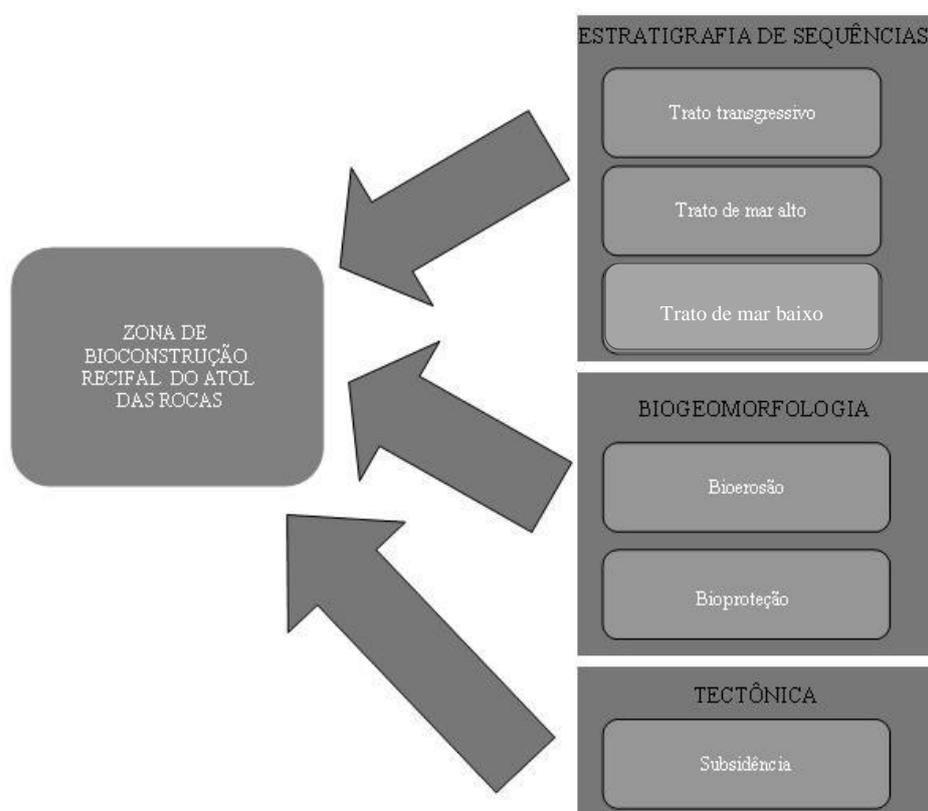
**FIGURA 26.** Foraminífero *Amphistegina lessoni* de amostra de topo do paleorecife do Atol das Rocas (Pedra do Garapirá). Indicador ecológico da paleosalinidade, paleotemperatura, paleoprodutividade e características do substrato. As assinaturas tafonômicas sugerem ser uma amostra autóctone o que permite a reconstrução paleoambiental proposta.

**TABELA 04.** Datações radiométricas no calcarenito da ilha do Cemitério do Atol das Rocas (Atlântico Sul). Símbolos: \* = Dados de Kikuchi & Leão (1997). # = Dados de Gherardi & Bosence (2005). Legenda: NMM= nível médio do mar, m=metros.

	Idade convencional $^{14}\text{C}$ ka AP (idade média $\pm 1 \sigma$ )	Datum (m NMM)
Gastrópode <i>Astraea</i> sp.	3,11 $\pm$ 0,35	2,0 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,83 $\pm$ 0,16	2,0 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,63 $\pm$ 0,15	0,5 m
#Gastrópode <i>Astraea</i> sp.	2,60 $\pm$ 0,45	1,65 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	2,51 $\pm$ 0,17	1,8 m
*Coral <i>Siderastrea stellata</i>	1,91 $\pm$ 0,15	1,5 m
#Alga Coralina	1,59 $\pm$ 0,45	0,75 m

Uma grande laguna (paleolaguna) composta por comunidades bentônicas de fundo inconsolidado e de recifes-em-mancha se formou com grande diversidade biológica durante o nível de mar alto. A queda do nível do mar e a erosão por ondas e correntes levou a formação de um ambiente lagunar raso e de pequena dimensão, de um amplo depósito arenoso e das ilhas a sotavento (formadas biogeomorfologicamente através de processos de fixação por cianobactérias e plantas herbáceas). A dinâmica temporal e espacial de sete comunidades principais de ambientes submersos, intermarés e emersos foi demonstrada pela primeira vez para o único Atol do Atlântico Sul Equatorial.

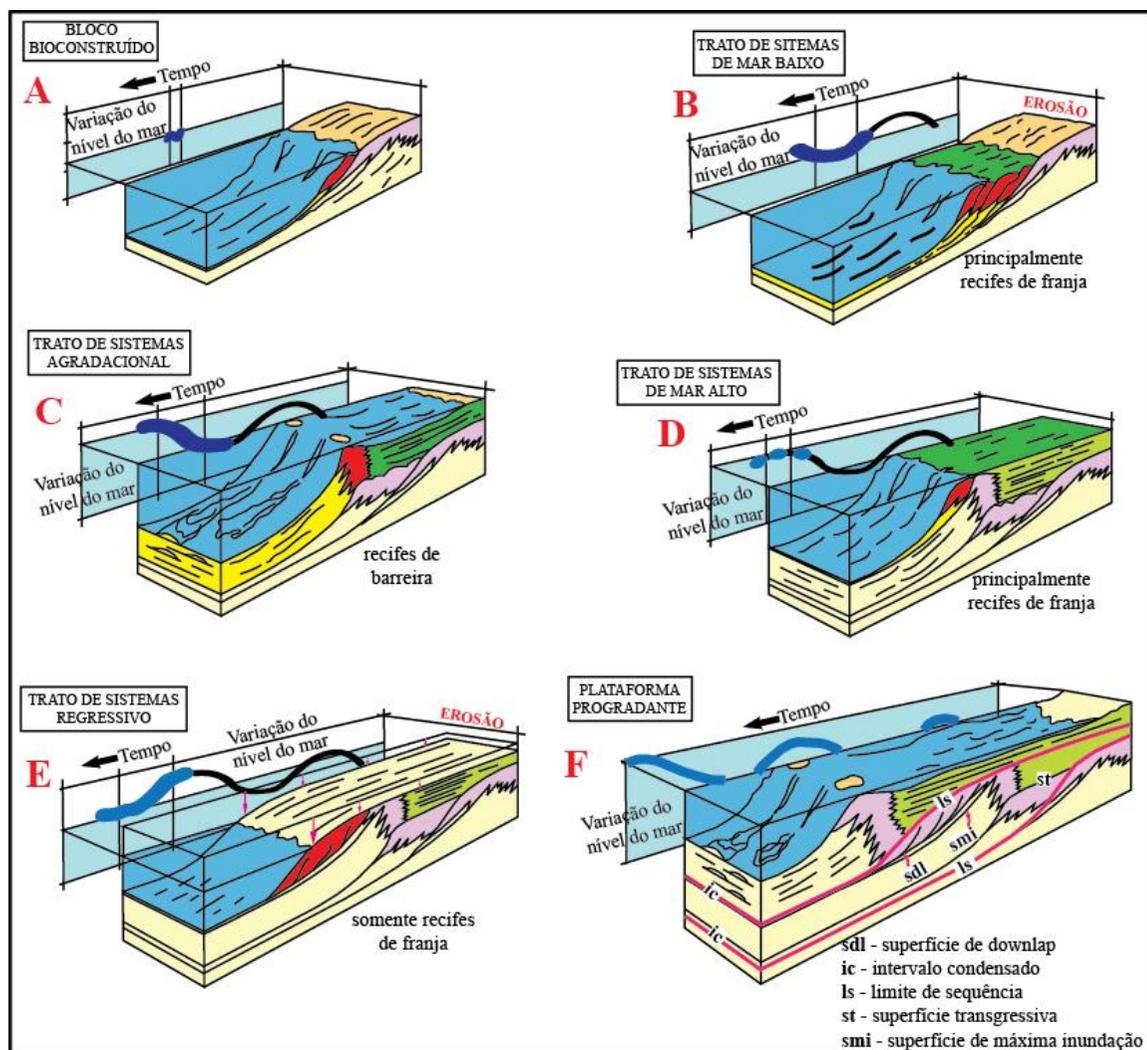
Os fatores paleoecológicos e adaptações dos organismos foram discutidos para explicar o padrão diferenciado em relação a outros recifes onde os corais são dominantes. Fatores como turbidez, paleohidrodinâmica, tempo de dessecação e grau de herbivoria são fatores-chaves no desenvolvimento recifal. Outros fatores estruturantes da construção da estrutura carbonática são os tratos de sistema estabelecidos pela estratigrafia de seqüências, fatores bióticos e tectônicos (FIG.27).



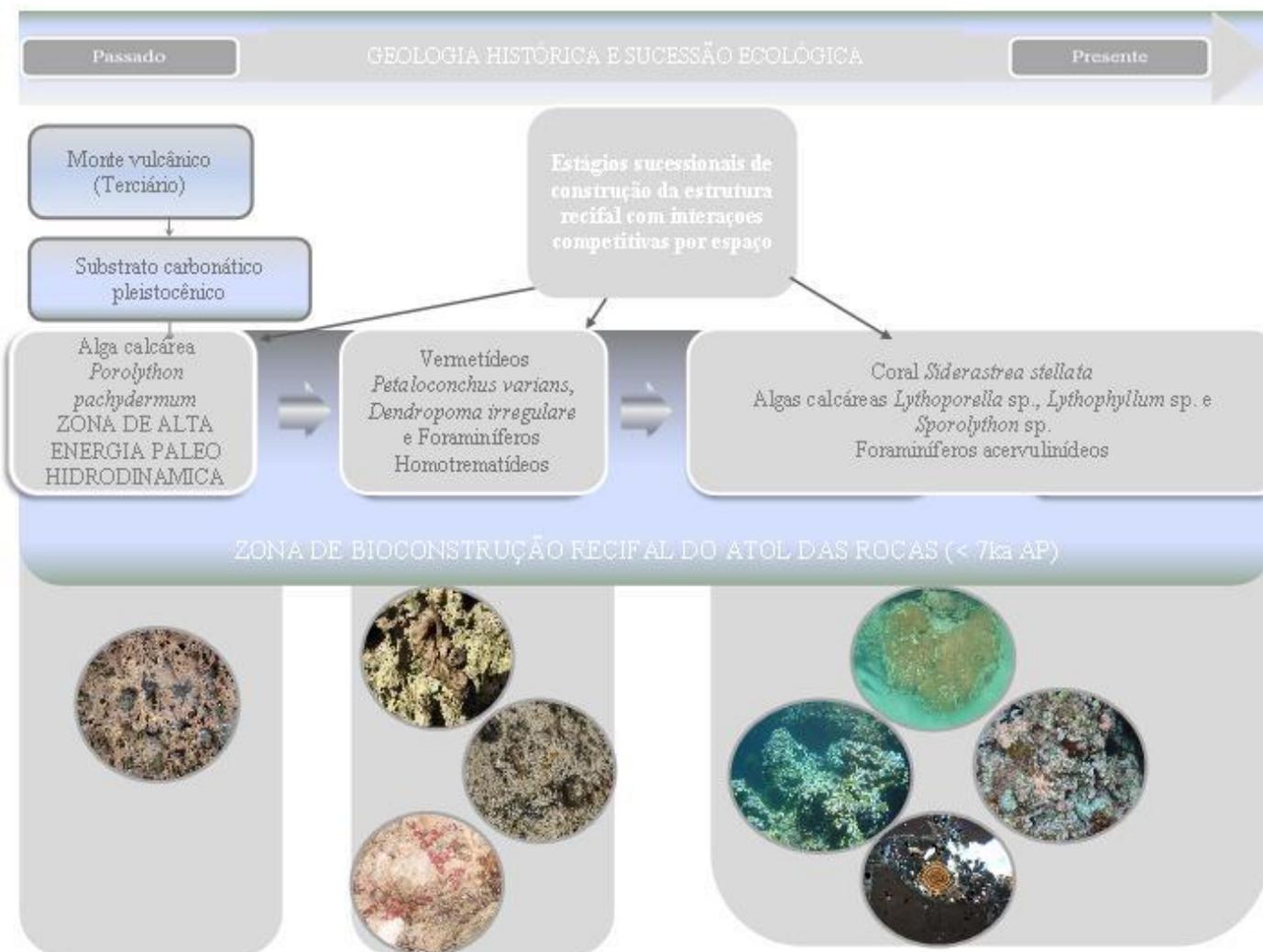
**FIGURA 27.** Principais fatores estruturantes da construção recifal do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

As variações eustáticas ao longo do holoceno foram um dos principais causadores da evolução recifal estabelecendo diferentes fases de agradação, progradação e formação de zonas geomorfológicas na história do Atol das Rocas (FIG.28).

A tolerância aos distúrbios e a competição entre espécies ao longo do processo bioconstrutivo são fatores fundamentais na compreensão dos processos de desenvolvimento do ecossistema. Um inédito modelo da sucessão ecológica no ambiente marinho da construção recifal deste recife é proposto (FIG.29).



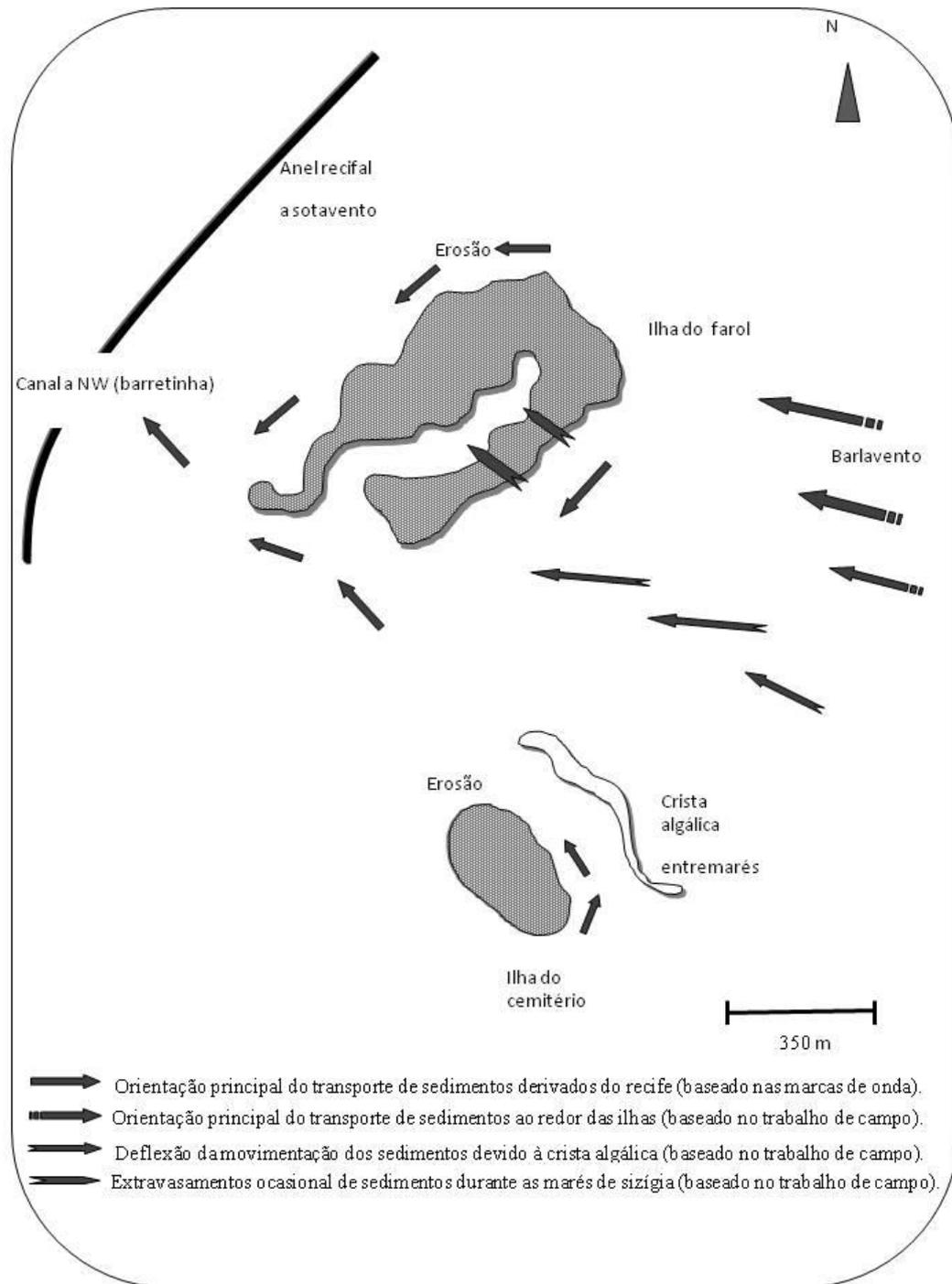
**FIGURA 28.** Modelo hipotético de variações do sistema carbonático do Atol das Rocas, baseado nas oscilações eustáticas e nos tratos de sistema. Observa-se uma associação entre diferentes tipos de recifes, tendo as variações do nível do mar um papel preponderante na evolução.



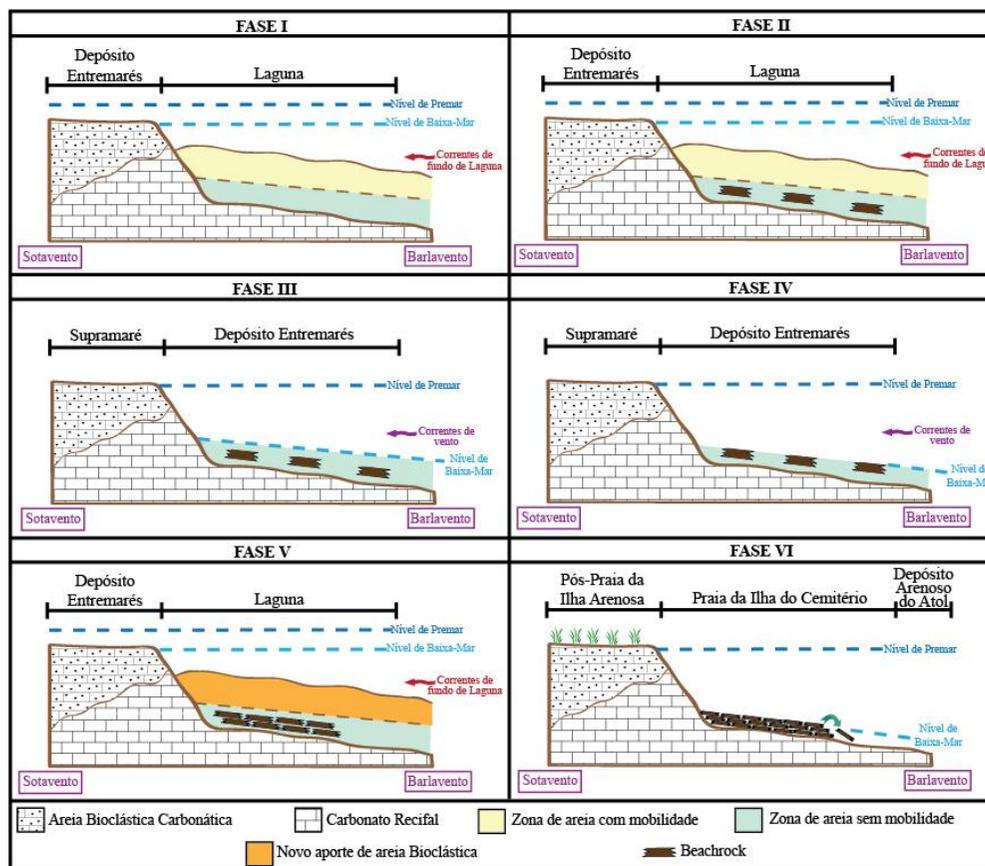
**FIGURA 29.** Sucessão ecológica da bioconstrução recifal no ambiente marinho do Atol das Rocas ao longo do Holoceno.

*Beach rocks* são construções carbonáticas comuns nas ilhas dos atóis ao redor do mundo e comumente revelam variações do nível do mar no Holoceno. Análises destes recifes no único Atol do Atlântico Sul revelaram pela primeira vez a constituição da tafocenose de invertebrados do calcarenito (*Grainstone* Bioclástico/Peloidal e *Framestone* Coralíneo). A assembléia fossilífera é, provavelmente, representativa de um ambiente submaré de baixa energia. Um ecossistema lagunar com uma comunidade bentônica representada por duas biofácies (I e II). A Biofácies I é representativa de uma assembléia de fundo inconsolidado que habitou sedimentos carbonáticos bioclásticos como bivalves da infauna, crustáceos e gastrópodes predadores. A Biofácies II é de uma comunidade que vivia no fundo consolidado dos recifes-em-mancha (*coralline patch-reefs*) formada por corais, algas calcárias e moluscos recifais distribuídos no fundo da laguna evidenciando um nível de mar mais alto no Holoceno há aproximadamente 3000 anos atrás. Aspectos do paleoecossistema, das paleocorrentes de fundo da laguna, relações ecológicas de predação e de possível *time-averaging* na tafocenose revelam importantes padrões para comunidades bentônicas do Atol das Rocas e de recifes oceânicos.

Os estudos petrográficos e do sistema carbonático de geração de sedimentos biodetríticos foram realizados revelando padrões sobre a dinâmica sedimentar no Atol (FIG. 30) de natureza predominantemente unidirecional no sentido barlavento-sotavento e na formação de “*beach rocks*” (FIG.31) o que corrobora a formação mais recente das ilhas arenosas em relação a outras unidades recifais a barlavento.

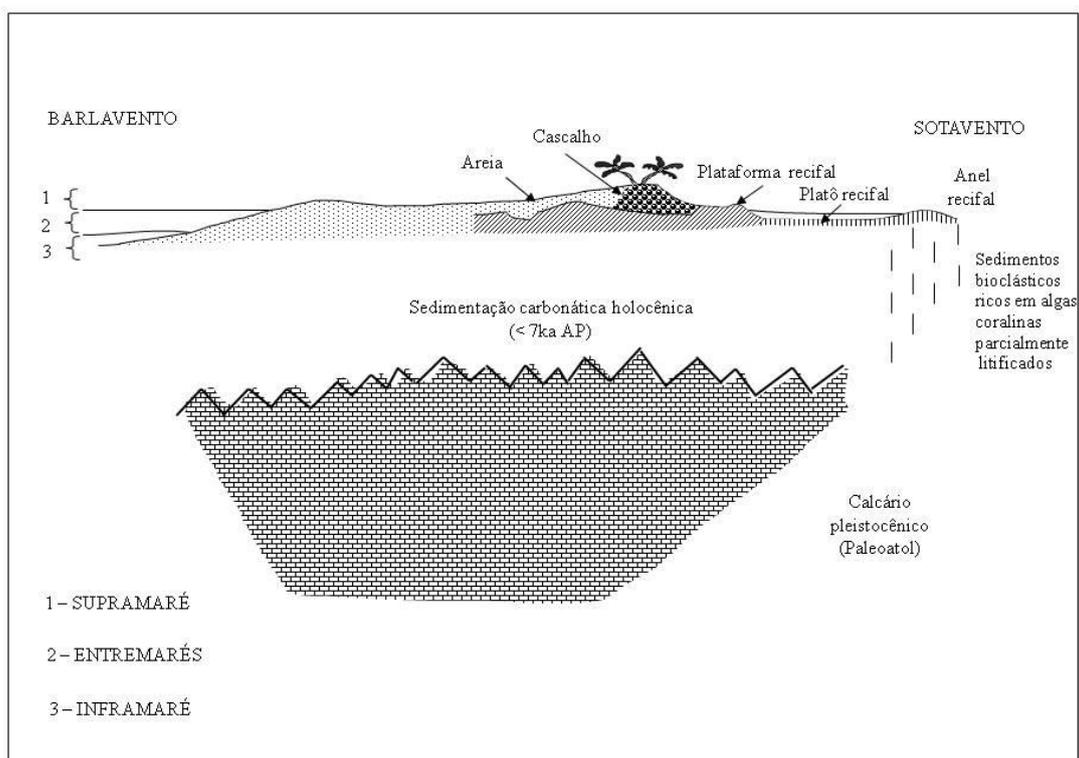


**FIGURA 30.** Modelo de sedimentação carbonática bioclástica no Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).



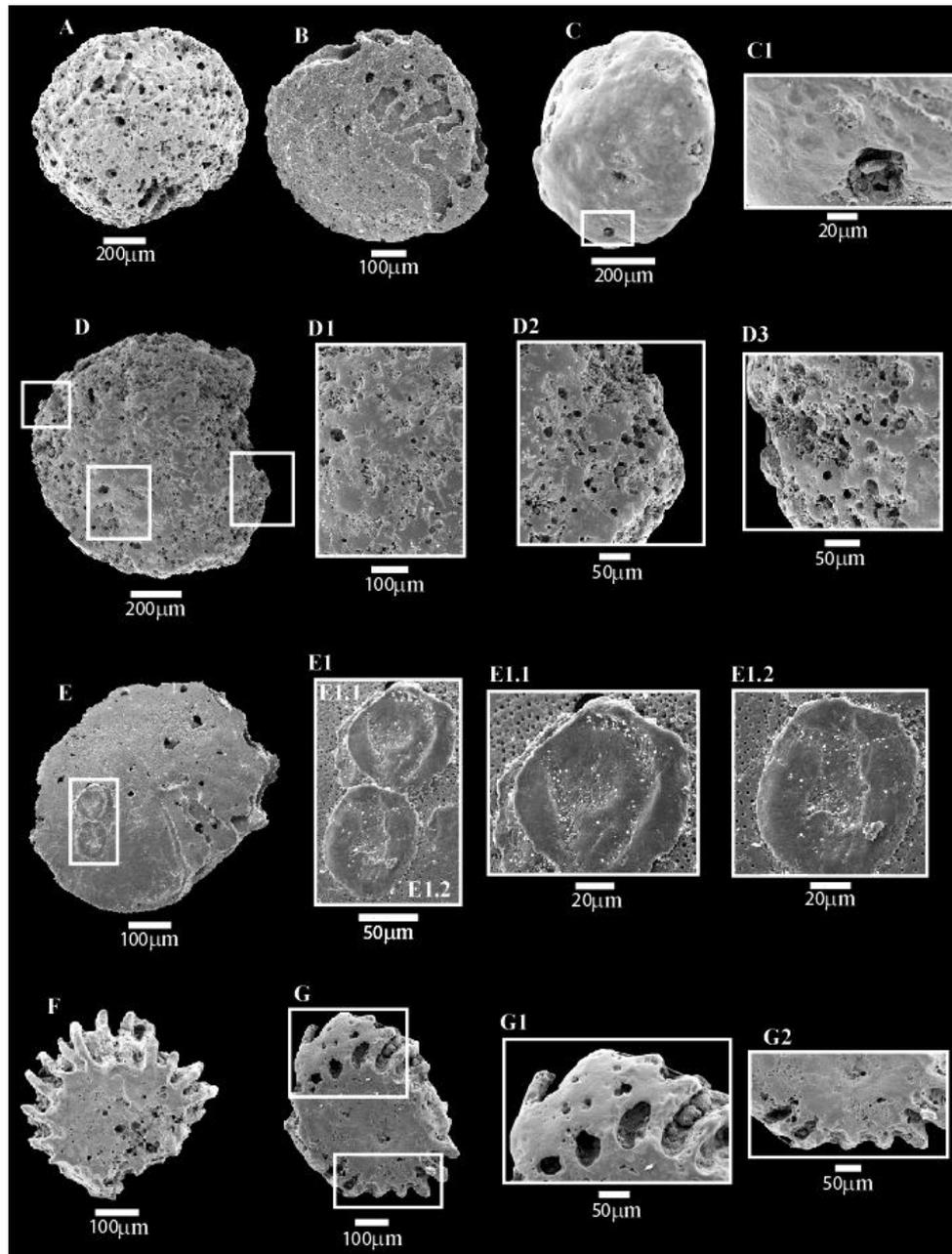
**FIGURA 31.** Representação esquemática de um modelo hipotético das fases de desenvolvimento dos *Beachrocks* do Atol das Rocas: I) Ambiente de cimentação que dá origem ao *beachrock*; II) Primeiro *beachrock* a se formar. Neste, a cimentação é incipiente e há bastante bioclastos, principalmente de algas vermelhas coralinas incrustantes e bioconstrutoras; III) Fase de remoção da areia bioclástica carbonática sobre o *beachrock*; IV) Fase de remoção da areia sobre o *beachrock*; V) Ocorre oscilação do nível médio do mar, novo aporte de sedimentos, e condições para cimentação desse novo pacote, complementando, ou gerando um novo set no pacote; VI) Fase final dos *beachrocks*, observados na ilha do Cemitério, onde se observa a ação destrutiva sobre a face voltada para o depósito arenoso intertidal e conseqüente basculamento após a quebra. As fases I e II ocorrem em nível de mar alto, enquanto ocorre queda do nível nas fases III e IV. Na fase V ocorre uma transgressão do nível eustático.

O sedimento do Atol das Rocas apresenta uma constituição biodetrítica que se assemelha a diversos sistemas carbonáticos de forma geral, entretanto a frequência dos bioclastos apresenta diferenças em relação a outros ambientes recifais. O Atol das Rocas não apresenta corais como bioclasto dominante na composição dos sedimentos carbonáticos. A predominância na geração de sedimentos biogênicos é de táxons de algas calcárias (FIG.32), moluscos e foraminíferos produzidos *in situ* no ambiente recifal.



**FIGURA 32.** Perfil esquemático da sedimentação no Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial). No ambiente deposicional de inframaré temos a laguna, nos setores de entremarés temos o depósito arenoso entremarés e o platô recifal. No setor de supramaré temos as ilhas arenosas a sotavento com sedimentos arenosos e cascalhos. As irregularidades do calcário pleistocênico são decorrentes da carstificação pretérita.

Foram evidenciados altos níveis de energia e retrabalhamento na dinâmica sedimentar do Atol das Rocas (sentido predominantemente unidirecional E-W) através das assinaturas tafonômicas dos bioclastos sedimentares (FIG.33). A abrasão mecânica é o principal agente de desgaste dos restos esqueléticos nas águas rasas e agitadas do Atol das Rocas. O grau de corrosão apresentado pelos restos bioclásticos está diretamente relacionado com o tempo de exposição na interface água / sedimento.

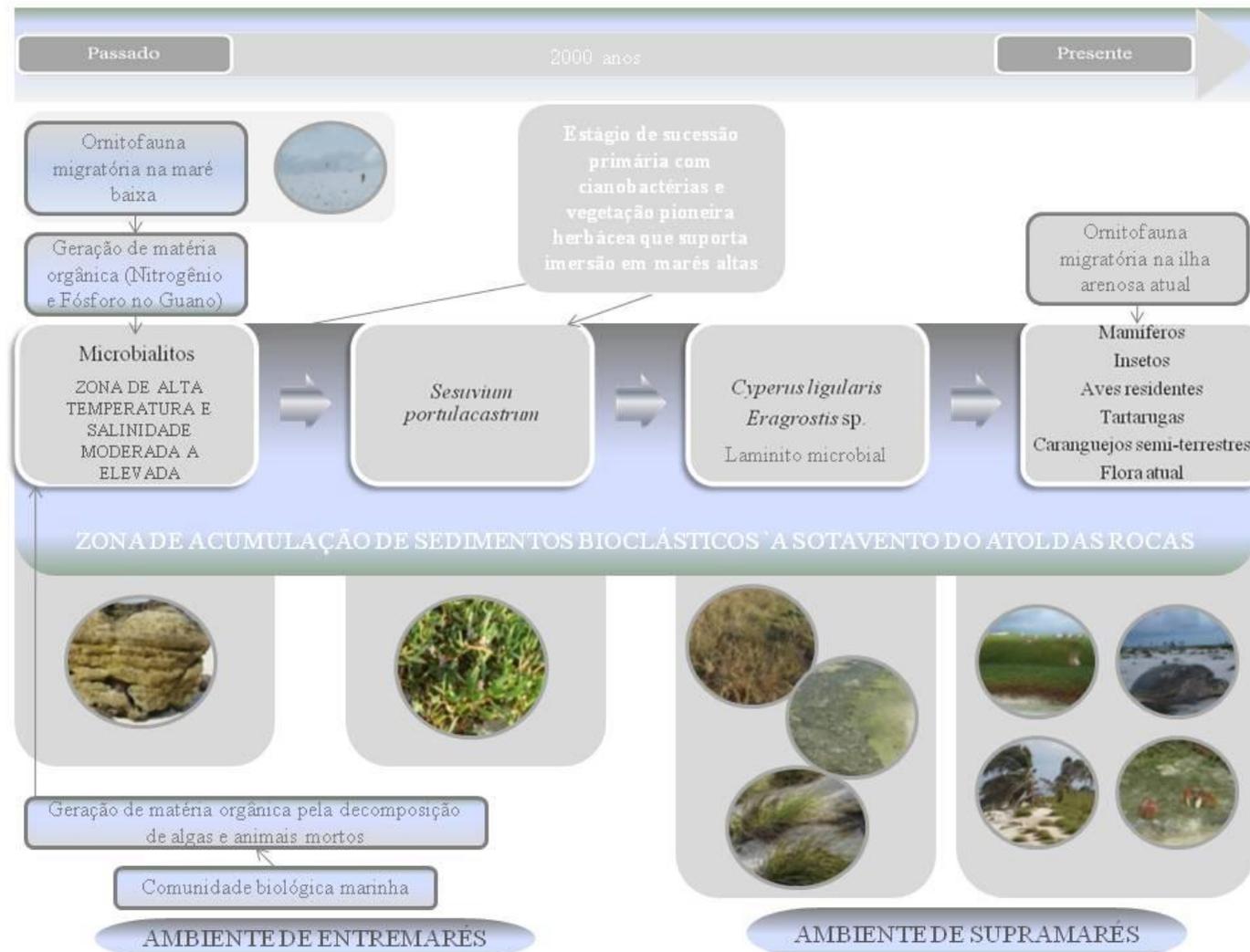


**FIGURA 33.** Microfósseis de Foraminíferos bentônicos e assinaturas tafonômicas indicadoras de retrabalhamento sedimentar e alta energia ambiental. Amostras analisadas no MEV (Microscopia eletrônica de varredura). A, B e C (Diferentes níveis de corrosão e arredondamento). C1= Orifício na estrutura do foraminífero evidenciando micropreenchimento bioclástico. D = Altos níveis de abrasão e Bioerosão no esqueleto resultantes de retrabalhamento sedimentar e atividade geobiológica. D1, D2 e D3 representam detalhes das partes central, direita e esquerda, respectivamente, do exemplar (D) analisado. E = Incrustação calcárea no esqueleto durante os processos bioestratinômicos. Detalhe de prováveis valvas (E1) incrustadas. F = Foraminífero exibindo quebra e corrosão decorrente de alta energia no ambiente sedimentar do depósito arenoso entremarés. Os bioclastos sedimentares intensamente bioerodidos ou incrustados indicam, também, prolongada exposição na interface água / sedimento.

A presença de bioclastos alóctones evidencia a intrusão de águas oceânicas no Atol, principalmente durante períodos de tempestades, “swell” e marés de grande amplitude. A proporção das fácies lagunares, em comparação com as fácies carbonáticas totais, possui pequena contribuição devido à baixa profundidade e o tamanho reduzido. Este fato é diferenciado em relação a outros atóis dos oceanos Atlântico e Indo-Pacífico, que possuem uma grande laguna central com profundidade de 30 a 100 metros, portanto com grande acumulação de sedimentos carbonáticos biogênicos na laguna.

O depósito arenoso intermarés que constitui a maior zona de sedimentação do Atol das Rocas foi provavelmente formado por três fatores principais: a bioerosão (processo biogeomorfológico), o retrabalhamento sedimentar interno decorrente das ações de ondas durante a maré alta e os processos denudacionais decorrentes de variações eustáticas durante a história geológica.

A deflexão das ondas ocasionadas pela crista algálica, acumulação de sedimentos no setor a sotavento e exportação sedimentar predominante através do canal a N (barretão) permitiram o início da formação das ilhas arenosas. Um modelo da sucessão ecológica nas ilhas arenosas é apresentado para compreensão da evolução da Biodiversidade na área (FIG.34).



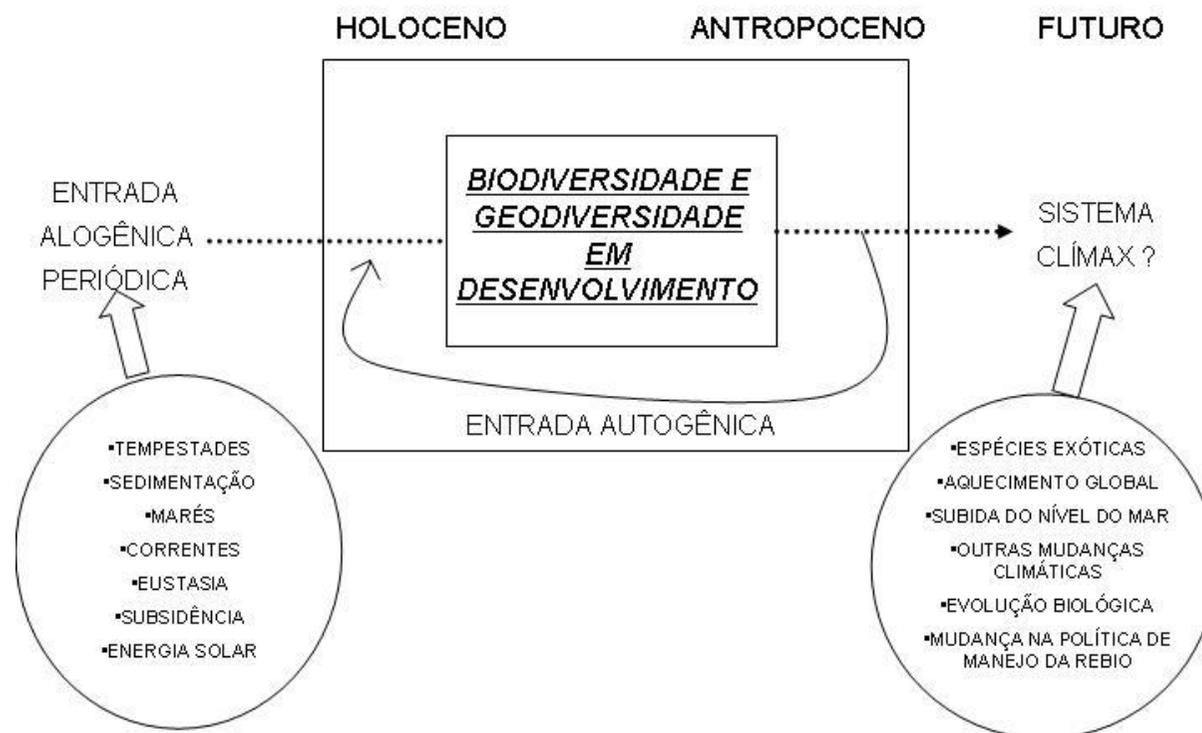
**FIGURA 34.** Modelo de sucessão ecológica nas ilhas arenosas do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

A entrada de energia no ecossistema foi realizada inicialmente através da matéria orgânica do guano das aves migratórias e dos restos decompostos da biota marinha. As espécies da sucessão primária (esteiras microbiais e a herbácea *Sesuvium portulacastrum*) iniciaram o desenvolvimento da comunidade em uma zona entremarés através do trapeamento de partículas sedimentares e, posterior, fixação de sedimentos e retroalimentação positiva na geração de matéria orgânica.

O acúmulo sedimentar permitiu a formação de ambientes de supramáres e colonização de outras espécies herbáceas (*Cyperus ligularis* e *Eragrostis* sp.) incapazes de suportar imersão nas marés altas. Larvas de caranguejos *Goniopsis cruentata* e *Gecarcinus lagostoma* foram transportadas por correntes oceânicas para colonização da área terrestre recém criada. Uma fauna sinantrópica (certos insetos e pequenos mamíferos) apareceu em um estágio tardio da sucessão ecológica com forte componente do “efeito do fundador” na biogeografia das ilhas do Atol das Rocas. A baixa capacidade de suporte das ilhas não permite a ocorrência significativa de táxons como reptéis e anfíbios. Os diferentes estágios da sere são demonstrados pela primeira vez para as ilhas arenosas deste recife.

Esta tese pretende renovar as investigações e estimular novos estudos para o entendimento da Evolução da Biodiversidade e Geodiversidade (FIG.35) do único Atol do Oceano Atlântico Sul, considerado Patrimônio Natural da Humanidade pela UNESCO.

*HISTÓRIA NATURAL DO ATOL DAS ROCAS, ATLÂNTICO SUL EQUATORIAL*



**FIGURA 35.** Desenvolvimento dos sistemas geológicos e biológicos do Atol das Rocas ao longo de sua História Natural baseado em um modelo cibernético. As mudanças na evolução da Biodiversidade e Geodiversidade (sistemas) são determinadas por interações internas ou autogênicas (“autogeradas” pela comunidade biológica marinha e terrestre) e/ou alogênica (forças externas no ambiente de entrada que afetam ou controlam as mudanças). Fatores de risco de grande magnitude controlaram a evolução do sistema no Futuro.

---

*Quando o Nautilus emergiu a superfície pude ver em todo seu desenvolvimento a ilha de coral, baixa e bela. Suas rochas madreporicas foram evidentemente fertilizadas pelas chuvas e tempestades. Um dia, alguma semente trazida pelo mar, a partir de terras vizinhas, caiu sobre sedimentos calcários misturados com os detritos decompostos de peixes e das plantas marinhas. Uma noz de coqueiro, levada pelas ondas, chegou a estas novas costas. A semente nasceu. A árvore crescente reteve o vapor de água. Nascia um riacho. A vegetação aumentou pouco a pouco. Alguns animais como lagartos e insetos chegaram sobre troncos arrancados das ilhas pelo vento. As tartarugas vieram depositar seus ovos. Os pássaros colocaram seus ninhos nas jovens árvores. Dessa forma, se desenvolveu a vida e, atraído pela terra e beleza, apareceu o homem. Esta é a história daquelas ilhas, obras imensas de seres que foram um dia...microscópicos.*

Júlio Verne, *Vinte mil léguas submarinas de 1870*

## 4. ANEXOS



## 4.1. CONFIRMAÇÃO DE ARTIGO PUBLICADO

### ARTIGO 1. Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: considerações sobre a classificação do recife biogênico

*Revista Brasileira de Geociências*

*Marcelo de Oliveira Soares et al.*

*39(2): 238-243, junho de 2009*

#### Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: considerações sobre a classificação do recife biogênico

*Marcelo de Oliveira Soares<sup>1,2</sup>, Valesca Brasil Lemos<sup>3</sup> & Ruy Kenji Papa de Kikuchi<sup>4</sup>*

**Resumo** O Atol das Rocas é considerado o único atol do Atlântico Sul Equatorial e um dos menores do mundo. Devido ao fato de não possuir corais como principais bioconstrutores e ter características morfológicas diferenciadas em relação a recifes do Caribe e Indo-Pacífico sua classificação como Atol pode ser considerada polêmica ao longo do século XX. Análises de campo e de fotografias aéreas foram realizadas para investigar as características do recife biogênico e discutir a classificação como Atol. Os resultados demonstram que existe uma série de características que confirmam a classificação na categoria de Atol e o assemelha a outros recifes de morfologia similar como forma elipsóide, desenvolvimento sobre montes vulcânicos, ilhas arenosas e maior largura do anel recifal a sotavento. Características diferenciadas incluem o anel recifal constituído predominantemente por algas calcárias, foraminíferos e gastrópodes vermetídeos; a laguna com profundidade máxima de 6m e restrita a uma pequena porção do recife; a presença de calcarenito em uma das ilhas e a presença de prováveis resíduos recifais (denominadas "rocas") derivados de oscilações eustáticas no Neógeno.

**Palavras-chave:** classificação, atol, rocas, recifes.

**Abstract** *Rocas Atoll, Equatorial South Atlantic: considerations about the classification of biogenic reef.* The Rocas Atoll is considered the only atoll in the Equatorial South Atlantic and one of the lowest in the world. Due to not have corals as major bioconstructors and have morphological differences from the Caribbean and Indo-Pacific reefs their classification as Atoll as may be considered controversial during the twentieth century. Field analysis and Aerial photographs were taken to investigate the characteristics of the biogenic reef and discuss the classification as Atoll. The results show that there are a number of characteristics that confirm the classification in the category of Atoll and similar to other reefs of same morphology as ellipsoid form, development in volcanic mountains, sand cays and greater width of the ring reef on the leeward. Differentiated features include ring reef consisting predominantly of calcareous algae, foraminifera and vermetid gastropods; lagoon with a maximum depth of 6m and restricted to a small portion of the reef, the presence of calcarenite on one of the islands and the probably presence of reef residues (called "rocas") derived from eustatic fluctuations in the Neogene.

**Keywords:** classification, atoll, rocas, reefs.

**INTRODUÇÃO** Desde os trabalhos geológicos de Darwin (1842), Dana (1853), Daly (1910), Davis (1920 e 1928), a morfologia clássica de um atol em formato circular com a presença de pequenas ilhas ao redor de uma laguna central se transformou em um relevo padrão nos trabalhos de geologia. Barry *et al.* (2007) comentam que os atóis são recifes oceânicos que possuem um aspecto anular, onde comumente se encontra uma laguna interna e ilhas formadas por depósitos arenosos inconsolidados do Holoceno.

Considerando a evolução dos atóis baseada nos efeitos eustáticos e hidro-isostáticos do nível do mar, observou-se que essa configuração é apenas um estágio temporário que existiu em uma pequena fração de tem-

po durante o Quaternário. Assim, a morfologia clássica dos atóis atuais, um conceito bastante reconhecido no meio científico, só passou a ter essa configuração no Quaternário tardio. Os atóis recentes existem em diferentes províncias geológicas dos mares tropicais. Tais ambientes recifais comumente diferem significativamente em relação ao número, tamanho, continuidade e morfologia das ilhas (Dickinson 2004).

A teoria geológica mais famosa para a formação dos atóis é de Darwin (1842). Para este autor é necessário que um monte vulcânico sofra um rebaixamento em relação ao nível do mar e possua um crescimento coralíneo concomitante à subsidência. Estes ambientes são recifes de mar aberto, incluídos aqueles que se de-

1 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Porto Alegre (RS), Brasil.

2 - Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências da Natureza, Departamento de Ciências Naturais e Arqueologia, Teresina (PI), Brasil. E-mail: bio\_marcelo@yahoo.com.br

3 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Porto Alegre (RS), Brasil. E-mail: valesca.lemos@ufrgs.br

4 - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Laboratório de Recifes de Corais, Salvador (BA), Brasil. E-mail: kikuchi@ufba.br

## 4.2. CONFIRMAÇÃO DE ENVIO DOS ARTIGOS

**ARTIGO 2.** Aspectos biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.

Marcelo Oliveira Soares,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "Aspectos Biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial" para Revista Brasileira de Geociências. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/author/submission/13341>

Login: geo\_marcelo

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Alberto Pio Fiori  
Revista Brasileira de Geociências

---

**ARTIGO 3.** Holocene sea-level history and paleoecology on Rocas Atoll, Northeastern South Atlantic

Dear Dr. Soares,

This e-mail is to let you know that on June 5, 2009 we received the submission of a PALAIOS manuscript entitled "HOLOCENE SEA-LEVEL HISTORY AND PALEOECOLOGY ON ROCAS ATOLL, NORTHEASTERN SOUTH ATLANTIC" coauthored by yourself, Marcelo de Soares, Carlos Augusto Meirelles, Maria Santiago, Carla Maria Silva, Marcela Vieira, Narendra Srivastava, Valesca Lemos, and Ruy Kikuchi. Your manuscript has been assigned the following paper identification number: P09-068.

Either Stephen Hasiotis or Edith Taylor, PALAIOS coeditors, will assign an Associate Editor (AE) to your manuscript, and the AE will choose two reviewers for your manuscript.

Please e-mail or call with any questions you may have about this process.

Thank you for your interest in PALAIOS!

Sincerely yours,

Jill Hardesty, Managing Editor  
PALAIOS  
E-mail: [palaios@ku.edu](mailto:palaios@ku.edu)

### 4.3. ARTIGOS ACEITOS

**De:** Clotilde Zai [secretariarbg@yahoo.com.br](mailto:secretariarbg@yahoo.com.br)

**Para:** Marcelo Oliveira Soares <[bio\\_marcelo@yahoo.com.br](mailto:bio_marcelo@yahoo.com.br)>; Valesca Brasil Lemos <[valesca.lemos@ufrgs.br](mailto:valesca.lemos@ufrgs.br)>; Ruy Kenji Papa de Kikuchi [rkikuchi@cpgg.ufba.br](mailto:rkikuchi@cpgg.ufba.br)

**Enviadas:** Sex, Outubro 23, 2009 8:17:48 AM

**Assunto:** [RBG] Sedimentos Carbonáticos Bioclásticos do Atol Das Rocas, Atlântico Sul Equatorial

Prezado Marcelo,

O artigo "Sedimentos Carbonáticos Bioclásticos do Atol Das Rocas, Atlântico Sul Equatorial" de Marcelo Oliveira Soares, Valesca Brasil Lemos, Ruy Kenji Papa de Kikuchi foi aprovado e segue para diagramação.

Atenciosamente,

Clotilde Zai

Revista Brasileira de Geociências

## Sedimentos Carbonáticos Bioclásticos do Atol Das Rocas, Atlântico Sul Equatorial

**Marcelo de Oliveira Soares<sup>1</sup>, Valesca Brasil Lemos<sup>2</sup>, Ruy Kenji Papa de Kikuchi<sup>3</sup>**

1 – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [bio\\_marcelo@yahoo.com.br](mailto:bio_marcelo@yahoo.com.br)

2 – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [valesca.lemos@ufrgs.br](mailto:valesca.lemos@ufrgs.br)

3 – Laboratório de Estudos de Recifes de Corais, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Geremoabo, s/n, 40170-020, Federação, sala 209C, Salvador, BA, Brasil. E-mail: [kikuchi@ufba.br](mailto:kikuchi@ufba.br)

**Resumo** Atóis são recifes que tanto geram quanto acumulam sedimentos carbonáticos. Os carbonatos bioclásticos do Atol das Rocas, Nordeste do Brasil, foram analisados a partir de amostras superficiais de diversos compartimentos ambientais. Os resultados mostram a predominância dos bioclastos de algas calcárias, foraminíferos e moluscos nos sedimentos revelando a dominância destes grupos na bioconstrução do recife e na dinâmica sedimentar da área. Evidências de contribuições alóctones e autóctones na composição sedimentológica do atol e variações na composição ao longo do gradiente sotavento-barlavento são discutidas. Diferente de outros atóis do planeta, o Atol das Rocas apresenta as fácies lagunares com baixa proporção das fácies carbonáticas totais associadas ao recife e baixa frequência de bioclastos de corais escleractíneos.

*Palavras-chave:* Sedimentologia, Carbonatos, Atol das Rocas, Atlântico.

**Abstract** *BIOCLASTIC CARBONATE SEDIMENTS OF THE ROCAS ATOLL, EQUATORIAL SOUTH ATLANTIC* Atolls are reefs that are both generate from as accumulate of carbonate sediments. The bioclastic carbonates of Rocas Atoll, Northeast

of Brazil, were analyzed from surface samples of various environmental compartments. The results show the dominance of calcareous algae bioclats, foraminifera and molluscs in sediments of reef bioconstruction and the sediment dynamics of the area. Evidence of allochthonous and autochthonous contributions in the sedimentological composition of atoll and variations in the composition along the windward-leeward gradient are discussed. Unlike other atolls of the planet, the Rocas Atoll present the lagoonal facies with low proportion of total carbonate facies associated with the reef and low frequency of coral bioclats.

*Keywords:* Sedimentology, Carbonates, Rocas Atoll, Atlantic.

## INTRODUÇÃO

### Recifes e sistemas carbonáticos

Um recife biogênico é, segundo Lowenstam (1950), “... o produto da atividade construtiva e agregadora/cimentadora de constituintes bióticos que, devido ao seu potencial de resistência às ondas, erigem estruturas topográficas resistentes a elas”. Para Cloud (1959), qualquer recife, a qualquer tempo, é o resultado de sua cadeia de nutrientes e do produto de sua desintegração, e da sua história geológica. Stoddart (1969) acrescenta ainda a esses fatores a história geológica. Essa construção é, portanto, o resultado da atividade orgânica em resposta aos fatores ambientais (hidrofísicos e hidroquímicos) que são incorporados ao registro geológico.

Muitos dos carbonatos de recifes biogênicos são produzidos diretamente através da intermediação de processos biológicos e bioquímicos, ou mesmo pela precipitação direta a partir da água do mar. As famosas manchas brancas, compostas por agulhas de aragonita ou “*whitings*”, podem representar o processo de precipitação química acontecendo nos dias de hoje. A principal contribuição nos mares tropicais atuais provém dos organismos fototróficos (corais hermatípicos, algas vermelhas e verdes) e não fototróficos (foraminíferos, moluscos, briozoários e equinodermos) (Barry *et al.* 2007).

No sistema siliclástico o preenchimento é formado por diversas contribuições exógenas, enquanto no sistema carbonático os sedimentos são majoritariamente gerados *in situ*, dentro da própria bacia de sedimentação pela biota. Como consequência da

contribuição biogênica, fatores como latitude, temperatura, salinidade, profundidade da água, intensidade da luz, turbidez, circulação oceânica, pressão de CO<sub>2</sub> e suprimento sedimentar, atuam de forma conjunta, e criam condições necessárias para a proliferação dos organismos formadores da “fábrica carbonática” (Hanford & Loucks 1993).

### **Sedimentologia e atóis**

Plataformas carbonáticas largas, plataformas isoladas e atóis são sistemas dinâmicos que tanto geram quanto acumulam sedimentos. Tais sistemas carbonáticos são influenciados significativamente por oscilações eustáticas e por controles batimétrico e de subsidência. As taxas de acumulação são primariamente relacionadas à influência do nível do mar e a subsidência regional. As plataformas rasas e os atóis são diretamente controlados pelo nível do mar. O depósito carbonático em atóis também é influenciado pela tectônica e pela fácies sedimentares. Na sedimentologia de depósitos carbonáticos, teoriza-se que o nível do mar é um fator-chave na deposição, devido à sua importância na produção de carbonato e de espaço para sua acumulação (McNeill 2005). Segundo Aissaoui *et al.* (1990) o acúmulo de carbonatos nas águas rasas dos oceanos Pacífico e Atlântico é controlado pela variação eustática.

O Atol das Rocas está localizado no topo de uma cadeia de montanhas submarinas no Oceano Atlântico Sul, cuja base encontra-se a 4000 m de profundidade no leito oceânico, a 3°51'S de latitude e 33°49'W de longitude, distante 266 km da cidade de Natal e 150 km, a oeste, do arquipélago de Fernando de Noronha, no Nordeste Brasileiro (Echeverría & Pires 1997; Kikuchi & Leão 1997). O substrato é composto, principalmente, por algas calcárias incrustantes e moluscos vermetídeos (Gherardi & Bosence 1999). Diversos estudos sedimentológicos foram desenvolvidos neste atol (Duarte 1938, Ottman 1963, Coutinho & Morais 1970, Tinoco 1966; 1972, Kikuchi 1994, Gherardi 1996) enfocando aspectos da granulometria, composição química, constituintes bióticos e mecanismos de distribuição dos sedimentos nas zonas recifais. O presente estudo tem por objetivo: analisar os bioclastos sedimentares, em termos de composição e assinaturas tafonômicas, no único Atol do Atlântico Sul Equatorial (Atol das Rocas), tendo em vista o entendimento da dinâmica sedimentar.

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

## Área de estudo

A região equatorial do Oceano Atlântico compreende a plataforma continental e a planície abissal, do norte do Ceará ao sul de Pernambuco. Nesta área, localizam-se a Cadeia Norte do Brasil e a Cadeia de Fernando de Noronha, da qual também faz parte o Atol das Rocas (Schobbenhaus 1984).

Único atol do Atlântico Sul equatorial (Figura 01) e primeira “Reserva Biológica Marinha” do Brasil, Rocas (3°05' S; 33°40' W) está situado a 267 km a E-NE da cidade de Natal e 148 km a W do Arquipélago de Fernando de Noronha. Este recife é constituído por um anel circular formado por moluscos vermetídeos, algas calcárias, foraminíferos e corais, por um depósito de areia carbonática biogênica e uma laguna de pequenas dimensões a NE, com área de 36 km<sup>2</sup>, englobando as águas na área de entorno até uma profundidade de 100 m. Os recifes do anel de Rocas emergem 0,5 m durante a baixa-mar, quando surgem na área interna várias piscinas naturais. Na preamar, os recifes ficam submersos 2 m ou mais. A temperatura média em superfície é de 27°C e a salinidade de 36,7‰, tornando-se mais alta nas lagunas internas na maré baixa (Kikuchi & Leão 1997, Gherardi & Bosence 1999).

### FIGURA 01.

## Coleta de campo e análises laboratoriais

As coletas no recife foram efetuadas durante caminhadas no platô recifal, exposto nas marés baixas, e durante mergulhos, em apnéia e autônomo, nas partes submersas dos diversos compartimentos geoambientais. Esses dados foram completados com documentação fotográfica detalhada e com amostragens sedimentares durante o período de verão de 2008.

As amostras sedimentares foram coletadas em diversos compartimentos geoambientais do Atol das Rocas com uso de recipientes plásticos e de “core” para amostras superficiais e colocadas em sacos plásticos devidamente etiquetados. Geomorfologicamente as amostras superficiais foram obtidas da frente recifal, platô recifal, anel recifal, depósito arenoso, canais (nordeste e noroeste), ilhas (Farol e Cemitério), piscinas e da laguna na porção nordeste (Figura 02), sendo 5 amostras para cada compartimento. O material foi acondicionado e levado ao Laboratório de Paleontologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Laboratório de Conodontes

e Foraminíferos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), para análise da constituição dos bioclastos.

## **FIGURA 02.**

Foraminíferos, coletados nas amostras sedimentares, foram fotografados ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS) para análise de indícios de corrosão e outras possíveis feições de alteração. Os bioclastos foram colocados em *stubs* (pinos porta-amostras) e recobertos com uma película de ouro, para em seguida serem obtidas as imagens.

Visando atingir os objetivos propostos, foram utilizadas técnicas modernas como a estatística multivariada e a verificação das assinaturas tafonômicas para compreensão dos processos sedimentares. Para comparar a abundância dos constituintes sedimentares, foi utilizado o teste ANOVA (Análise de Variância Simples) nos diferentes compartimentos geoambientais, com pós-teste de Tukey. A análise de ANOVA buscou verificar a seguinte hipótese: As médias de abundância dos bioclastos são semelhantes em todos os compartimentos geomorfológicos? Quando verificou-se uma diferença estatisticamente significativa entre os compartimentos, ou seja hipótese refutada, foi utilizado o teste de Tukey para discriminar essa diferença. Tais análises estatísticas foram realizadas com nível de confiança  $\alpha = 5\%$ .

### **Análise estatística multivariada**

Classificação (análise de agrupamento no modo Q e R) e ordenação são técnicas complementares, adotadas em uma série de áreas de estudo, como paleontologia, geologia e ecologia, para representar a estrutura dos dados e elucidar os padrões intrínsecos dentro de um conjunto de resultados (Zenetos 1991). No modo R estas técnicas agrupam utilizando as variáveis (espécies, bioclastos, etc.), enquanto no modo Q o agrupamento é baseado na similaridade das amostras.

Uma análise de dendrograma (“*cluster analysis*”) foi utilizada para classificar as amostras sedimentares do Atol das Rocas em grupos aproximadamente homogêneos. Para esta análise, foi verificada a similaridade a partir de uma matriz de abundância dos bioclastos nos diversos compartimentos geoambientais do Atol. O coeficiente de similaridade utilizado foi o de Bray-Curtis, utilizando a estratégia de amalgamação do tipo hierárquica aglomerativa. Para corroborar os resultados da análise de cluster e obter

um diagrama que permitisse a comparação com o agrupamento formado, foi realizada também a análise de escalonamento multidimensional não-métrico (MDS-*Multi dimensional Scaling*), utilizando 999 iterações.

A análise de similaridade de Bray-Curtis foi usada com as seguintes variáveis: agrupamento das amostras sedimentares (modo-Q) e abundância e distribuição dos bioclastos (modo-R). Após este procedimento, foi construído um dendrograma utilizando o algoritmo de aglomeração do UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*). As análises foram feitas com o uso do *software* estatístico Primer v. 5.0 (*Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research*).

## RESULTADOS

O material analisado pode ser classificado como areias carbonáticas biogênicas (Figura 3A) devido a ser constituído de bioclastos de algas calcárias, moluscos, corais, foraminíferos, briozoários, equinodermos e crustáceos, com diferentes abundâncias (Tabela 01).

### TABELA 01.

Maior parte dos sedimentos inconsolidados é composta de materiais bioclásticos derivados da bioconstrução recifal, como moluscos não incrustantes, corais e algas calcárias (Figura 3B). A destruição física da estrutura recifal por ação de ondas e correntes no Atol das Rocas gera várias partículas sedimentares bioclásticas (Figuras 3C e 3D). Outro importante processo de geração de sedimentos no Atol é a Bioerosão.

### FIGURA 03.

As algas calcárias são o componente bioclástico predominante nos sedimentos carbonáticos do Atol das Rocas (Figura 04), revelando que tais organismos incrustantes e bioconstrutores geram grande quantidade de partículas através da quebra mecânica e por bioerosão.

### FIGURA 04.

A dominância de bioclastos de algas calcárias nos sedimentos é significativa comparativamente à contribuição biogênica de outros táxons ( $P < 0,05$ , Tukey test) (Tabela 02).

**TABELA 02.**

Foraminíferos bentônicos vágeis possuem a mesma abundância de bioclastos de moluscos não incrustantes ( $P > 0,05$ , Tukey test). Evidências de materiais derivados da zona pelágica do oceano Atlântico Sul, como conchas de *Spirula spirula*, foram encontradas na ilha do Cemitério e em outros compartimentos geoambientais do Atol das Rocas (Figura 05).

**FIGURA 05.**

Os componentes biodetríticos predominantes são fragmentos de algas calcárias, principal organismo bioconstrutor do recife, testas de foraminíferos bentônicos vágeis e fragmentos de valvas de moluscos (Figura 06). A análise de agrupamento no modo R demonstra a presença de dois grupos. Um grupo A, com baixa frequência nas zonas geomorfológicas do Atol das Rocas, formado por tafocenose constituída de restos de *Millepora alcicornis*, *Halimeda* sp., Briozoários, Vermetídeos, *Homotrema*, Crustáceos, Equinodermas e Corais, e um grupo B, com alta frequência e ocorrência nos diversos compartimentos geoambientais, formado por bioclastos de algas coralinas incrustantes, foraminíferos bentônicos vágeis e moluscos não incrustantes.

**FIGURA 06.**

No dendrograma dos compartimentos geoambientais, observa-se um grupo com forte afinidade formado pelas piscinas e pelo depósito arenoso (mais de 95% de similaridade). Tal agrupamento é explicado pela presença de todos os bioclastos amostrados e por abundância semelhante (Figura 07). Essas áreas são principalmente de importação de sedimentos carbonáticos no Atol das Rocas, não constituindo áreas-fonte do recife. Os canais (que ligam o Atol das Rocas ao Oceano Atlântico Sul) e o anel barlavento (principal área-fonte de sedimentos) estão agrupados devido à pequena quantidade de foraminíferos bentônicos vágeis e à constituição semelhante de bioclastos. A análise de MDS (Figura 08) com baixo stress (0,07) corrobora com a análise de agrupamento do dendrograma. Observa-se uma maior similaridade, proximidade dos círculos no MDS, entre as piscinas e o depósito arenoso, além dos setores a sotavento (frente e anel) que estão bem próximos na análise.

**FIGURA 07.**

**FIGURA 08.**

Os sedimentos do depósito arenoso intermareal, dos canais que ligam o recife ao oceano, das ilhas, dos canais de maré, da laguna e das ilhas arenosas do Atol das Rocas (Figura 09) são compostos principalmente de materiais derivados de bioconstruções do recife biogênico.

**FIGURA 09.**

Foram evidenciados altos níveis de energia e retrabalhamento na dinâmica sedimentar do Atol das Rocas (sentido predominantemente unidirecional E-W) através das assinaturas tafonômicas dos bioclastos sedimentares (Figura 10). A abrasão mecânica é o principal agente de desgaste dos restos esqueléticos nas águas rasas e agitadas do atol. O grau de corrosão apresentado pelos restos bioclásticos está diretamente relacionado com o tempo de exposição na interface água / sedimento.

**FIGURA 10.****DISCUSSÃO**

O sedimento do Atol das Rocas possui constituição biodetrítica semelhante a de diversos sistemas carbonáticos recifais do Cenozóico de forma geral; entretanto, a frequência dos bioclastos apresenta diferenças em relação a outros sistemas recifais dos oceanos Atlântico e Indo-Pacífico. Na proximidade dos recifes e das ilhas do Arquipélago de Abrolhos (Nordeste do Brasil), as partículas mais frequentes são detritos das conchas de moluscos, fragmentos de algas calcárias, corais e testas de foraminíferos (Leão 1982).

Os fragmentos da alga *Halimeda* sp. ou de corais são os bioclastos mais comuns nos sedimentos de Alacran (Bonet 1967), dos atóis de Bikini, Eniwetok, Rongelap e Rongerik, no Pacífico (Emery *et al.* 1954) e no Atol de Cocos (Keeling) (Smithers 1994). Barry *et al.* (2007) em seus estudos sobre a morfodinâmica das ilhas em atóis, encontrou que os depósitos sedimentares carbonáticos têm, como constituição predominante, bioclastos derivados de organismos recifais, como corais, algas coralinas, moluscos e foraminíferos.

Duarte (1938) analisou sedimentos do Atol das Rocas e verificou apenas a constituição química. Ottman (1963), Kikuchi (1994) e Gherardi (1996) fizeram análises granulométricas e estudaram os mecanismos de distribuição dos sedimentos nos

diversos compartimentos ambientais demonstrando transporte sedimentar no sentido predominante E-W (barlavento-sotavento).

Coutinho & Morais (1970) analisaram tipologicamente as amostras sedimentares de Rocas e do Arquipélago de Fernando de Noronha, classificando-as como areias calcárias biogênicas. Os mesmos autores correlacionaram os sedimentos destas ilhas oceânicas com aqueles encontrados na plataforma continental do Nordeste do Brasil (PE ao PI), devido constituição biodetrítica semelhante. Holz & Simões (2002) verificaram em estudos tafonômicos que o grau de corrosão apresentado por restos bioclásticos, está diretamente relacionado com o tempo de exposição na interface água/sedimento durante os eventos bioestratinômicos.

Ottman (1963) relatou que os sedimentos que formam as ilhas do Farol e Cemitério são formados predominantemente por restos de algas calcárias, como os gêneros *Halimeda*, *Jania* e *Amphiroa*. O conteúdo de foraminíferos foi verificado por Tinoco (1966 e 1972) e Kikuchi (1994), que constataram a dominância de *Amphistegina sp.* e *Archaias angulatus*.

Tsuji (1993) e Yamano *et al.* (2002), referindo-se à análise faciológica de superfície em lagunas profundas de atóis, observam que o material bioclástico é composto, principalmente, de materiais produzidos *in situ* em menor proporção, como algas calcárias e foraminíferos. As fácies lagunares dos atóis ocupam uma proporção significativa das fácies carbonáticas totais associadas aos recifes coralíneos modernos (Yamano *et al.* 2002). No atol das Rocas tem-se um padrão diferenciado, pois as fácies lagunares têm pequena proporção em relação às fácies totais. Este fato é devido à pequena extensão, restrita à porção nordeste, e pequena profundidade da laguna (< 6 m).

Identificação e classificação de fácies em atóis são comumente descritivos e só podem ser aplicados a zonas geomorfológicas específicas, como a laguna. Um esquema de classificação geral de fácies em atóis não é encontrado na literatura, diferentemente da classificação de fácies em sistemas carbonáticos como plataforma continental e recifes costeiros (Tsuji 1993). Yamano *et al.* (2002) observam que as fácies sedimentares das lagunas dos atóis podem ser formadas de material bioclástico alóctone e material produzido *in situ*.

## CONCLUSÕES

O Atol das Rocas não apresenta corais como bioclasto dominante na composição dos sedimentos carbonáticos. A predominância na geração de sedimentos bioclásticos é de táxons de algas calcárias, moluscos e foraminíferos produzidos no recife. A presença de bioclastos, exógenos do sistema recifal, evidencia a intrusão de águas oceânicas no atol, principalmente durante períodos de tempestades, ondulações (*swells*) e marés de grande amplitude. A proporção das fácies da laguna, em comparação com as fácies carbonáticas totais, possui pequena contribuição devido a baixa profundidade e tamanho da laguna, restrita à porção nordeste do atol. Estas características contrastam com as de outros atóis dos oceanos Atlântico e Indo-Pacífico, os quais possuem grande laguna central com profundidade de 30 a 100 m, favorável à espessa acumulação de sedimentos carbonáticos biogênicos sob baixa energia. As assinaturas tafonômicas (bioerosão, incrustação, arredondamento, abrasão, etc..) encontradas nos bioclastos sugerem condições de alta energia hidrodinâmica na parte central, distintas portanto, de outros atóis dos oceanos tropicais. Estudos futuros poderão permitir a integração de dados oceanográficos e eventos geobiológicos, como de bioerosão e tafonomia, para a compreensão dos eventos sedimentares no Atol das Rocas.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente artigo faz parte da tese de doutorado do programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) intitulada “Geobiologia do Atol das Rocas, Atlântico Sul”. M.O. Soares agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico), pela concessão de bolsa de Doutorado; a Petrobras e Fundação SOS Mata Atlântica, pelo financiamento da pesquisa dos trabalhos de campo; ao ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) pela concessão de licença de pesquisa (número 12228-1); a Maurizélia Brito (coordenadora da Reserva Biológica Atol das Rocas) pelo apoio imprescindível no trabalho de campo; ao Biólogo Carlos Augusto Oliveira Meirelles pelo auxílio na coleta e fotografias subaquáticas e aos revisores anônimos que contribuíram para a melhoria significativa do manuscrito.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Aissaoui D.M., McNeill D.F., Kirschvink J.L. 1990. Magnetostratigraphy dating of Mururoa atoll and global eustasy. *Earth Planet Sci. Lett.*, **97**:102-120.

Barry S.J., Cowell P.J., Woodroffe C.D. 2007. A morphodynamic model of reef-island development on atolls. *Sedimentary Geology*, **197**: 47-63.

Bonet F. 1967. *Biogeologia subsuperficial del arrecife Alacranes, Yucatan*. Universidade Autônoma de México, Instituto de Geologia, Boletim 80, 192p.

Cloud P.E. 1959. Geology of Saipan, Mariana Islands. 4. Submarine topography and shoal-water ecology. *US Geological Survey Professional Papers*, **280**: 361-445.

Coutinho P.N. & Morais J.O. 1970. Distribución de los sedimentos en la plataforma continental norte-nordeste del Brasil. In: Symposium on inventory of resources of the caribbean sea and adjoining region, 1, 284p..

Duarte P.J. 1938. O Atoll das Rocas. Recife, *Arquivo de Pesquisas Agronômicas*, **1**: 61-70.

Echeverría C.A. & Pires D.O. 1997. Cnidarians of the Atol das Rocas. In: Proc. 8<sup>th</sup>. Int. Coral Reef Symposium, 1, 736p.

Emery K.O., Tracey J.I., Ladd H.S. 1954. Geology of Bikini and nearby atolls. *U.S Geological Survey Professional Papers*, **260**: 1-265.

Gherardi D.F.M. 1996. *Recent carbonate sedimentation on the coralline-algal Atol das Rocas, equatorial South Atlantic, Brazil*. Thesis in Geology, University of London, 353p.

Gherardi D.F.M. & Bosence D.W.J. 1999. Modeling of the ecological succession of encrusting organisms in recent coralline-algal frameworks from Atol das Rocas, Brazil. *Palaios*, **14**: 145-158.

Hanford R.C. & Loucks G.R. 1993. Carbonate depositional sequences and system tracts – Responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. In: Loucks, G.R. & Sarg, F.J. 1993. Carbonate sequence stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists, AAPG Memoir*, **57**: 3-41.

Holz M. & Simões M.G. 2002. *Elementos fundamentais de tafonomia*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 231pp.

Kikuchi R.K.P. 1994. *Geomorfologia, Estratigrafia e Sedimentologia do Atol das Rocas (REBIO-IBAMA/RN)*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 144p.

Kikuchi R.K.P. & Leão Z.M.A.N. 1997. Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): an atoll built primarily by coralline algae. *In: Proc. 8<sup>th</sup>. Int. Coral Reef Symposium*, 1, p. 731-736.

Leão Z.M.A.N. 1982. *Morphology, geology and developmental history of the southernmost coral reefs of Western Atlantic, Abrolhos Bank, Brazil*. Ph.D. Dissertation, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, 218p.

Lowenstam H.A. 1950. Niagaran reefs of the Great Lakes area. *The Journal of Geology.*, **58**: 430-487.

McNeill D.F. 2005. Accumulation rates from well-dated late Neogene carbonate platforms and margins. *Sedimentary Geology.*, **175**: 73-87.

Ottman F. 1963. "L'atol das Rocas" dans l'Atlantique sud tropical. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique.*, **2**: 101-107.

Schobbenhaus C. (ed.) 1984. *Geologia do Brasil*. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 501pp.

Smithers S.G. 1994. Sediment facies of the Cocos (Keeling) Islands Lagoon. *Atoll Research Bulletin.*, **407**: 1-34.

Soares M.O., Lemos V.B., Kikuchi R.K.P. (submetido). Aspectos biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. *Revista Brasileira de Geociências*.

Stoddart D.R. 1969. Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biological Reviews.*, **44**: 433-498.

Tinoco I.M. 1966. Foraminíferos do Atol das Rocas. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico da Universidade Federal de Pernambuco.*, **7**: 91-114.

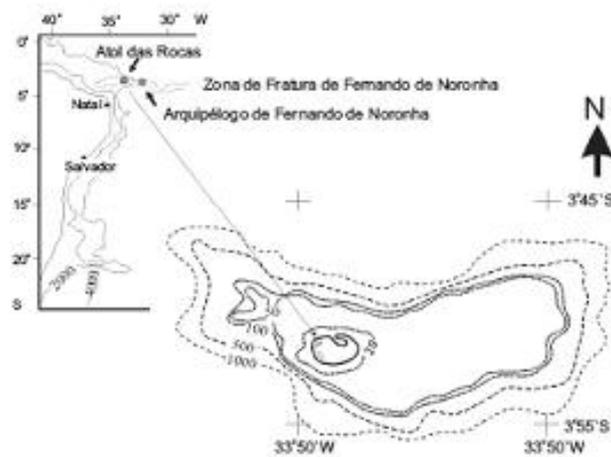
Tinoco I.M. 1972. Foraminíferos dos bancos da costa nordestina, Atol das Rocas e Arquipélago de Fernando de Noronha. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico da Universidade Federal de Pernambuco.*, **13**: 49-60.

Tsuji Y. 1993. Tide influenced high energy environments and rodolith-associate carbonate deposition on the outer shelf and slope off the Miyako Islands, southern Ryukyu Island Arc, *Japan Marine Geology.*, **113**: 255-271.

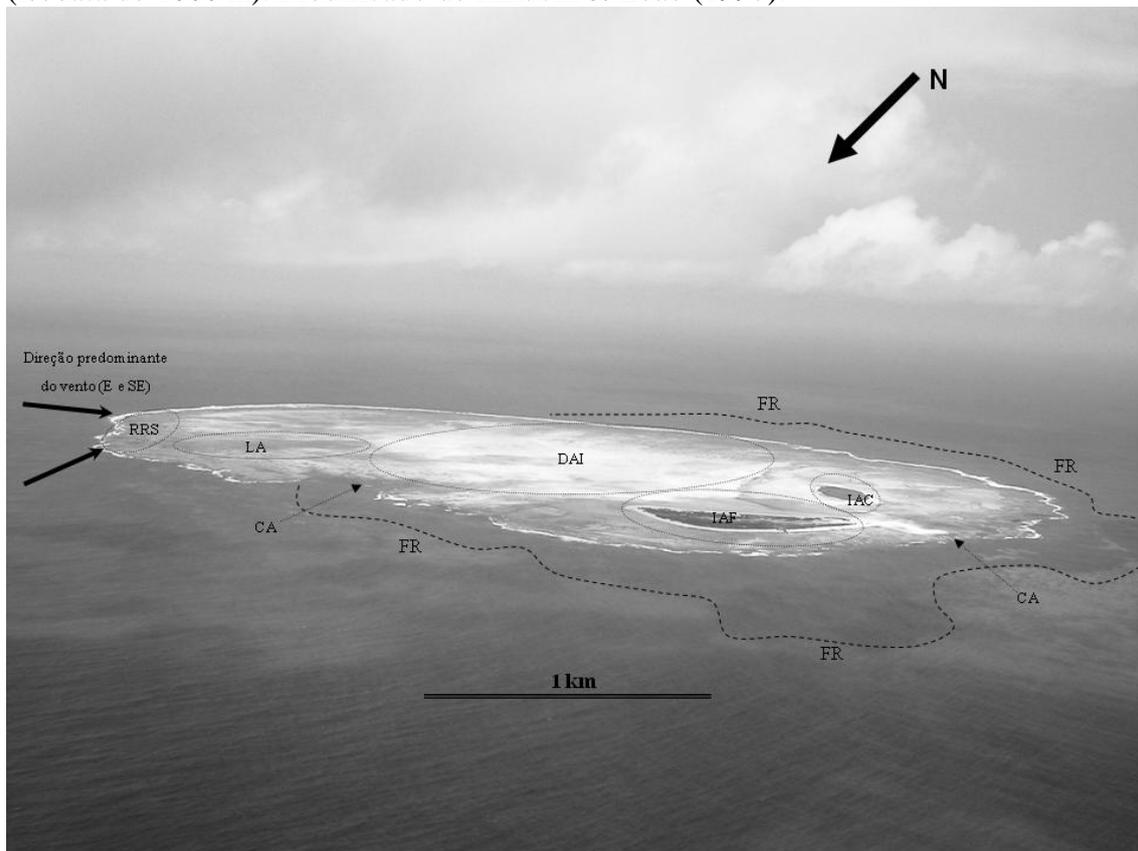
Yamano H., Kayanne H., Matsuda F., Tsuji Y. 2002. Lagoonal facies, ages, and sedimentation in three atolls in the Pacific. *Marine Geology.*, **185**: 233-247.

---

Zenetos A. 1991. Re-evaluation of numerical classification methods for delimiting biofacies and biotopes in an estuarine environment. *Lethaia*, **24**: 13-26.



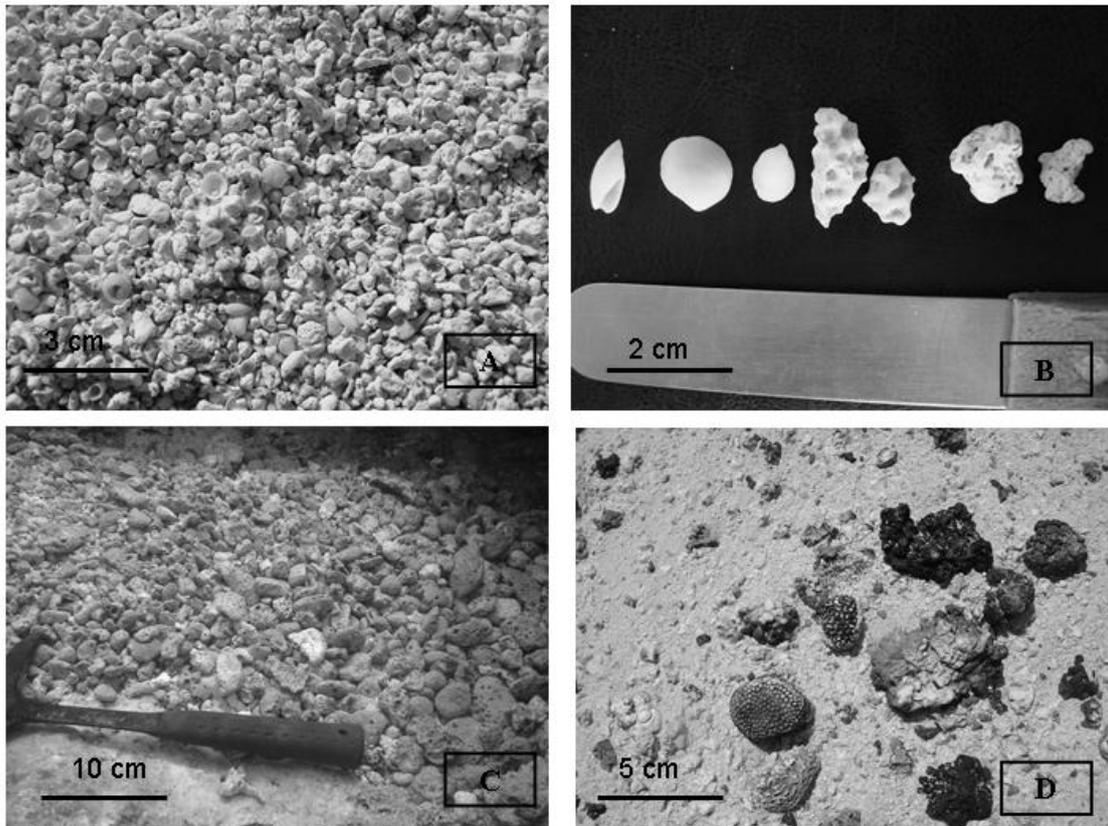
**Figura 01.** Mapa de localização do Atol das Rocas e a delimitação da reserva biológica (isóbata de 1000 m). Modificado de Kikuchi & Leão (1997).



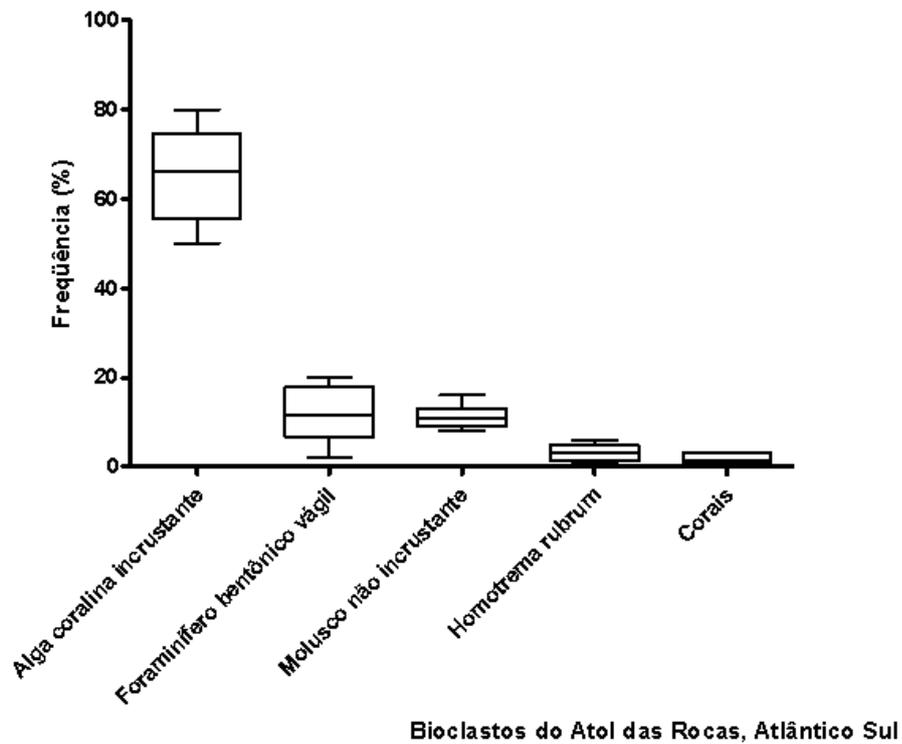
**Figura 02.** Mapa geomorfológico do Atol das Rocas (Atlântico Sul Ocidental), feito a partir de aerofotografia, demonstrando a forma elipsóide, as ilhas arenosas a sotavento (IAC-Ilha do Cemitério e IAF-Ilha do Farol) e a laguna (LA), que não ocorre na área central. Outras zonas geomorfológicas são os canais (CA), a frente recifal (FR), o depósito arenoso Intermareal (DAI) e a área de resíduos de recifes (RRS). Modificado de Soares *et al.* (submetido).

**Tabela 01.** Taxa de ocorrência, em porcentagem, dos bioclastos constituintes dos sedimentos carbonáticos nas divisões ambientais do Atol das Rocas (Anel sota = Anel recifal sotavento, Anel barla = Anel recifal barlavento, Fren sota = Frente recifal sotavento, Dep areno = Depósito arenoso, Pis = Piscinas, Can = Canais, Ilhas = Ilhas arenosas, Lagu = Laguna, no nordeste).

<i>Bioclastos sedimentares do Atol das Rocas</i>	<i>Anel sota</i>	<i>Anel barla</i>	<i>Fren sota</i>	<i>Dep areno</i>	<i>Pis</i>	<i>Can</i>	<i>Ilhas</i>	<i>Lagu</i>
Algas coralinas incrustantes	57	80	75	61	50	71	74	55
Foraminíferos bentônicos vágeis	17	2	9	18	12	6	11	20
Moluscos não incrustantes	13	9	8	13	16	12	10	9
<i>Homotrema rubrum</i>	2	4	5	3	6	1	1	3
Corais	1	3	1	1	1	3	2	3
Gastrópodes vermetídeos	1	2	1	1	1	2	1	1
<i>Millepora alcicornis</i>	0	1	0	1	1	2	1	3
Briozoários	0	1	0	1	1	1	0	1
Crustáceos	1	1	1	1	1	0	1	1
Equinodermas	1	0	1	1	1	1	1	1
<i>Halimeda</i> sp.	1	1	1	1	1	1	0	3



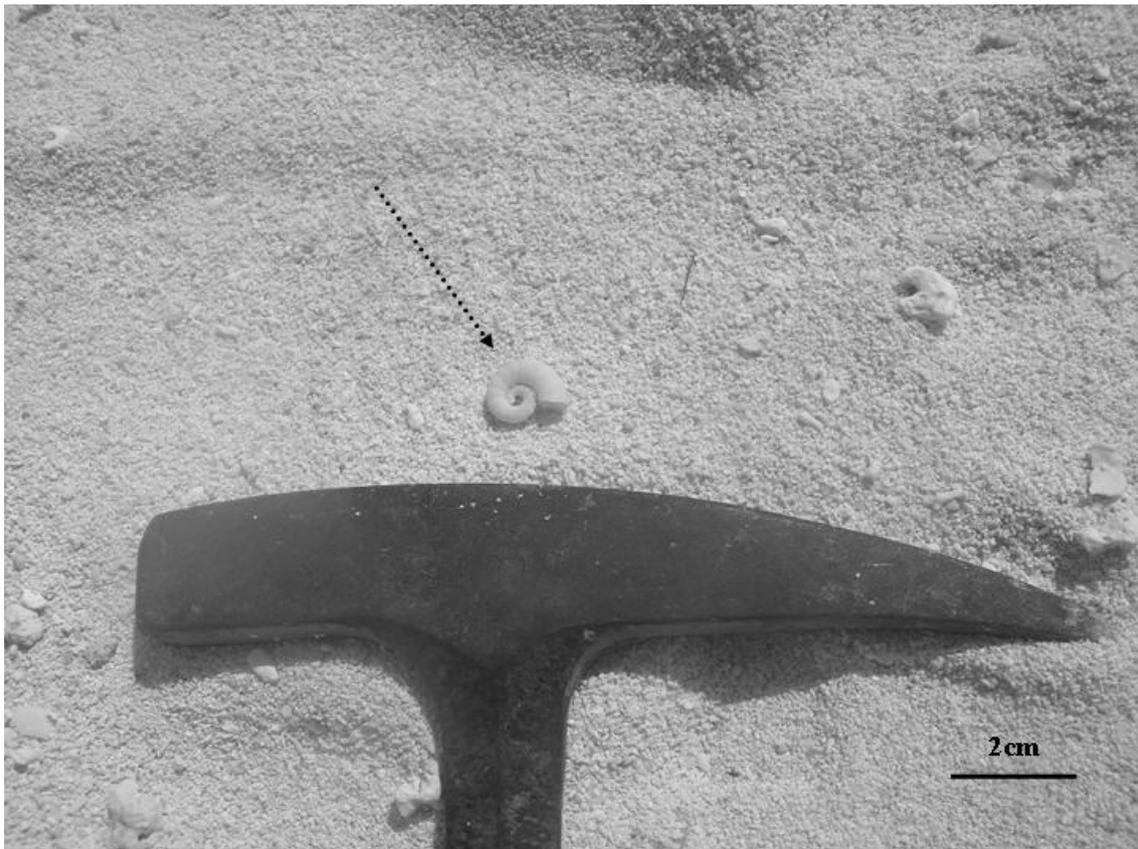
**Figura 03.** Bioclastos dos sedimentos carbonáticos do Atol das Rocas. Figura 3A. Areia carbonática biogênica da Ilha do Farol. Figura 3B. Bioclastos de moluscos (três primeiros da esquerda para a direita), corais (quarto e quinto exemplares da esquerda para a direita) e de algas calcárias (sexto e sétimo exemplares da esquerda para a direita). Figura 3C. Fragmentos bioclásticos em uma piscina no lado barlavento do Atol. Figura 3D. Fragmentos de corais e algas calcárias dispostos na faixa entremarés da ilha do Cemitério.



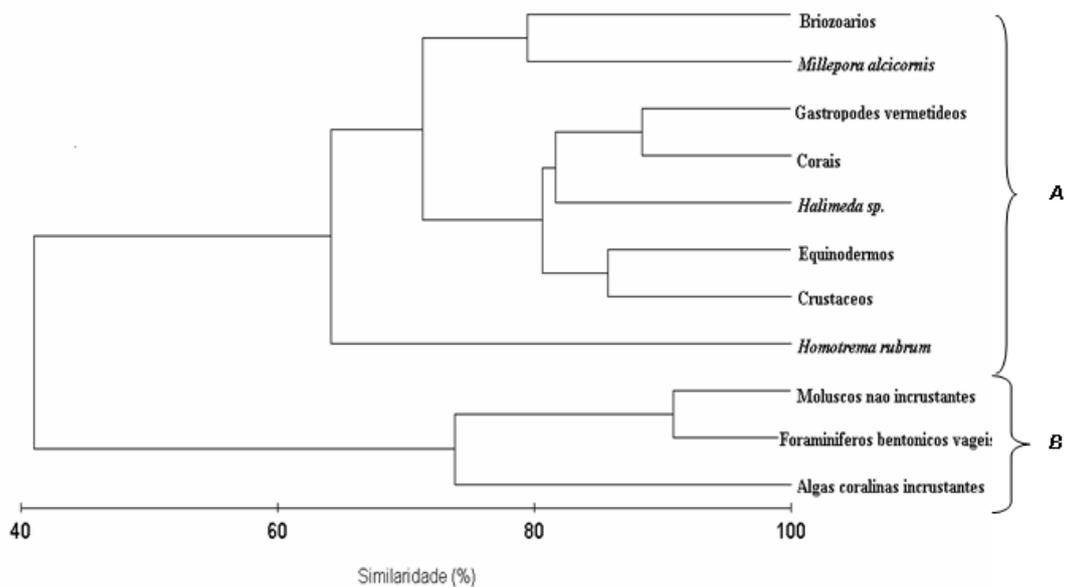
**Figura 04.** Gráfico em caixa (box-whisker) mostrando a média e o desvio padrão da frequência dos principais bioclastos dos sedimentos carbonáticos do Atol das Rocas. N=40 amostras.

**Tabela 02.** Comparações múltiplas entre os principais constituintes bioclásticos do Atol das Rocas. \*  $P < 0,05$  = diferença significativa, ns = diferença não-significativa.

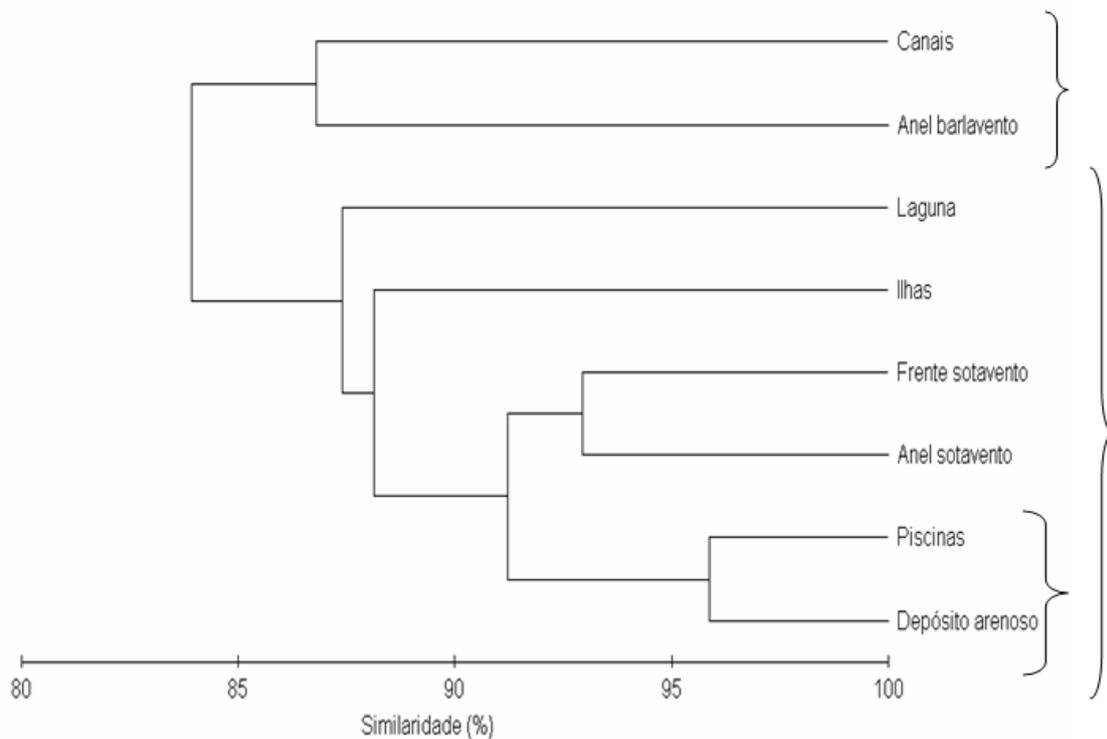
<i>Comparação</i>	<i>Diferença da média</i>	<i>q</i>	<i>P-valor</i>
Alga coralina X Foraminífero	53.500	25.865	* $P < 0,05$
Alga coralina X Molusco	54.125	26.167	* $P < 0,05$
Alga coralina X <i>Homotrema rubrum</i>	62.250	30.095	* $P < 0,05$
Alga coralina X Corais	63.500	30.699	* $P < 0,05$
Foraminífero X Moluscos	0.6250	0.3022	Ns
Foraminífero X <i>Homotrema rubrum</i>	8.750	4.230	* $P < 0,05$
Foraminífero X Corais	10.000	4.834	* $P < 0,05$
Moluscos X <i>Homotrema rubrum</i>	8.125	3.928	Ns
Moluscos X Corais	9.375	4.532	* $P < 0,05$
<i>Homotrema rubrum</i> X Corais	1.250	0.6043	Ns



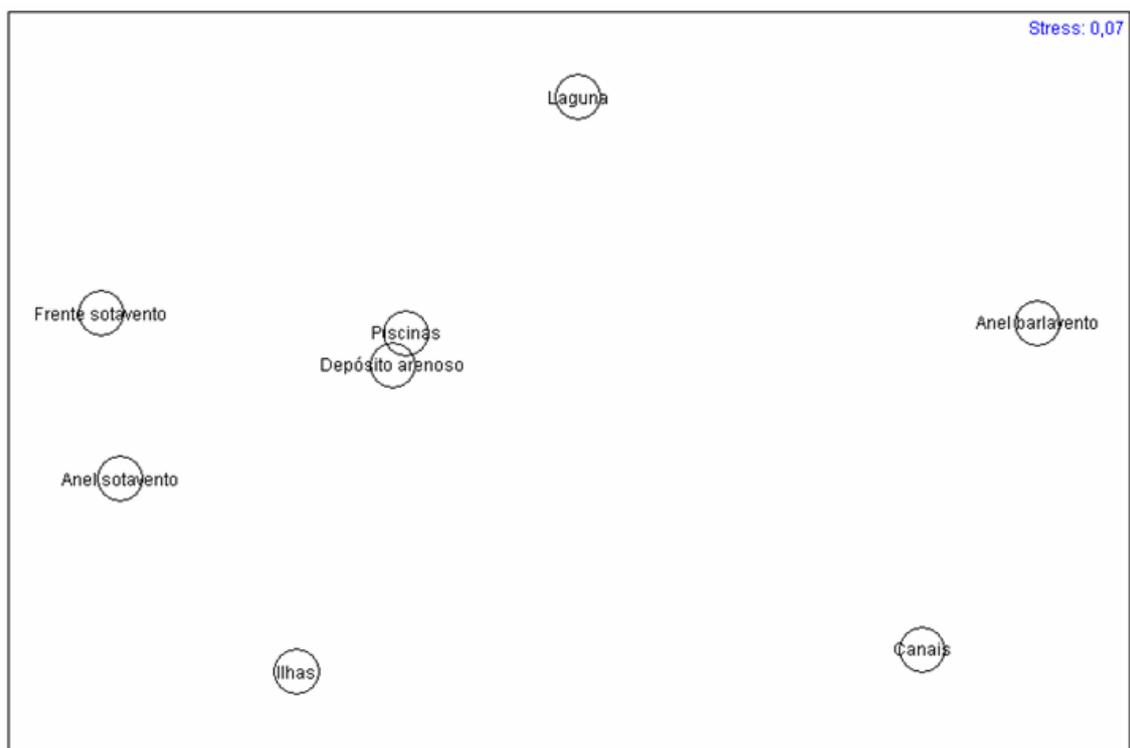
**Figura 05.** Bioclasto de cefalópode *Spirula spirula* proveniente de zona abissal (aproximadamente 4000 m de profundidade) na ilha do Cemitério, Atol das Rocas, demonstrando presença na contribuição sedimentar.



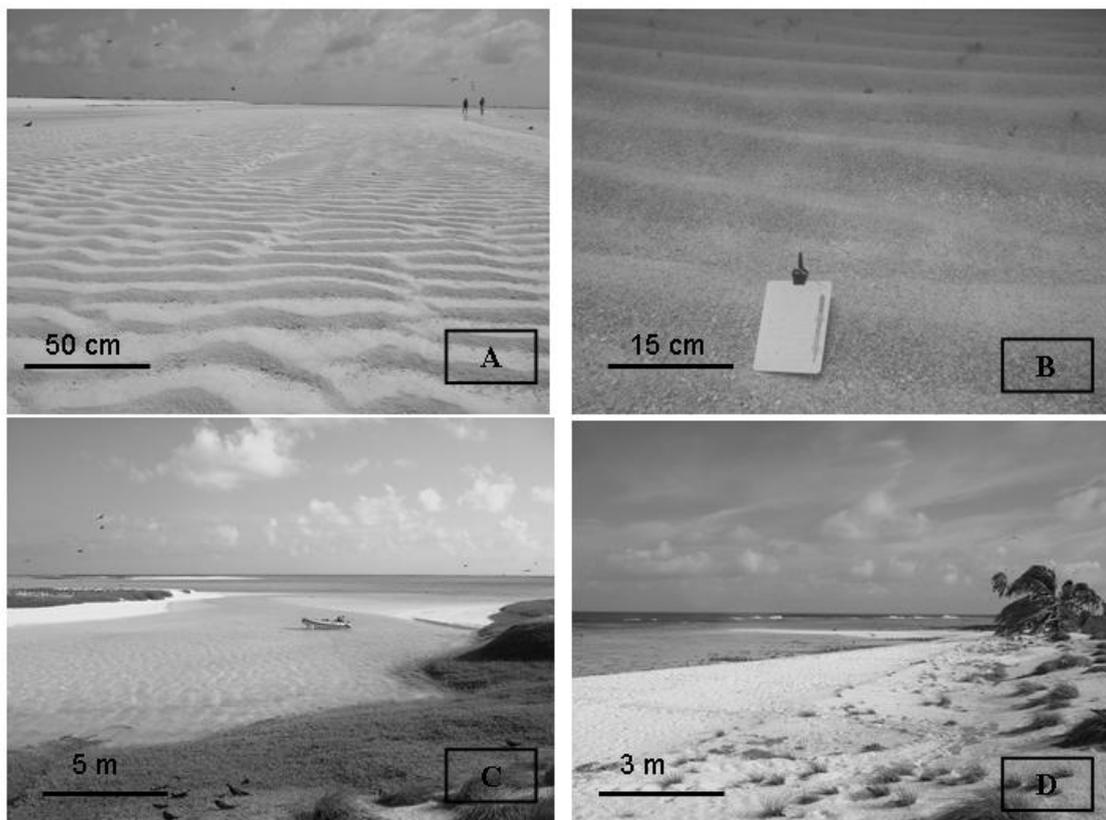
**Figura 06.** Análise de agrupamento (*cluster* modo-R) dos constituintes bioclásticos do Atol das Rocas. O índice de similaridade utilizado no agrupamento é de Bray-Curtis, em porcentagem (%). O Grupo A representa os bioclastos mais abundantes da tanatocenose.



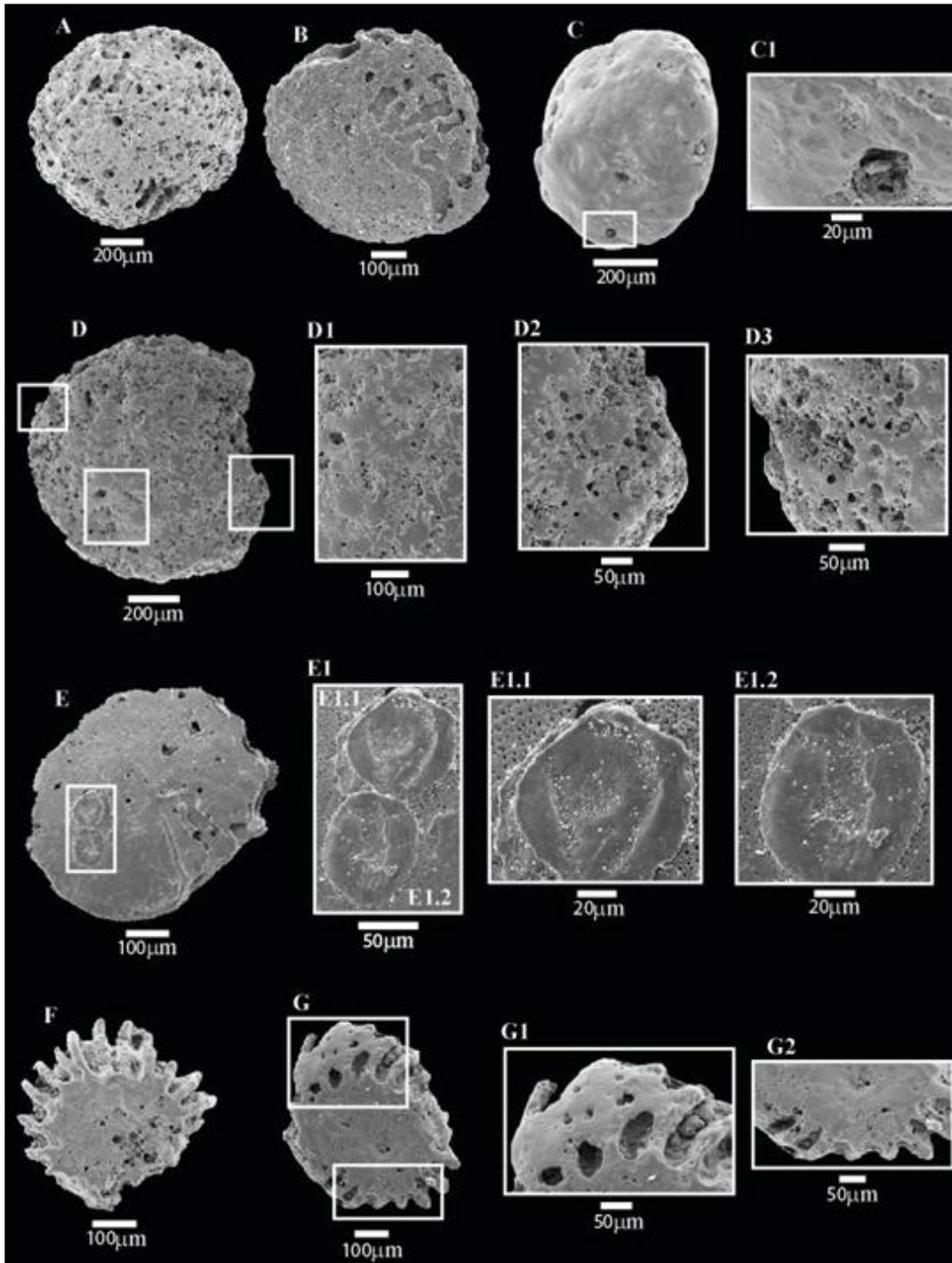
**Figura 07.** Análise de agrupamento (*cluster* modo-Q) dos compartimentos geoambientais do Atol das Rocas. O índice de similaridade utilizado no agrupamento é de Bray-Curtis, em porcentagem (%).



**Figura 08.** Análise de MDS dos compartimentos geoambientais do Atol das Rocas. A proximidade dos círculos, que representam os compartimentos, indica maior similaridade na constituição bioclástica (táxons e abundância).



**Figura 09.** Zonas de sedimentação carbonática biogênica no Atol das Rocas. (A) Depósito arenoso intermareal exibindo ondulas em situação de maré baixa de sizígia. (B) Marcas de onda com cristas contínuas em um canal de ligação entre o Atol e o oceano adjacente. (C) Canal de maré na ilha do Farol, em período de maré alta. (D) Vista parcial da Ilha do Farol mostrando parte da vegetação e o acúmulo de sedimento carbonático biogênico que formou a ilha.



**Figura 10.** Foraminíferos bentônicos sedimentares e assinaturas tafonômicas indicadoras de retrabalhamento sedimentar e alta energia ambiental no Atol das Rocas analisados no MEV. A, B e C = Diferentes níveis de corrosão e arredondamento. C1= Orifício na estrutura do foraminífero, evidenciando micropreenchimento bioclástico. D = Altos níveis de abrasão e bioerosão no esqueleto, resultantes de retrabalhamento sedimentar e atividade geobiológica. D1, D2 e D3 representam detalhes das assinaturas tafonômicas de abrasão e bioerosão. E = Incrustação calcária no esqueleto durante os processos bioestratinômicos. Detalhe de prováveis valvas (E1) incrustadas. F = Foraminífero exibindo quebra e corrosão decorrente de alta energia no ambiente sedimentar do depósito arenoso entremarés. Os bioclastos sedimentares intensamente bioerodidos ou incrustados indicam, também, prolongada exposição na interface água / sedimento.

---

From: Valéria Gallo <[galloval@gmail.com](mailto:galloval@gmail.com)>  
Date: 2009/11/10  
Subject: A Paleontologia e os Eventos Globais  
To: [bio\\_marcelo@yahoo.com.br](mailto:bio_marcelo@yahoo.com.br), [valesca.lemos@ufrgs.br](mailto:valesca.lemos@ufrgs.br), [rkikuchi@cpgg.ufba.br](mailto:rkikuchi@cpgg.ufba.br)

Prezados Autores,

Temos a satisfação de informar que o trabalho "Distribuição espacial de vermetídeos (Mollusca: Gastropoda) Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial", de autoria de Marcelo de Oliveira Soares, Valesca Brasil Lemos & Ruy Kenji Papa de Kikuchi foi aceito para publicação no número especial/volume temático do Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, intitulado "A Paleontologia e os Eventos Globais". Em anexo, vocês encontrarão os pareceres dos revisores. Solicitamos que a correção seja enviada em um prazo máximo de 1 mês a contar de 10 de novembro. Caso não estejam de acordo com as sugestões, a Comissão solicita que os autores apresentem contra-argumentos. A Comissão solicita, ainda, que os autores retornem o texto revisto dentro das normas do Boletim (vide, em anexo). Os editores deste número especial serão a Dra. Anna Luíza Ilkiu Borges, Vladimir de Araujo Távora, Valéria Gallo e Hilda Maria Andrade da Silva, os três últimos como editores convidados. Os trâmites do processo editorial serão detalhados tão logo estejam definidos pela Comissão Editorial do Boletim.

Abs,

Valéria Gallo

Laboratório de Sistemática e Biogeografia

Dept. Zoologia - UERJ

## **Distribuição espacial de vermetídeos (Mollusca: Gastropoda) no Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial**

MARCELO DE OLIVEIRA SOARES

VALESCA BRASIL LEMOS

RUY KENJI PAPA DE KIKUCHI

### **Abstract**

Rocas Atoll is a biogenic reef located 266 km from the Brazilian Northeast coast. Its carbonate structure is formed by corals, calcareous algae, foraminifers and vermetids. Despite its importance as bioconstructors, there are few studies on the systematics and distribution of these mollusks in this oceanic reef system. Data was obtained on the species, density and distribution leeward and windward from the taphocoenosis. The species *Dendropoma irregulare* (d'Orbigny, 1842) and *Petalconchus varians* (d'Orbigny, 1841) were recognized in different sectors of the reef system, mainly in the windward sector ( $0,26 \pm 0,04$  ind/cm<sup>2</sup>). In the depositional systems with greater hydrodynamic impact of the waves, there was a smaller bioaccumulation of the fossilized shells of these organisms ( $0,11 \pm 0,02$  ind/cm<sup>2</sup>). Such vermetid species are indicators of the sea level and of intertidal or immediately subtidal paleoenvironments, being able to contribute to elucidate the geological history of the only Atoll of the South Atlantic.

Keywords: Rocas Atoll, Spacial Distribution, Vermetids, Shells, Hydrodynamics.

### **1.Introdução**

#### **1.1.Moluscos bioconstrutores e vermetídeos**

Os ostreídeos e vermetídeos constituem densas assembléias, comuns nas séries sedimentares, nas quais é possível distinguir bioacumulações de conchas não-cimentadas de verdadeiras bioconstruções. Um outro aspecto de interesse paleontológico mostra que os moluscos bioconstrutores podem constituir acumulações tridimensionais, como outros construtores de recifes, e acumulações bidimensionais

incrustadas nas superfícies das rochas sedimentares. Acumulações mistas de bivalves e gastrópodes são bastante comuns em bacias sedimentares cenozóicas (Danelian *et al.* 2007).

Dentre os diversos grupos de gastrópodes fósseis, as espécies de vermetídeos apresentam um modo de vida gregário, além de se caracterizarem por um crescimento extremamente irregular das conchas (Gould, 1994). A aglomeração das conchas desses moluscos, os quais crescem cimentados ao substrato, pode constituir uma estrutura recifal carbonática densa, conhecidos em todos os mares entre 44° na latitude Norte ao mesmo grau no Sul (Saint-Martin *et al.* 2007).

## **1.2. Bioconstruções de vermetídeos e recifes**

Bioconstruções de vermetídeos são geralmente reconhecidas como bons indicadores de variação do nível do mar e utilizadas para reconstrução de mudanças eustáticas e instabilidade tectônica (Laborel & Laborel-Deguen, 1994; Vescogni *et al.* 2008), inclusive na zona costeira do sudeste (Dias *et al.* 2009), sul (Souza *et al.* 2001) e nordeste (Oliveira & Bemvenuti, 2008) do Brasil.

Bioconstruções e bioacumulações são freqüentemente consideradas sob uma perspectiva sedimentológica ou paleoambiental (plataformas temperadas contra tropicais). Aspectos paleobiológicos da bioconstrução nos recifes são raramente estudados (Heckel, 1974), apesar de constituírem uma parte significativa dos recifes, inclusive do Atol das Rocas no Nordeste do Brasil. Neste recife os principais organismos bioconstrutores são algas calcáreas, corais escleractíneos, vermetídeos e, com menor contribuição, foraminíferos (Kikuchi & Leão, 1997). Apesar disso, existem poucos estudos (Kikuchi & Leão, 1997; Gherardi & Bosence, 2001) sobre certos aspectos da bioconstrução e bioacumulação (principalmente dos foraminíferos e dos moluscos) neste recife oceânico. Nestes trabalhos apenas cita-se a participação significativa dos vermetídeos na construção carbonática, observando-se ausência de dados taxonômicos e de distribuição espacial dos vermetídeos no único Atol do Atlântico Sul. Assim, este trabalho tem por objetivo: analisar as tafocenoses de vermetídeos incrustantes e sua distribuição no Atol das Rocas, para correlacionar com fatores ecológicos e paleohidrodinâmicos.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Área de Estudo**

O Atol das Rocas está localizado no topo de uma cadeia de montanhas submarinas no Oceano Atlântico Sul, cuja base encontra-se a 4000 metros de profundidade no leito oceânico, a 3°51'S Latitude e 33°49'W Longitude (Echeverría *et al.* 1997), sendo o único atol dessa região. Este recife apresenta uma forma elipsóide, possuindo uma pequena laguna à nordeste e um depósito arenoso entremarés cobrindo a parte central da ilha (Kikuchi & Leão, 1997). O substrato é composto, principalmente, por algas calcárias incrustantes e moluscos vermetídeos (Gherardi & Bosence, 1999).

O clima é tropical e úmido: temperatura mínima do ar é 26°C e a média da precipitação pluviométrica é 109 mm (Höflich, 1984). Ventos SE e E são predominantes, nos quais se observa uma velocidade superior a 15 m.s<sup>-1</sup>. As marés na área tem um regime semi-diurno com amplitude máxima de 3.8 m (Kikuchi & Leão, 1997).

### **2.2. Atividades de campo**

O trabalho de campo para realizar o inventário dos vermetídeos construtores e analisar a distribuição dos vermetídeos no Atol das Rocas requereu diferentes etapas como interpretação de imagens de mapas geológicos da área, visualização das características da bioconstrução, obtenção de amostras geológicas e paleontológicas.

Na expedição oceanográfica de janeiro-fevereiro de 2008 foram realizadas amostragens com “quadrats” de 100cm<sup>2</sup> para análise da densidade dos vermetídeos nas zonas à barlavento e sotavento do recife oceânico (figura 1), totalizando 20 quadrats.

### **FIGURA 1.**

### **2.3. Análise dos dados paleontológicos**

Para identificação do material fossilífero utilizou-se a bibliografia de Gould (1994), Rios (1994) e Vescogni *et al.* (2008). As variações da abundância das conchas de vermetídeos foram plotadas em planilhas eletrônicas. Os dados utilizados foram a

densidade relativa destes organismos lado à barlavento e sotavento do Atol das Rocas. Tal procedimento visou revelar em qual das zonas recifais ocorre maior densidade dos vermetídeos. A hipótese a ser resolvida é: Qual a zona recifal que contém maior densidade de conchas de vermetídeos no único Atol do Atlântico Sul Equatorial ? O Teste estatístico adotado foi o t de Student para comparação das médias com nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% após verificada a normalidade dos dados paleontológicos. O software utilizado para tais análises estatísticas foi o PAST (*Paleontological Data Analysis*) version 1.89.

Na hipótese nula ( $H_0$ ) admitimos que não houve variação significativa na abundância de vermetídeos na bioconstrução recifal considerando as diferentes zonas recifais (barlavento e sotavento), enquanto que na hipótese alternativa ( $H_a$ ) haveria variação significativa nos valores de densidade destes moluscos.

### 3. Resultados

A comunidade de conchas de vermetídeos analisada é composta por duas espécies: *Dendropoma irregulare* (d'Orbigny, 1842) e *Petalconchus varians* (d'Orbigny, 1841). *Dendropoma irregulare* é bastante comum, vivendo em colônias, formando recifes de vermetídeos, sendo o principal organismo amostrado nos quadrats realizados.

As bioacumulações de conchas desses moluscos foram encontradas nos setores a barlavento e sotavento, principalmente distribuídos na massa carbonática do anel e na margem recifal além do platô do recife do Atol das Rocas (figura 2). Na área onde os ventos têm menor incidência encontrou-se conchas incrustadas na frente recifal.

#### FIGURA 02.

A densidade de *D. irregulare* no setor à barlavento foi de  $0,216 \pm 0,04$  indivíduos por  $\text{cm}^2$ . Na área à sotavento obteve-se valores absolutos de  $0,11 \pm 0,02$  ind / $\text{cm}^2$ . A diferença entre os valores de densidade dos vermetídeos foi significativa ( $P=0,0009$ ,  $\alpha=5\%$ , teste t student) o que corrobora a presença de uma maior densidade de fósseis de vermetídeos no lado à barlavento do Atol das Rocas (figura 3) onde há maior incidência de ventos e de correntes.

#### FIGURA 03.

A distribuição dos vermetídeos *P. varians* e *D. irregulare* registrados no único atol do Atlântico Sul Equatorial representa um sistema de bioconstrução que combina aspectos paleobiológicos, paleo-oceanográficos e sedimentológicos. Tais construções carbonáticas são resultado de um conjunto incomum de eventos ou condições paleoambientais: substrato favorável; água rica em disponibilidade de alimento que suporta o gregarismo; capacidade dos vermetídeos de otimizar os recursos alimentares; instalação em uma zona que pode ser submetida ao fenômeno da ressurgência e/ou à influência de correntes superficiais do Atlântico; fatores ambientais (ondas, correntes, tempestades) que distribuem as larvas; relativa estabilidade do nível do mar no Atol das Rocas permitindo a continuidade e a progradação do sistema carbonático.

#### 4. Discussão

Os fósseis de vermetídeos bioconstrutores do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial) são do Período Neógeno (época Holoceno) com menos de 5000 anos (Kikuchi & Leão, 1997), sendo *Dendropoma irregulare* o mais abundante na tafocenose considerada (tabela I). Gherardi & Bosence (2001), após análise de testemunhos, constataram a presença do gênero *Dendropoma* como um construtor carbonático secundário do recife oceânico.

Recifes de vermetídeos são conhecidos desde o Badeniano (Mioceno médio) até os dias atuais, sendo sua principal importância o fato de serem utilizados como indicadores de variações do nível do mar, intrinsecamente associados à zona entremarés ou imediatamente subtidal. Durante sua evolução, dois gêneros diferentes de vermetídeos desenvolveram-se como construtores recifais: *Petalocochnus* que foi o principal componente dos recifes de vermetídeos até o início do Holoceno, quando por razões desconhecidas, foi quase que totalmente substituído por *Dendropoma* (Gould, 1994; Vescogni *et al.* 2008), sendo este comumente encontrado tanto no Atol das Rocas, quanto no litoral brasileiro (Oliveira & Bemvenuti, 2008; Dias *et al.* 2009).

#### TABELA I.

No Mediterrâneo, bioconstruções formadas pelas espécies *Dendropoma* (*Novastoa*) *petraeum* Monterosato, 1884 e *Vermetus* (*Vermetus*) *triqueter* Bivona, 1832 aparecem localizadas nas costas da Espanha, Algéria, Sicília, Malta e Grécia. Tais

bioconstruções são localizadas no limite da zona entremarés e infralitoral, e constituem franjas paralelas a costa, muitas vezes por vários quilômetros (Safriel, 1975). Atualmente, bioconstruções com *Petalocochnus* não estão presentes no Mediterrâneo (Saint Martin *et al.* 2007). Em outras áreas marinhas, o gênero *Petalocochnus* é conhecido por residir em águas calmas (baixa energia) (Laborel, 1977) como no litoral brasileiro.

Nos recifes em que os vermetídeos são construtores (como no caso do Atol das Rocas) tais organismos, junto com os táxons bioerosivos, possuem uma característica em comum: ambos são comedores de suspensão (Scoffin & Garrett, 1974; Bromley, 1978). Isso significa que eles precisam manter seu acesso a água do mar vivendo na superfície do recife ou em cavidades. Em contraste, alta sedimentação pode destruir ou reduzir a habilidade na coleta de alimento.

Isso explica porque os fósseis de vermetídeos são mais abundantes no anel recifal e adaptados a certas zonas de energia hidrodinâmica do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial). Tais organismos são mais concentrados no setor à barlavento, porém são menos abundantes na frente recifal à sotavento. Tal fato pode ser explicado devido à principal fonte de recursos serem partículas capturadas pela rede mucosa secretada pela grande glândula pediosa (Hughes, 1979), e o impacto direto das ondas na frente recifal pode possivelmente destruir esta glândula mucosa (Gherardi & Bosence, 2001).

*Dendropoma* encontra as condições ótimas ambientais na zona entremarés ou imediatamente subtidal (Oliveira & Bemvenuti, 2008), onde a exposição adequada à ação das ondas e marés permite o acesso ao suprimento alimentar, retira os resíduos metabólicos e reduz o número dos competidores (Vescogni *et al.* 2008).

Um certo grau de sedimentação local não afeta os vermetídeos devido à sua capacidade de mudar a orientação das suas conchas. A capacidade de secreção de uma nova rádula em uma direção diferenciada para impedir o impacto direto e abrasão pelo transporte de sedimentos (Jackson, 1979) é outro importante fator na sobrevivência em áreas de alta sedimentação. Alguns gastrópodes vermetídeos apresentam uma combinação de cimentação e dissolução do substrato carbonático para fixação em uma área mais funda. A grande variedade de estilos de assentamento realizados por esses organismos fornecem uma variedade correspondente de processos iniciais de fossilização.

## 5. Conclusões

Foi constatada a presença de 2 espécies de vermetídeos (*D. irregulare* e *P. varians*) no único Atol do Atlântico Sul. A hidrodinâmica do Atol das Rocas e as características ecológicas das espécies foram os principais fatores na distribuição espacial dos vermetídeos no Atol das Rocas. A sedimentação carbonática provavelmente pouco influenciou na distribuição considerando os setores à barlavento e sotavento. O papel dos vermetídeos na bioconstrução e na interpretação paleoecológica deve ser considerado para compreensão da Geologia Histórica deste recife oceânico, principalmente como indicadores de nível do mar pretérito ao longo do Holoceno.

## 6. Agradecimentos

O presente trabalho faz parte da tese de doutorado do programa de Pós-Graduação em Geociências (UFRGS) intitulada “História Natural do Atol das Rocas, Atlântico Sul”. M.O Soares agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico) pela concessão de bolsa de Doutorado. À PETROBRAS e Fundação SOS Mata Atlântica pelo financiamento da pesquisa dos trabalhos de campo. Ao ICMBIO pela concessão de licença de pesquisa (número 12228-1) e apoio nas atividades de campo (principalmente a coordenadora da Reserva Biológica Maurizélia Brito). Ao Biólogo Carlos Augusto Oliveira Meirelles pelo auxílio na coleta e fotografias subaquáticas.

## 7. Referências Bibliográficas

BROMLEY, R.G. 1978. Bioerosion of Bermuda reefs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 23: 169–197

DANELIAN, T.; SAINT MARTIN, S. & BLANC-VALLERON, M.M. 2007. Middle Eocene radiolarian and diatom accumulation in the Equatorial Atlantic (Demerara Rise, ODP Leg 207). Possible links with climatic and palaeoceanographic changes. *C.R. Palevol*, 6: 5-8.

DIAS, F.F.; CASTRO, J.W.A.; SEOANE, J.C.S. & CAMARGO, L.H.R. 2009. Indicadores de mudanças climáticas e de variações do nível do mar na costa do Rio de Janeiro: Aquecimento ou Resfriamento? *Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia*, 1(1): 21-32.

- ECHEVERRÍA, C.A. & PIRES, D.O. 1997. Cnidarians of the Atol das Rocas. In: Proceedings. 8<sup>TH</sup>. International Coral Reef Symposium, Panamá, Proceedings, PICRS, p. 443-446.
- GHERARDI, D.F.M. & BOSENCE, D.W.J., 2001. Composition and community structure of the coralline algal reefs from Atol das Rocas, South Atlantic, Brazil. *Coral Reefs*, 19: 205-219.
- GOULD, S.J. 1994. *Petalococonchus sculpturatus alaminatus*, a new Pliocene subspecies of vermetid gastropods lacking its defining generic character, with comments on vermetid systematics in general. *Journal of Paleontology*, 68: 1025–1036.
- HECKEL, P.H. 1974. Carbonate buildups in the geological record: a review. In: LAPORTE, L.F (ed.) *Reefs in time and space*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists., p.90-154. (SEPM, Special Publication, n. 18)
- HÖFLICH, O., 1984. Climate of the South Atlantic Ocean. In: VAN LOON, H. (ed.), *Climates of the Oceans*. Elsevier, Amsterdam, p. 1–192.
- HUGHES, R.N., 1979. Coloniality of Vermetidae (Gastropoda). In: LARWOOD, G. & ROSEN, B.R. (eds.), *Biology and Systematics of Colonial Organisms*, p. 243–253. (Syst. Assoc. Spec. 11).
- JACKSON, J.B.C. 1979. Morphological strategies of sessile animals, In: LARWOOD, G. & ROSEN, B.R. (eds.), *Biology and Systematics of Colonial Organisms*, p. 499–555. (Syst. Assoc. Spec. 11).
- KIKUCHI R.K.P. & LEÃO Z.M.A.N. 1997. Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): an atoll built primarily by coralline algae. In: Proceedings. 8<sup>TH</sup>. International Coral Reef Symposium, Panamá, Proceedings, PICRS, p. 731- 736.
- LABOREL, J. 1977. Are reef building vermetid disappearing in the South Atlantic ? In: Proceedings of 3th International Coral Reef Symposium, Miami, Proceedings, p. 233–237.
- LABOREL, J. & LABOREL-DEGUEN, F. 1994. Biological indicators of relative sea level variations and co-seismic displacements in the Mediterranean region. *Journal of Coastal Research*, 10: 395-415.
- OLIVEIRA, P. S. & BEMVENUTI, C.E. 2008. Vermetídeos (Caenogastropoda, Vermetidae) do Arquipélago dos Abrolhos, BA, Brasil.. In: VII Congresso Latinoamericano de Malacologia - CLAMA, 2008, Valdivia. Libro de Resúmenes, p. 331.
- RIOS, E. DE C. 1994. *Seashells of Brazil*. Fundação Universidade do Rio Grande,

---

Museu Oceanográfico, 2nd. Edition, 329 p.

SAFRIEL, U. 1975. The role of vermetid gastropods in the formation of Mediterranean and Atlantic reefs, *Oecologia (Berl.)* 20: 85–101.

SAINT-MARTIN, J.P. ; CONESA, G.; CORNÉE, J.J.; MARTIN, S.S.; ANDRÉ, J.P.; RIBAUD-LAURENTI, A. & BENMOUSSA, A. 2007. Un processus original de construction-accumulation à vermetes (Messinien, Maroc). *C.R. Paleovol.* 6: 73-85.

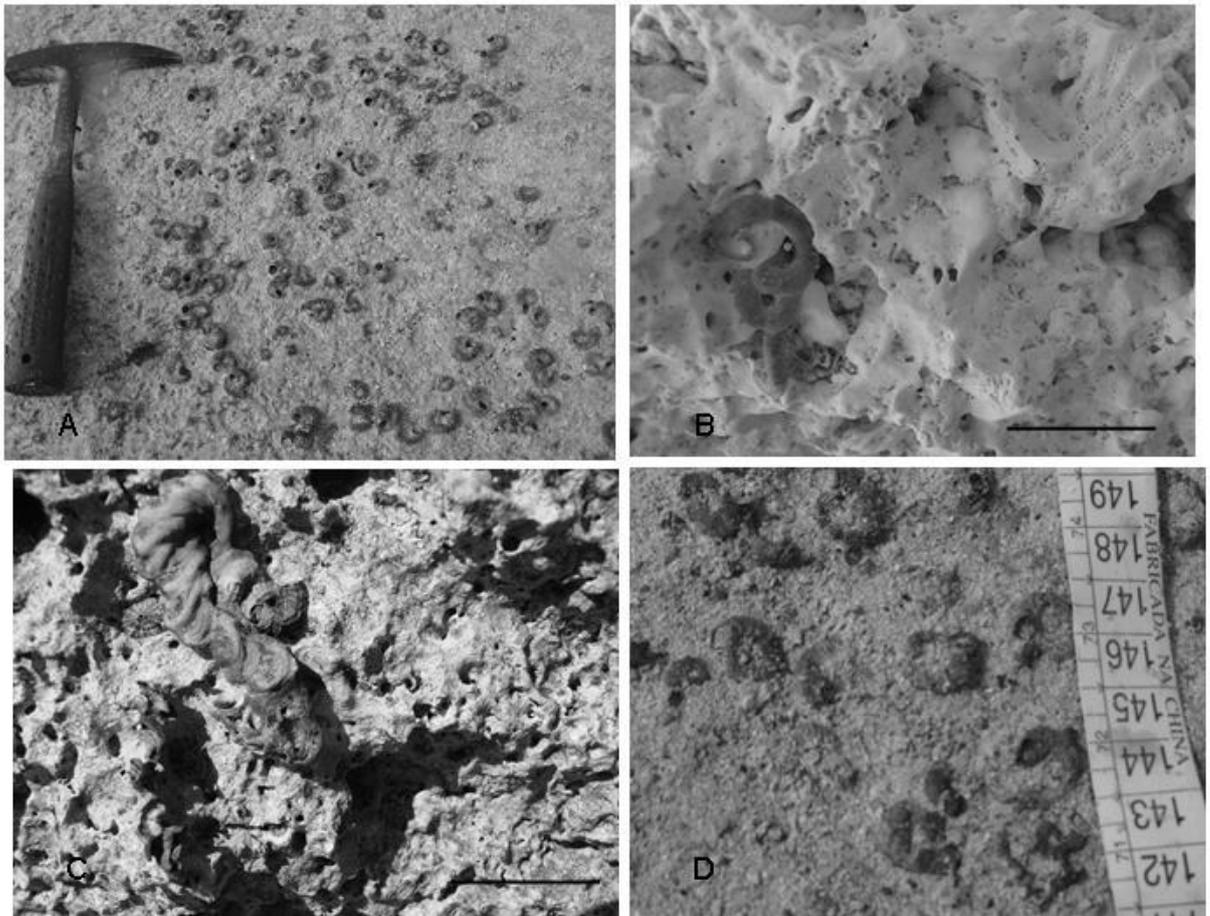
SCOFFIN, T. & GARRETT, P. 1974. Processes in the formation and preservation of the internal structure in Bermuda patch reefs. In: Proceedings of the 2th International Coral Reef Symposium, Bali, Proceedings, p.413-429.

SOUZA, M.C.; ANGULO, R.J. & PESSENDA, L.C.R. 2001. Evolução Paleogeográfica da planície costeira de itapoá, Litoral Norte de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(2): 223-230.

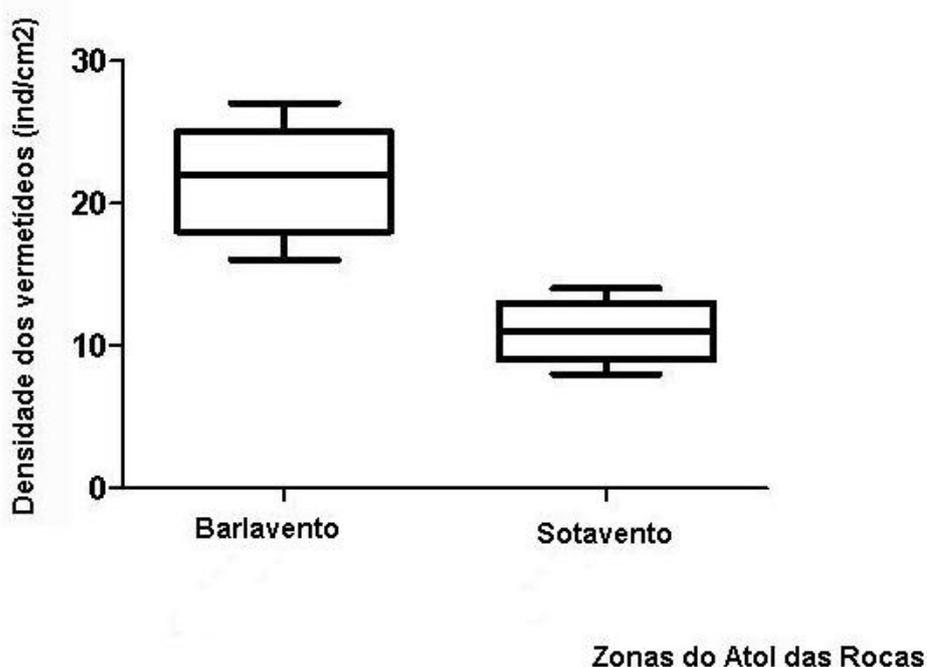
VESCOGNI, A. & BOSELLINI, F.R.; REUTER, M.; BRACHERT, T.C. 2008. Vermetid reefs and their use as paleobathymetric markers: New insights from the Late Miocene of the Mediterranean (Southern Italy, Crete). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 267: 89-101.



**Figura 1.** Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial) mostrando as zonas estudadas à barlavento e sotavento e a frente recifal (FR). Imagem obtida nas atividades de campo em situação de maré baixa de sizígia. Abreviações: DAI= Depósito arenoso intermarés, LA=Laguna. Modificado de imagem cedida pela FAB Força Aérea Brasileira.



**Figura 2.** Gastrópodes vermetídeos do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial). **A.** Bioacumulação de *Dendropoma irregulare* junto à alga *Porolython pachydermum*. **B.** Amostra recifal do Período Neógeno (Holoceno) mostrando papel de bioconstrução de vermetídeos junto com corais e algas calcáreas. **C.** Concha de vermetídeo *Petalconchus varians* no platô recifal. **D.** Detalhe de uma bioacumulação fossilífera de vermetídeos, indicadora de ambiente intermaré ou imediatamente submaré.



**Figura 3.** Densidade das bioacumulações de vermetídeos nos setores à barlavento e sotavento do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).

**Tabela I.** Distribuição temporal e espacial de dois importantes vermetídeos bioconstrutores recifais. Dados do presente trabalho e de Vescogni *et al.* (2008).

Tempo geológico/ biogeográficas	Regiões	Mediterrâneo e Paratethys	Caribe e Atlântico Sul	Atol das Rocas
Recifes atuais de vermetídeos		<i>Dendropoma</i>	<i>Dendropoma</i>	<i>Dendropoma</i>
Holoceno		<i>Dendropoma</i>	<i>Petalococonchus</i> ( <i>Dendropoma</i> )	<i>Dendropoma</i> ( <i>Petalococonchus</i> )
Pleistoceno		?	?	
Plioceno		<i>Petalococonchus</i>		
Mioceno tardio		<i>Petalococonchus</i>		
Mioceno médio		<i>Petalococonchus</i>		

#### 4.4. LICENÇA CIENTÍFICA PARA REBIO (RESERVA BIOLÓGICA) CONCEDIDA PELO IBAMA



Ministério do Meio Ambiente - MMA  
**Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA**  
 Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO

##### Autorização para atividades com finalidade científica

<b>Número:</b> 12228-1	<b>Data da Emissão:</b> 16/10/2007 17:37	<b>Data de Validade:</b> 15/10/2008
Dados do titular		
Registro no Ibama: 1598176	Nome: Marcelo de Oliveira Soares	CPF: 003.043.773-33
Título do Projeto: Bioconstrução e Paleocologia do Atol das Rocas, Atlântico Sul		
Nome da Instituição : UFRGS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL		CNPJ: 92.969.856/0001-98

##### Observações, ressalvas e condicionantes

1	A participação do(a) pesquisador(a) estrangeiro(a) nas atividades previstas nesta autorização depende de autorização expedida pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (CNPq/MCT);
2	Esta autorização não exige o titular e a sua equipe da necessidade de obter as anuências previstas em outros instrumentos legais, bem como do consentimento do responsável pela área, pública ou privada, onde será realizada a atividade.
3	Esta autorização não poderá ser utilizada para fins comerciais, industriais, esportivos ou para realização de atividades inerentes ao processo de licenciamento ambiental de empreendimentos. O material biológico coletado deverá ser utilizado exclusivamente para atividades didáticas ou científicas sem potencial de uso econômico.
4	A autorização para envio de material biológico não consignado ao exterior deverá ser requerida por meio do endereço eletrônico <a href="http://www.ibama.gov.br/cites">www.ibama.gov.br/cites</a> . Em caso de material consignado, consulte <a href="http://www.ibama.gov.br/sisbio">www.ibama.gov.br/sisbio</a> - menu Exportação.
5	O titular de licença ou autorização e os membros da sua equipe deverão optar por métodos de coleta e instrumentos de captura direcionados, sempre que possível, ao grupo taxonômico de interesse, evitando a morte ou dano significativo a outros grupos; e empregar esforço de coleta ou captura que não comprometa a viabilidade de populações do grupo taxonômico de interesse em condição in situ.

##### Outras ressalvas

1	Como não foram informadas, as quantidades de espécimes e amostras biológicas a serem coletadas serão autorizados de modo a preservar a sustentabilidade do Reserva biológica.
---	---

##### Equipe

#	Nome	Função	CPF	Doc. Identidade	Nacionalidade
1	Inês Xavier Martins	Coletora	390.420.223-53	19024/5-D CRBio-CE	
2	HELENA MATTHEWS CASCON	Coletora	119.752.703-63	568125 SSP-CE	

##### Atividades X Táxons

#	Atividade	Táxons
1	Captura de animais silvestres in situ	Scleractinia
2	Coleta/transporte de amostras biológicas in situ	Scleractinia, Rhodophyta

##### Destino do material biológico coletado

#	Nome local destino	Tipo Destino
1	UFRGS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL	Laboratório de Conodontes e Foraminíferos, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
2	UFRGS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL	Laboratório de Conodontes e Foraminíferos, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia

Este documento (Autorização para atividades com finalidade científica) foi expedido com base na Instrução Normativa Ibama nº154/2007. . . Através do código de autenticação abaixo, qualquer cidadão poderá verificar a autenticidade ou regularidade deste documento, por meio da página do Ibama/Sisbio na internet ([www.ibama.gov.br/sisbio](http://www.ibama.gov.br/sisbio)).

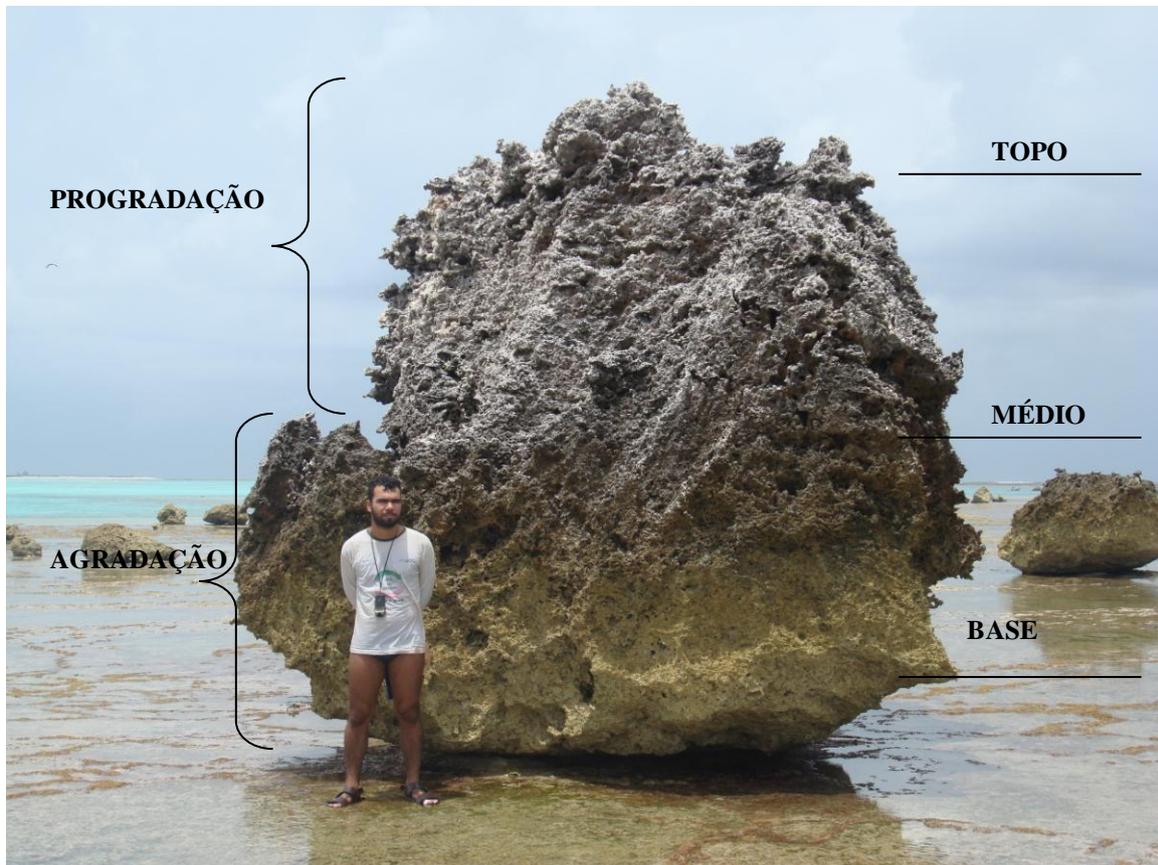
**Código de autenticação: 69728736**



Página 1/2

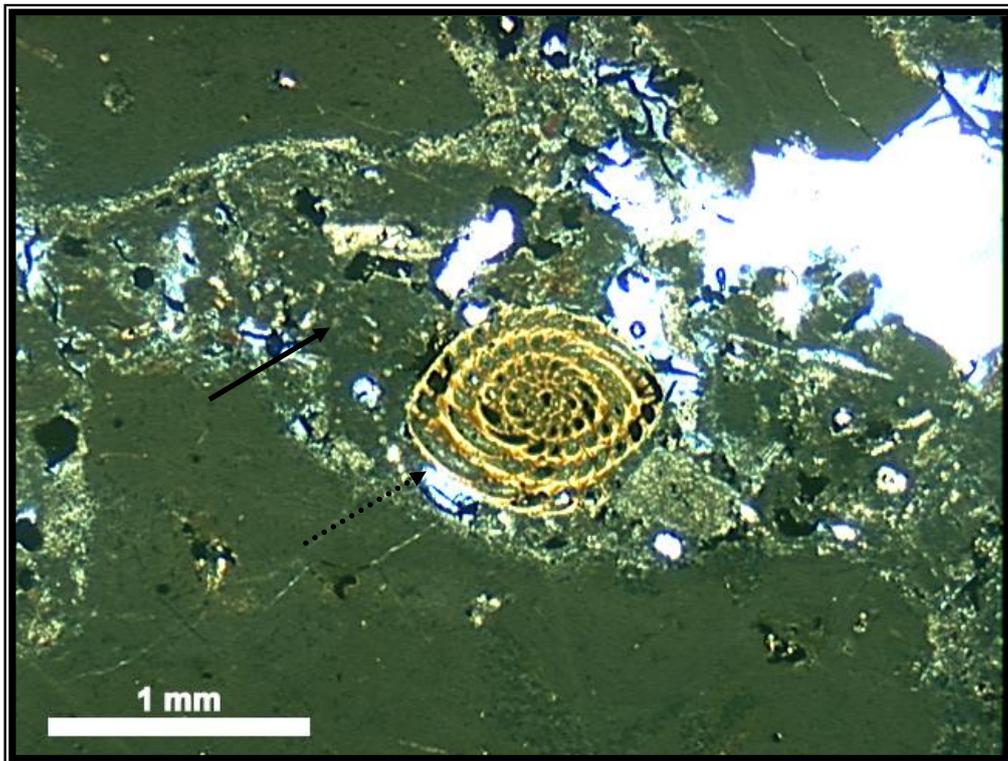


#### 4.5. ANÁLISE DAS LÂMINAS PETROGRÁFICAS

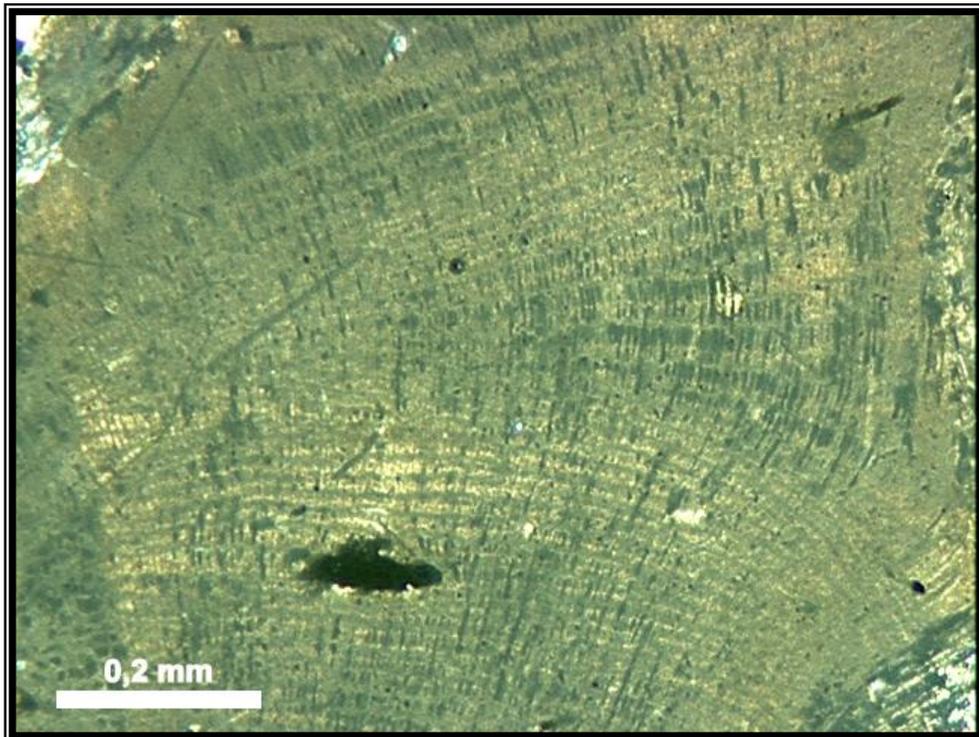


**FOTO 01-** Coletas de amostras da Pedra do Garapirá (a rocha recifal de maior dimensão em termos de altura e largura das “Rocas”). Zonas amostradas do paleorecife indicadas como base, médio e topo.

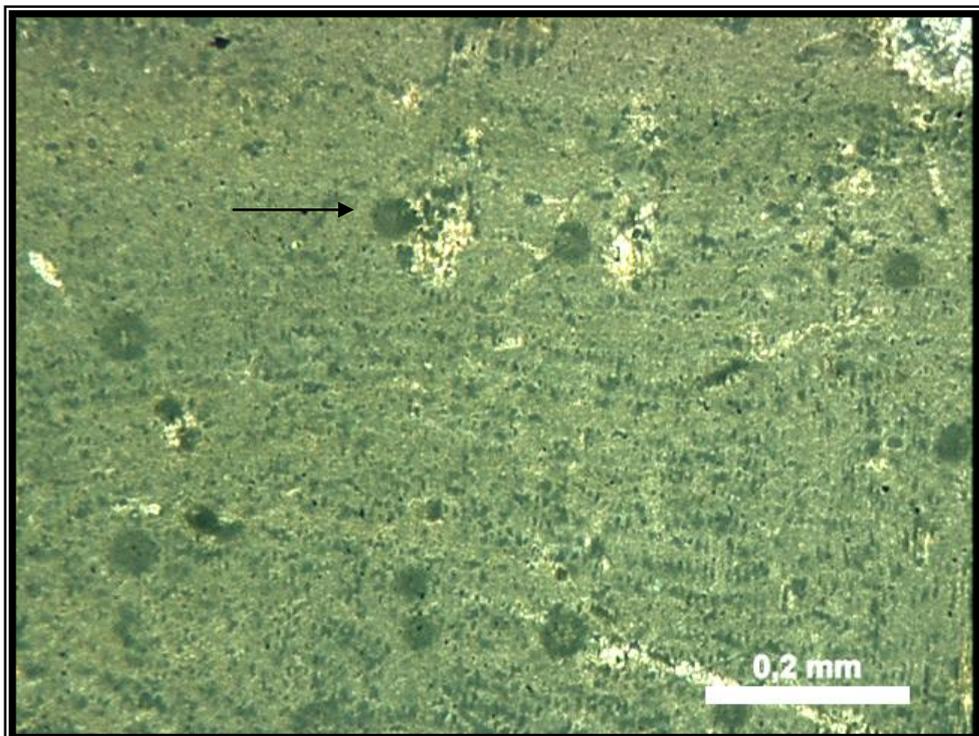
#### 4.5.1. AMOSTRAS DA BASE DO PALEORECIFE



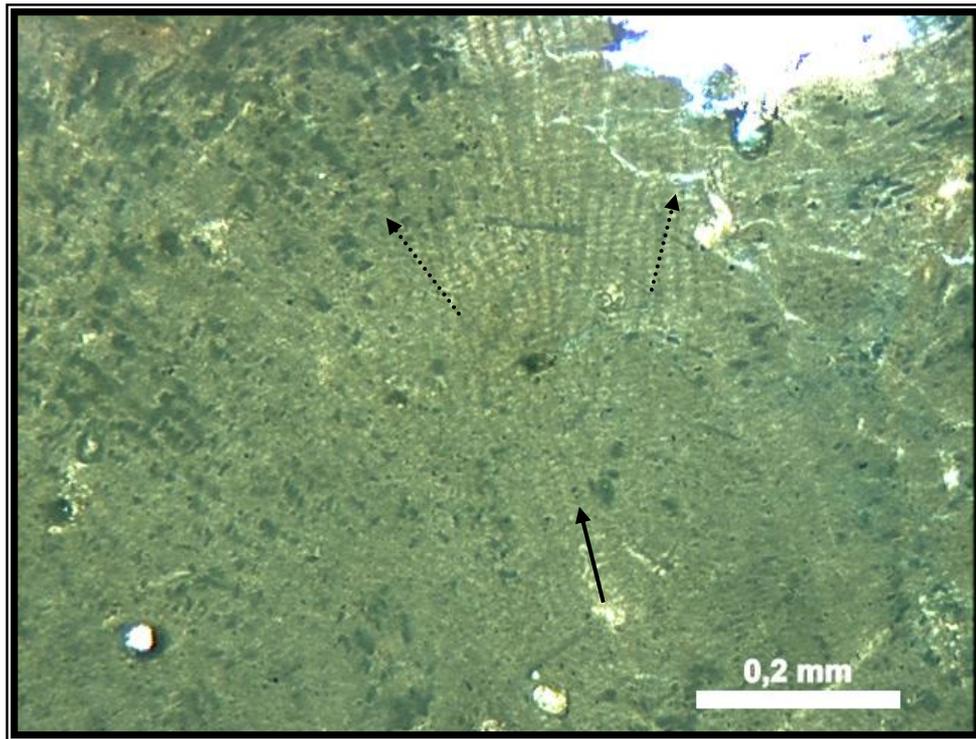
**FOTO 02-** Testa de foraminífero bentônico *Amphistegina lessoni* em cimento peloidal. Observar que os pelóides (apontado pela seta contínua) e o foraminífero (apontado pela seta pontilhada) encontram-se preenchendo parcialmente uma cavidade de crescimento (poro agigantado) de alga vermelha coralina incrustante que forma o arcabouço primário recifal.



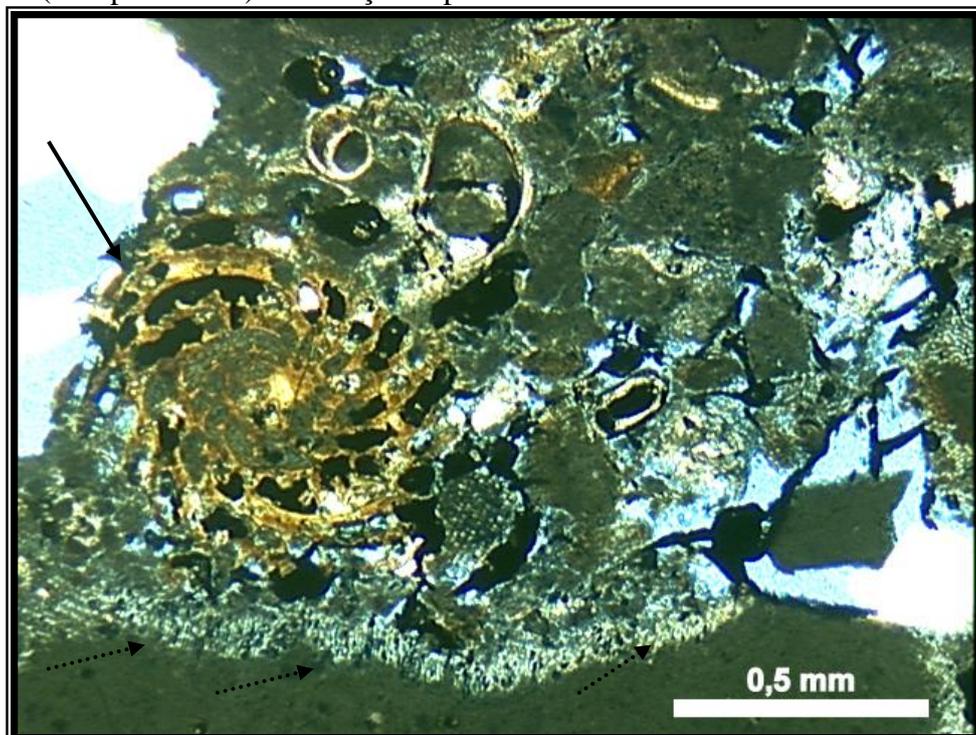
**FOTO 03-** Biolito de algas vermelhas coralinas incrustantes parcialmente micritizadas. A Micrita de calcita-magnésiana é responsável pela extensiva micritização dos talos destas algas.



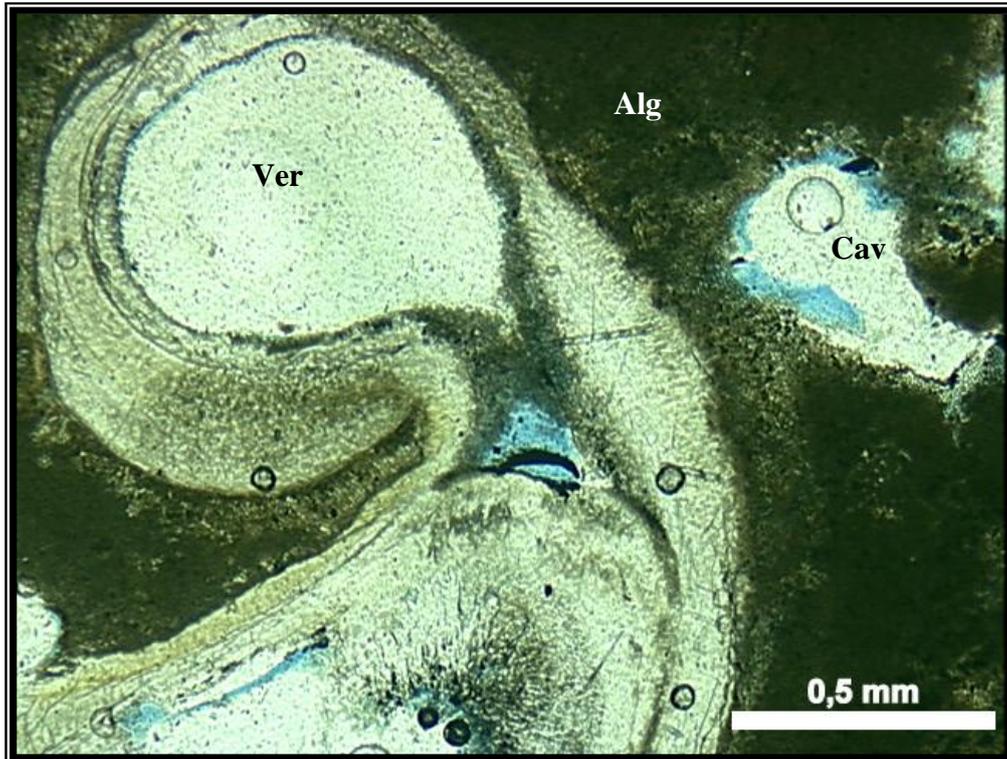
**FOTO 04-** Estrutura celular característica e talo da alga vermelha incrustante e bioconstrutora predominante *Porolython pachydermum*. Observa-se a presença de esporângios/ conceptáculos (apontado pela seta) relacionados à atividade reprodutiva e o talo pseudoparenquimatoso.



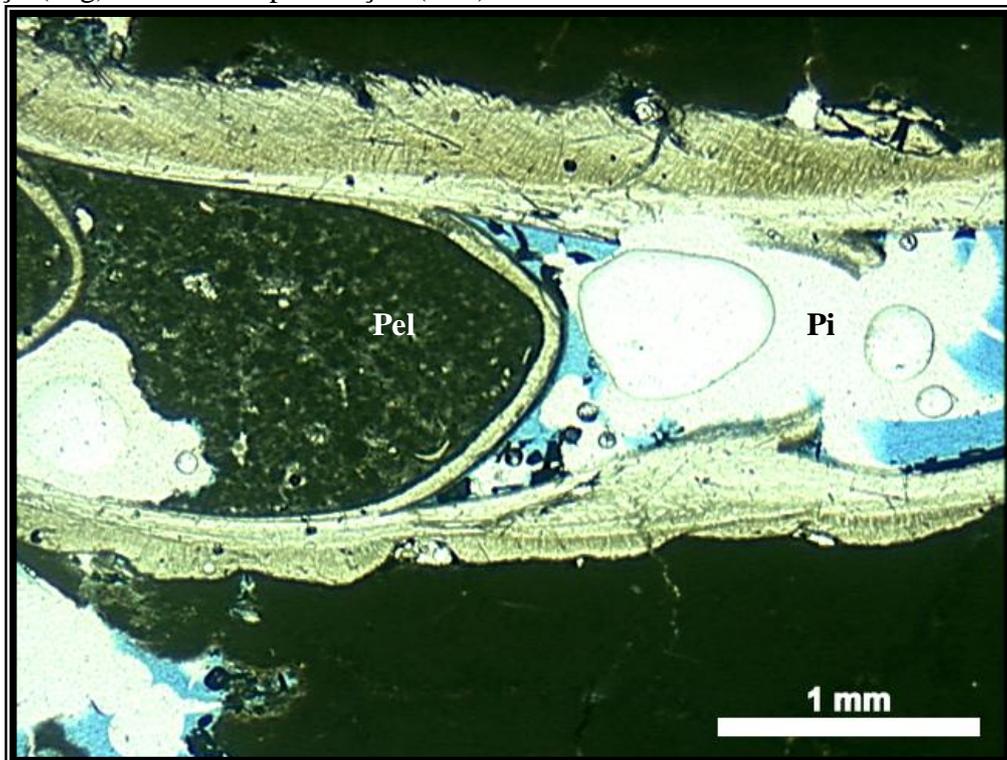
**FOTO 05-** Seção longitudinal do crescimento colunar de *Lythophyllum* sp. mostrando um talo monomérico com uma área central (seta contínua) do qual derivam filamentos coaxiais (seta pontilhada) em direções opostas.



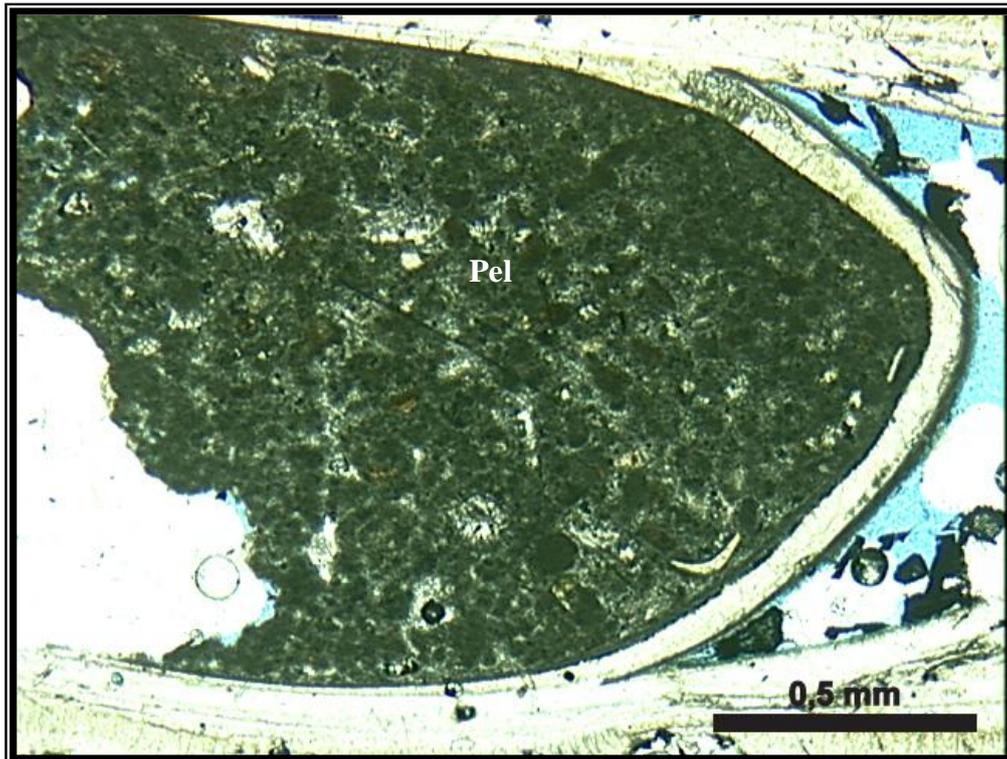
**FOTO 06-** Cavidade da estrutura recifal mostrando pelóides, principalmente de algas vermelhas, e foraminífero bentônico (seta contínua) com significativo nível de corrosão como assinatura tafonômica. Os pelóides são cimentados por franjas isópacas de cristais prismáticos (seta pontilhada).



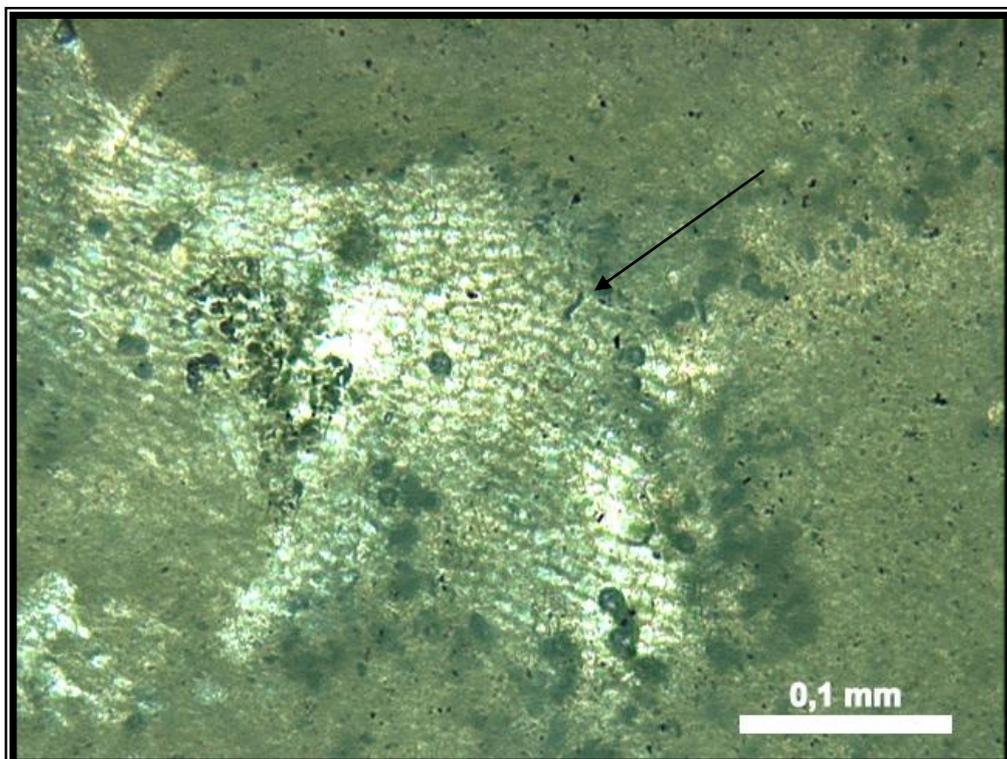
**FOTO 07-** Concha de gastrópode vermetídeo com porosidade interna não preenchida (Ver). Presença da alga *Porolython pachydermum* atuando como competidor pelo espaço (Alg) e cavidade/ perfuração (Cav).



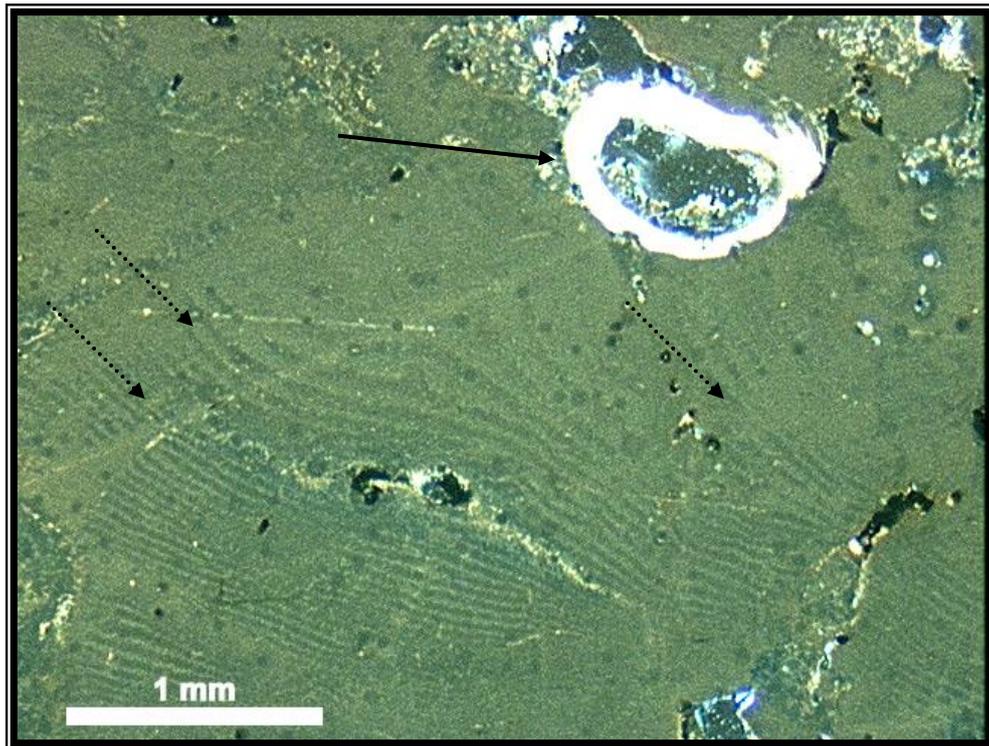
**FOTO 08-** Presença de tubos (icnofósseis) de moluscos com porosidade interna não preenchida (Pi) ou preenchida por pelóides (Pel) cimentados por aragonita.



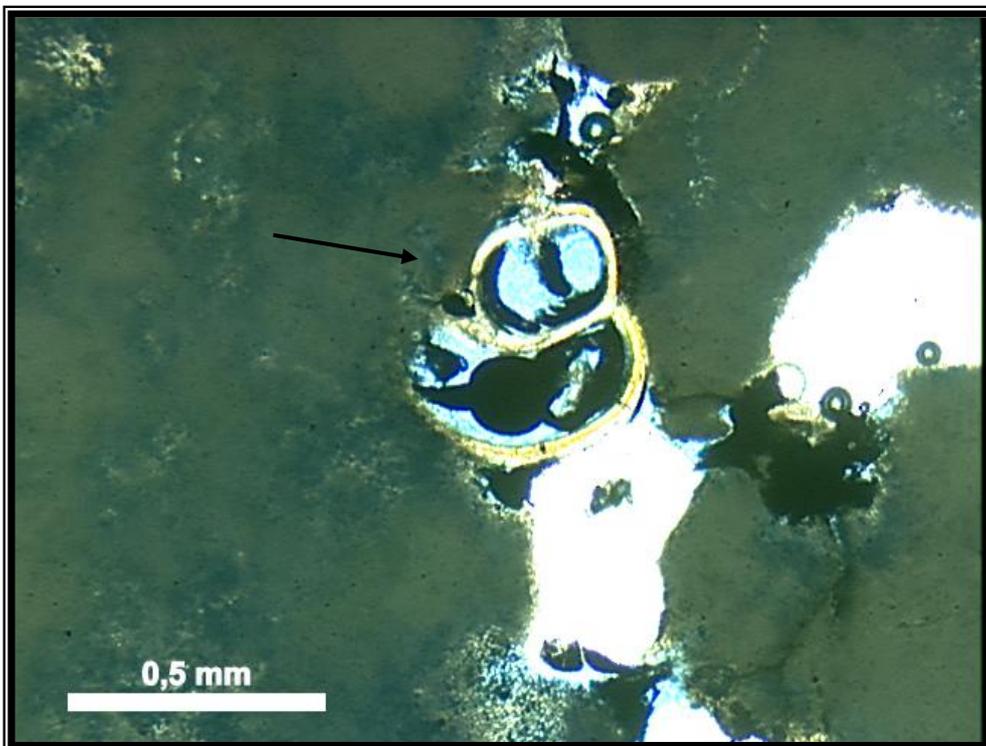
**FOTO 09-** Porosidade interna de concha preenchida principalmente por pelóides (Pel) resultantes de quebra mecânica e bioerosão em algas vermelhas incrustantes e bioconstrutoras.



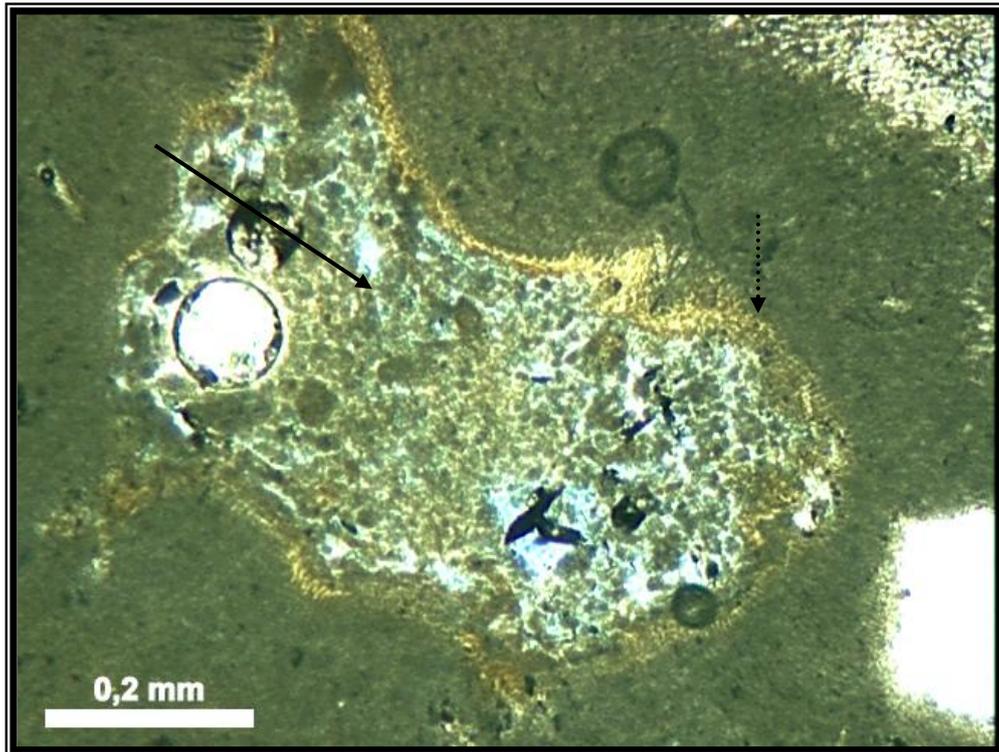
**FOTO 10-** Detalhe do talo crustoso de *Porolython* com arranjo celular característico (apontado pela seta contínua). Freqüente fusão das células com filamentos contíguos.



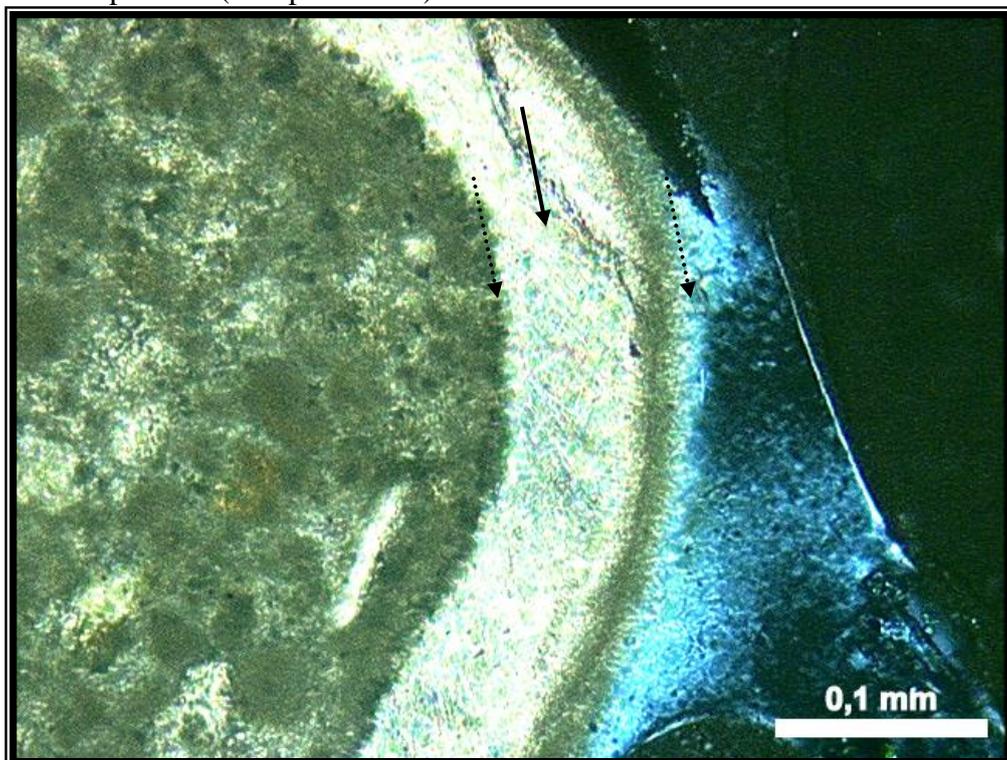
**FOTO 11-** Encrustações típicas de algas vermelhas coralinas da Fácies Bindstone Coralíneo (apontadas por setas pontilhadas). Observa-se na construção carbonática a presença de concha de vermetídeo com porosidade interna pobremente preenchida (seta contínua). Estes gastrópodes constituem a estrutura recifal secundária com alto potencial bioconstrutivo.



**FOTO 12-** Presença de concha do gastrópode (*Hypponix* cf. *antiquatus*) preservado em cavidade irregular (seta contínua) gerada pelo crescimento da alga vermelha (arcabouço principal). Essas cavidades eram aparentemente usadas pelos gastrópodes como área de forrageamento, e após a morte, suas conchas foram incorporadas através de processos bioestratinômicos pela estrutura incrustante de crescimento da alga coralina.



**FOTO 13-** Cavidade de alga vermelha preenchida extensivamente por pelóides derivados de *Porolython*, *Lythophyllum* e outras algas (seta contínua). Detalhe das células sub-epiteliais (seta pontilhada).

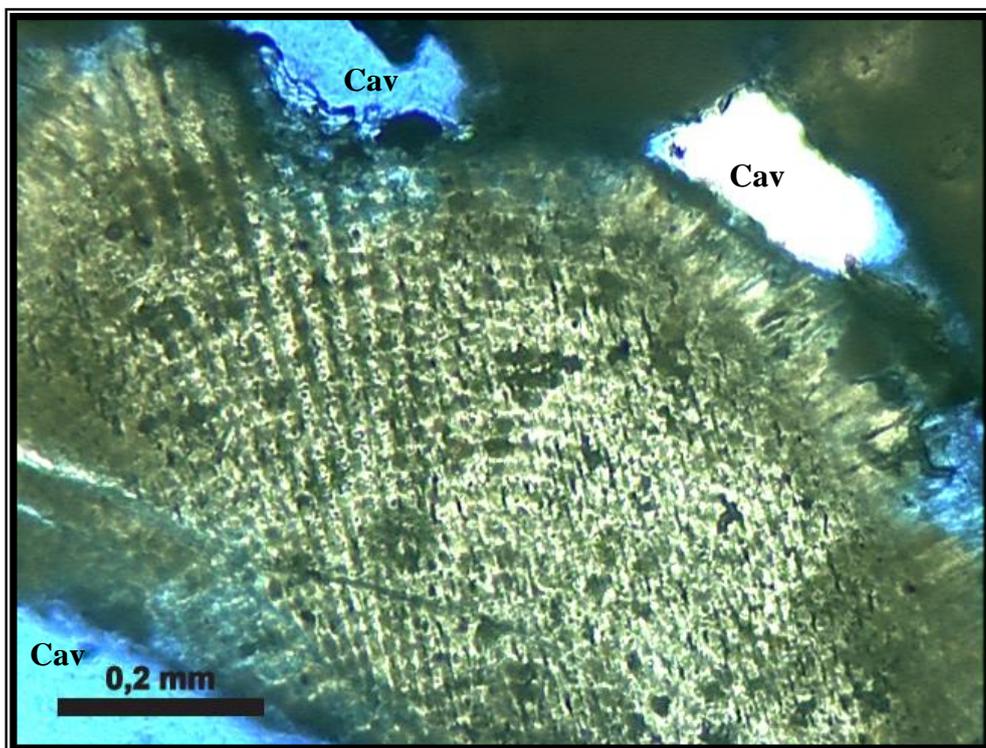


**FOTO 14-** Detalhe das zonas de cimentação de calcita (seta contínua) e aragonita (seta pontilhada) nas porções intraesqueletal e extraesqueletal da concha de vermetídeo. Observa-se uma grande quantidade de pelóides na porção interna preenchendo a porosidade.

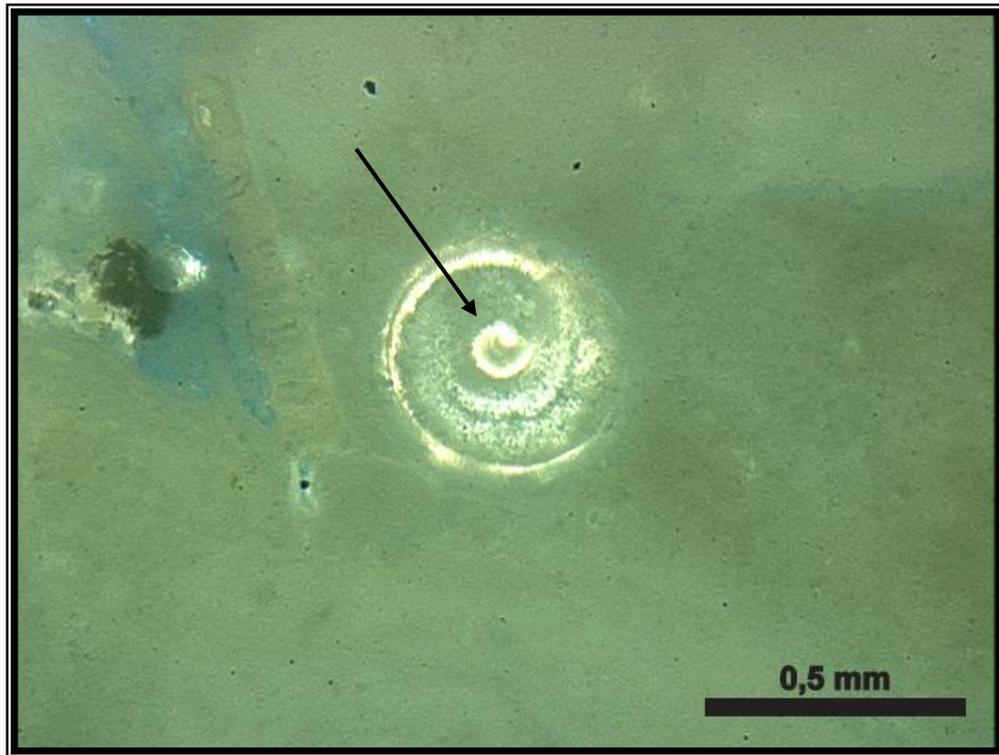


**FOTO 15-** Detalhe das franjas de aragonitas aciculares na porção extraesquelética (seta de cor preta) e intraesquelética (seta de cor branca). Na porção mediana temos a calcita magnésiana. A cimentação ocorre por franjas isópacas de cristais prismáticos indicadores de processos diagenéticos iniciais em zona freática marinha com poros preenchidos e saturados por água.

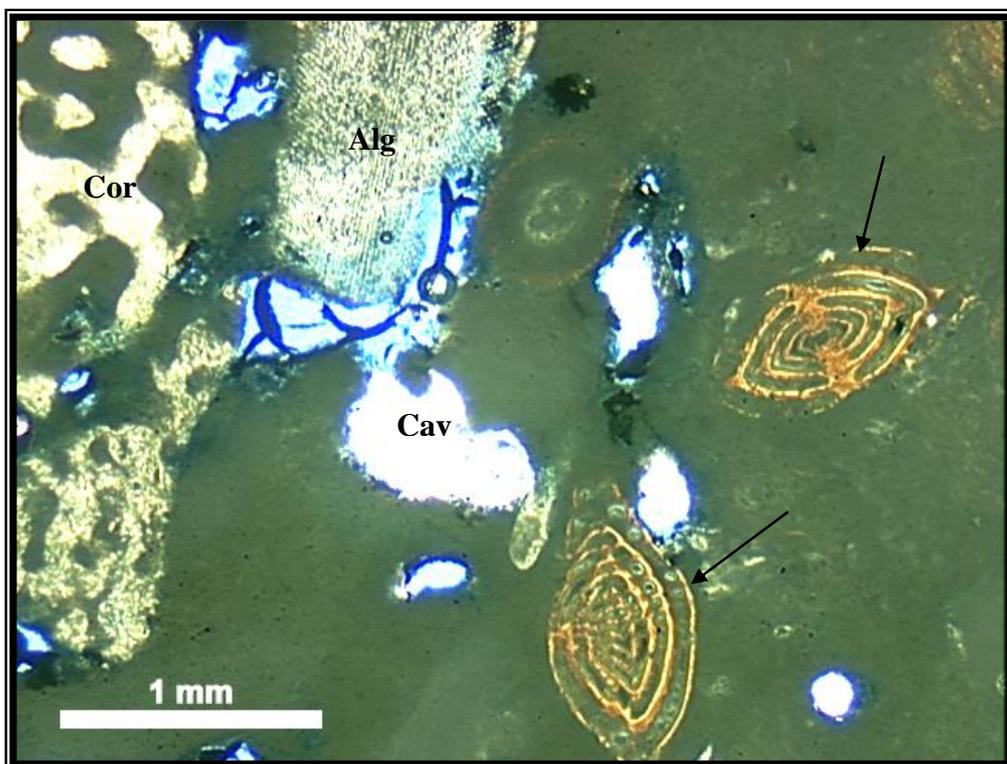
#### 4.5.2. AMOSTRAS EM UMA PORÇÃO MEDIANA DO PALEORECIFE



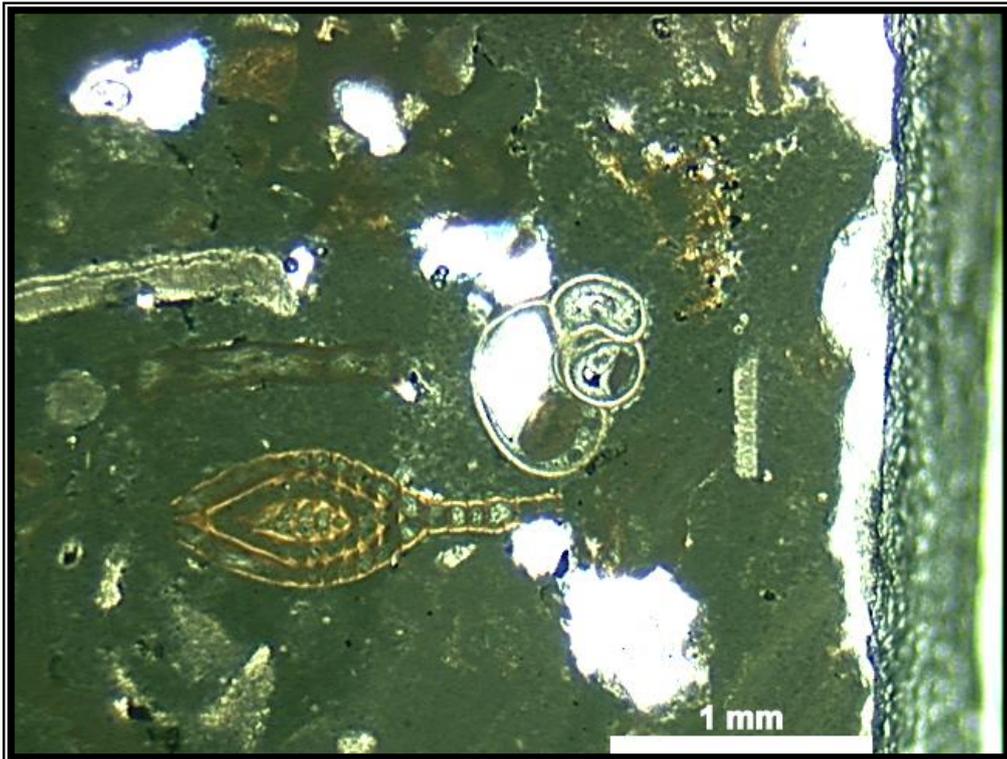
**FOTO 16-** Detalhe de resto do talo da alga vermelha *Porolython pachydermum*. Observa-se a presença de cavidades (Cav) ao redor do material fossilífero resultante provavelmente de atividade berosiva.



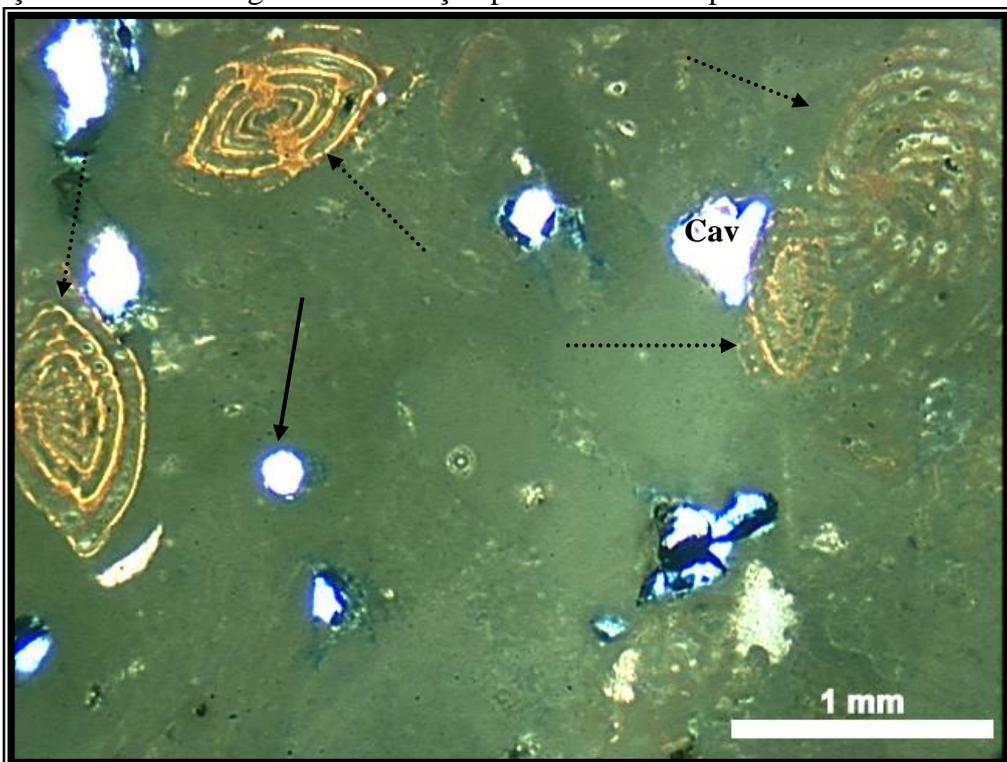
**FOTO 17-** Concha de gastrópode trapeado pela extensiva cobertura de alga vermelha. Observa-se a columela (indicada pela seta contínua) e as espiras típicas.



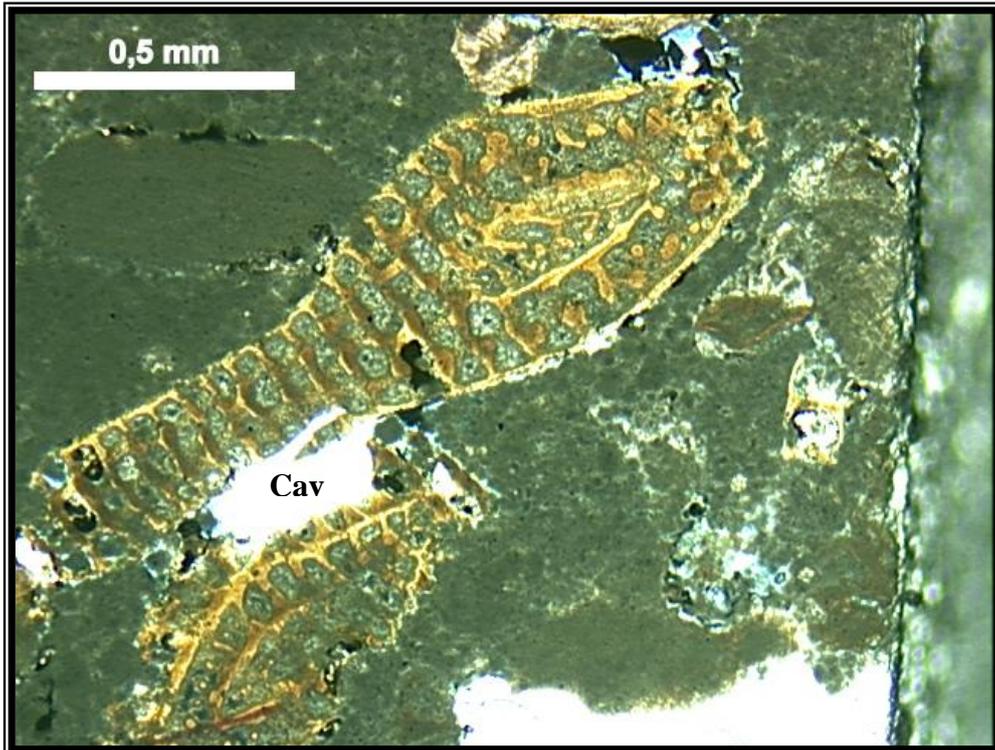
**FOTO 18-** Assembléia fossilífera politípica formada por corais escleractíneos (Co), largas testas de foraminíferos bentônicos (indicados pelas setas), alga vermelha coralina (Alg) e cavidade / perfuração por bioerosão (Cav).



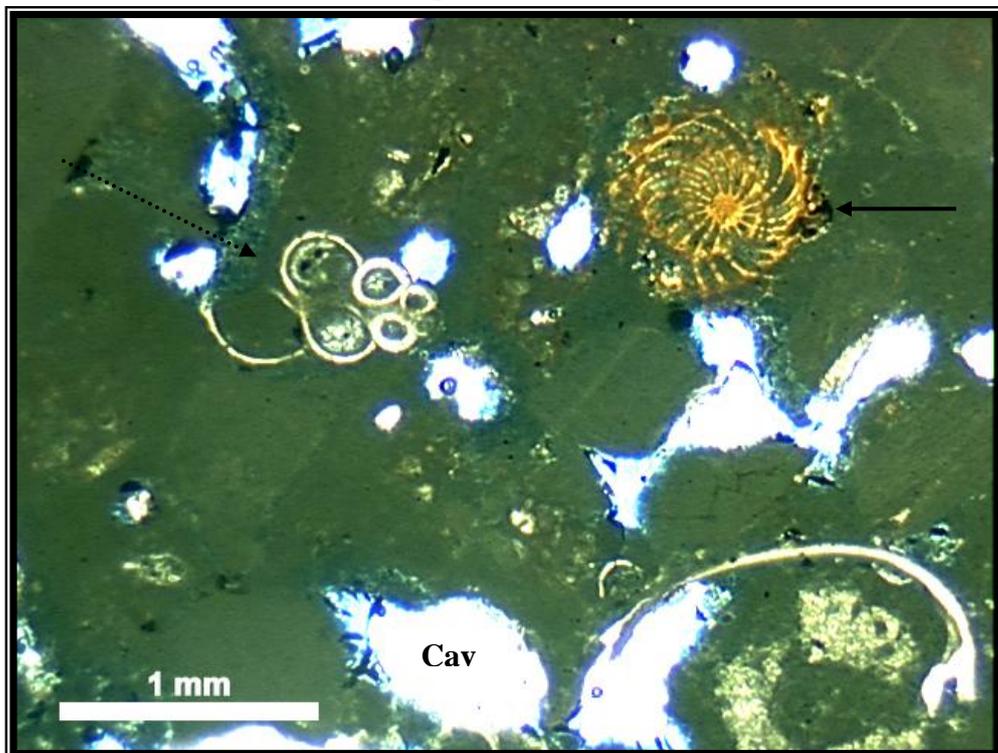
**FOTO 19-** Grãos aloquímicos (material bioclástico) circundados por material micrítico. A interpretação do ambiente deposicional sugere uma depressão preenchida sob condições de baixa energia ou cimentação por carbonato criptocristalino.



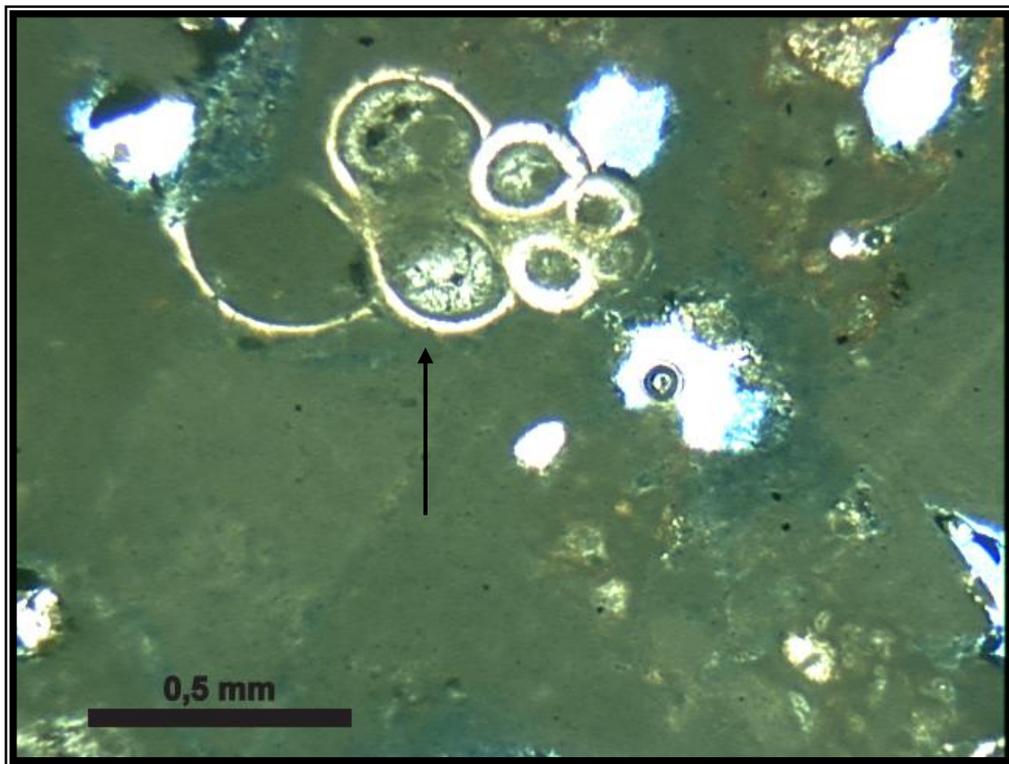
**FOTO 20-** Bioacumulação microfossilífera de foraminíferos bentônicos (setas pontilhadas). Presença de cavidades/ perfuração (Cav) e provável atividade bioerosiva da esponja *Cliona* sp. (seta contínua). Observar arcabouço primário de algas coralinas.



**FOTO 21-** Assinatura tafonômica de corrosão em foraminífero bentônico. A corrosão pode ser devida a processos de retrabalhamento sedimentar na Zona Tafonomicamente Ativa. Uma segunda hipótese seria a percolação de águas corrosivas pela cavidade (Cav) na matriz recifal em um evento pós-bioestratinômico.

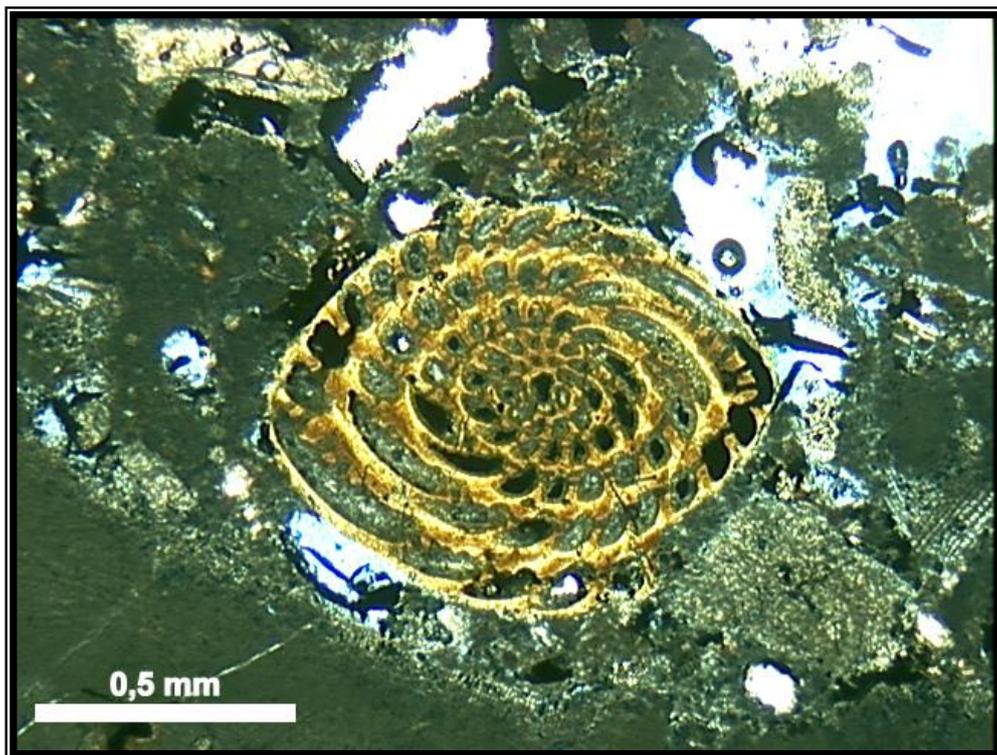


**FOTO 22-** Acumulação de grandes testas de foraminíferos bentônicos (seta contínua) e planctônicos (seta pontilhada). Grande quantidade de cavidades na estrutura primária recifal algálica (Facies Coralline Framestone).

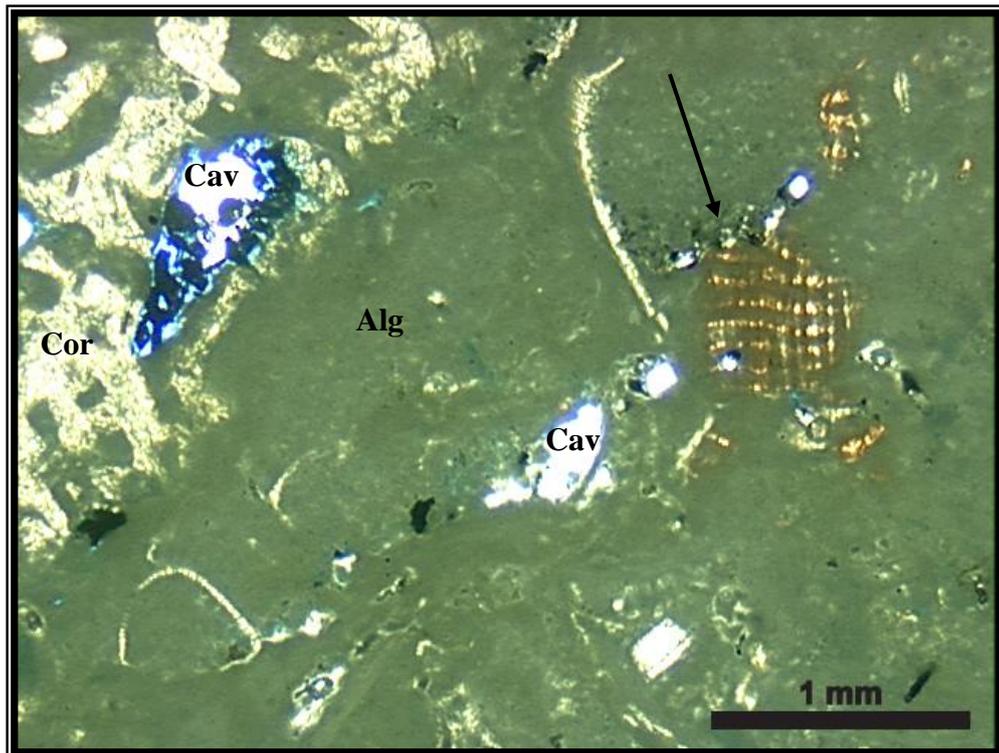


**FOTO 23-** Detalhe de foraminífero planctônico com as câmaras típicas. Possível indicador de águas mais calmas e de maior profundidade no paleoambiente há cerca de 2000 anos o que corrobora a hipótese de uma paleolaguna.

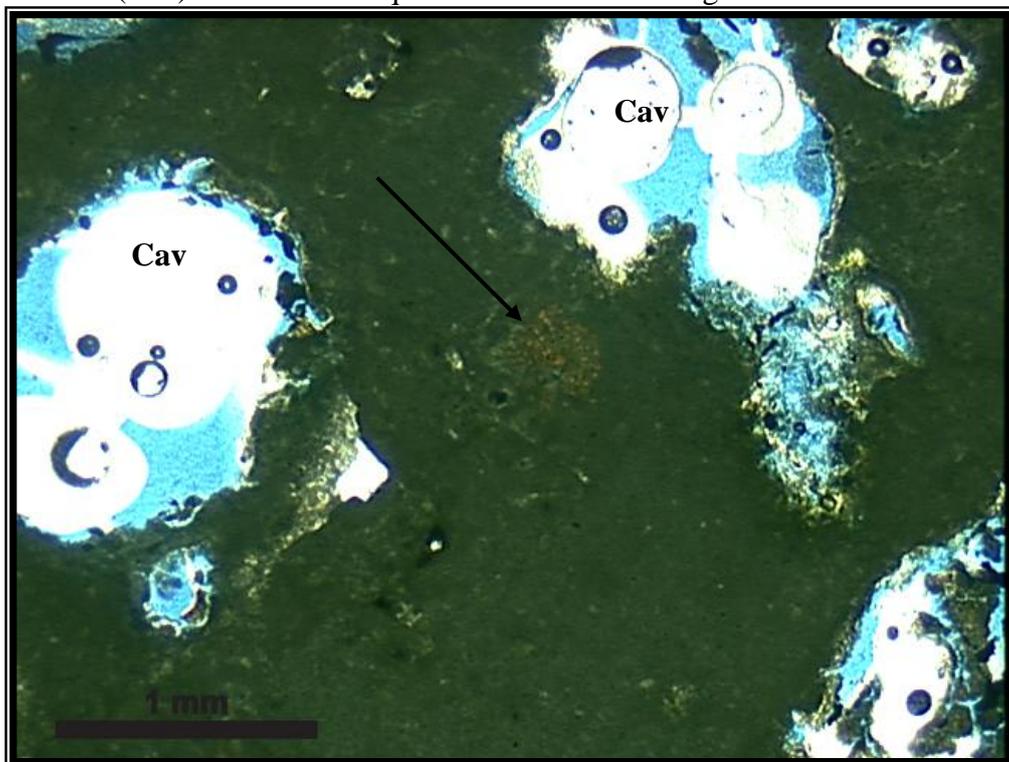
### 4.5.3. AMOSTRAS DO TOPO DO PALEORECIFE



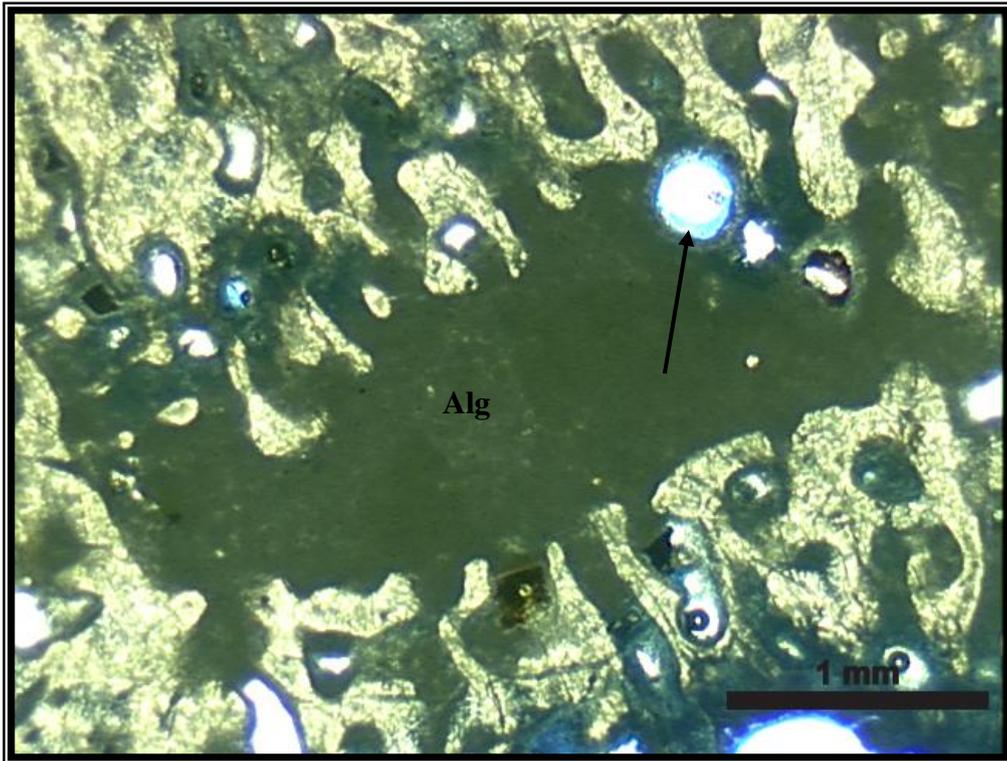
**FOTO 24-** Foraminífero *Amphistegina lessoni*. Indicador de paleosalinidade ( $>34\%$ ), paleotemperatura ( $25-26^{\circ}\text{C}$ ), paleoprodutividade (5-20m) e substrato (planície arenosa de fundo e recifes de coral/ algálico). As assinaturas tafonômicas sugerem ser uma amostra autóctone/paraautóctone o que permite a reconstrução paleoambiental proposta.



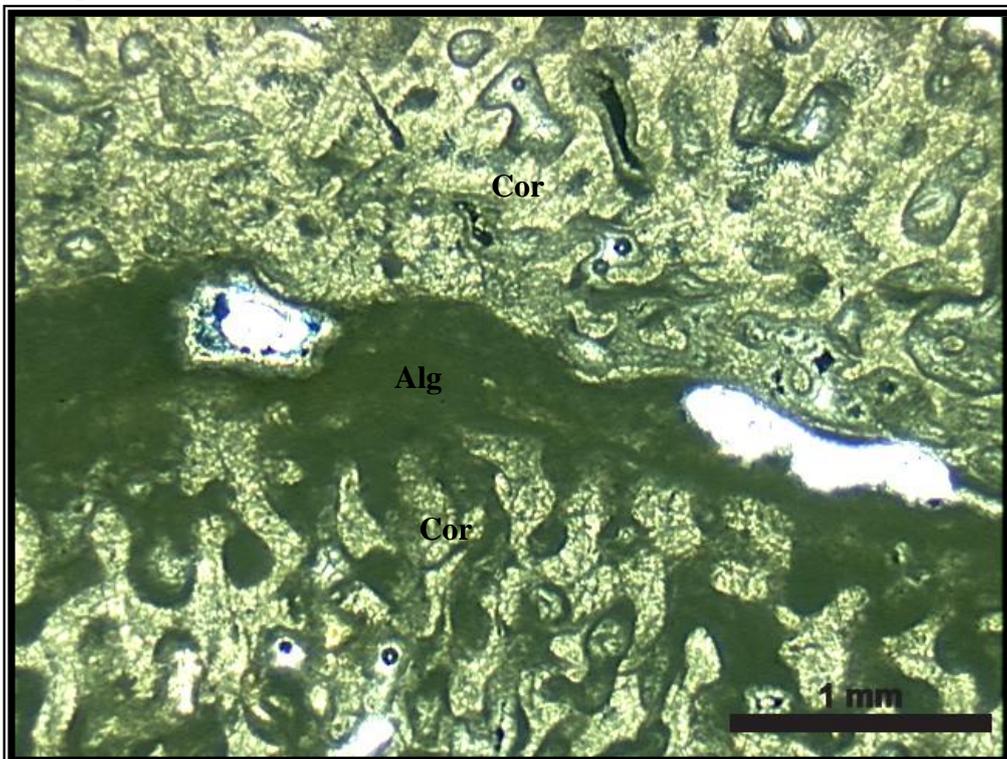
**FOTO 25-** Presença de briozoários (seta contínua), corais (Cor) e algas (Alg). Presença de cavidades (Cav) na estrutura esquelética do coral e da alga.



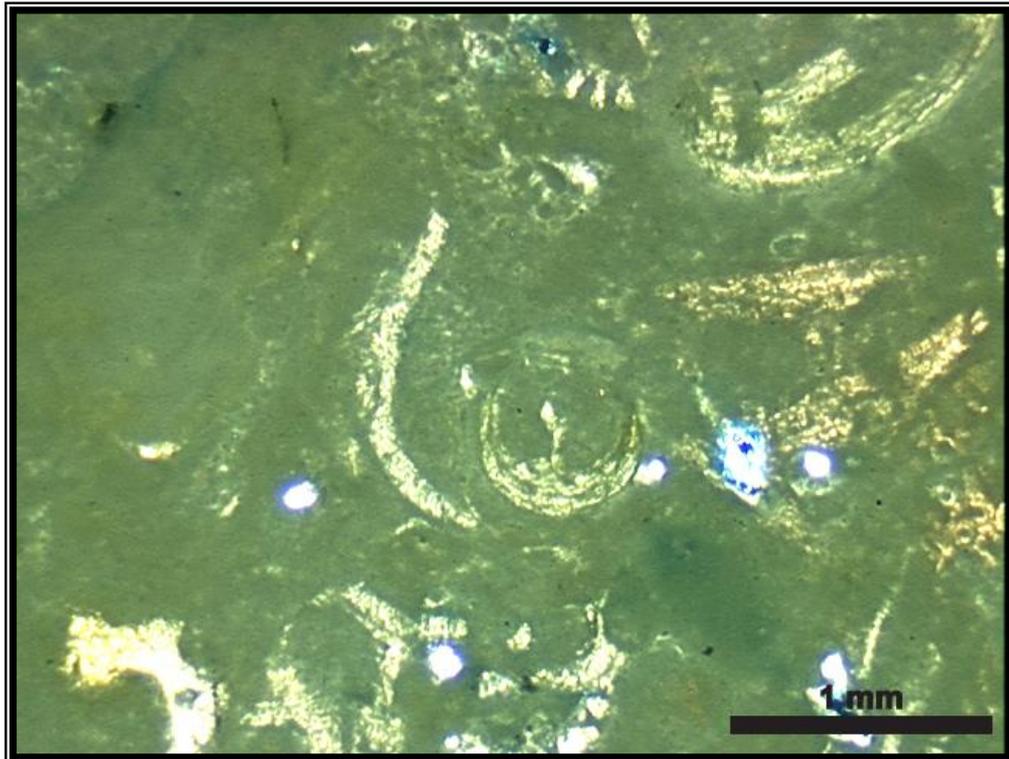
**FOTO 26-** Foraminífero bentônico (indicado pela seta) e arcabouço principal de algas coralinas incrustantes com extensa micritização. Observar grandes cavidades (Cav) com porosidade interna não preenchida.



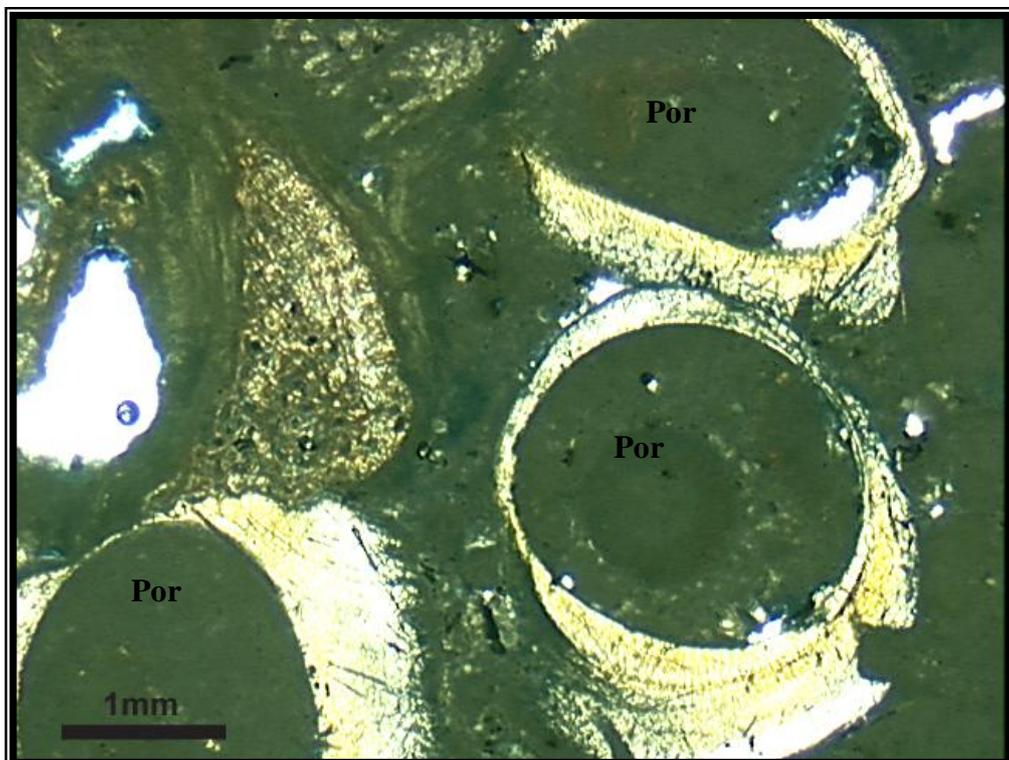
**FOTO 27-** Estrutura de coral escleractíneo com crescimento de algas coralinas (Alg) incrustantes nos orifícios desta estrutura. Presença de bioerosão pela esponja *Cliona* sp. (apontada pela seta).



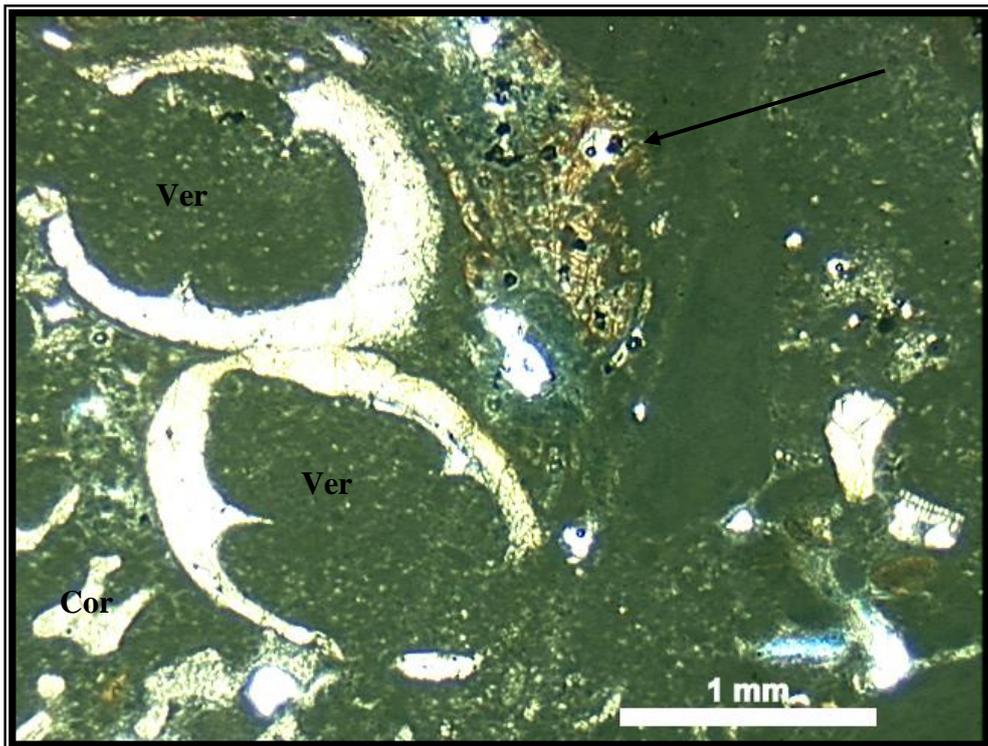
**FOTO 28-** Evidência de competição por espaço de algas coralinas vermelhas e corais escleractíneos no processo bioconstrutivo.



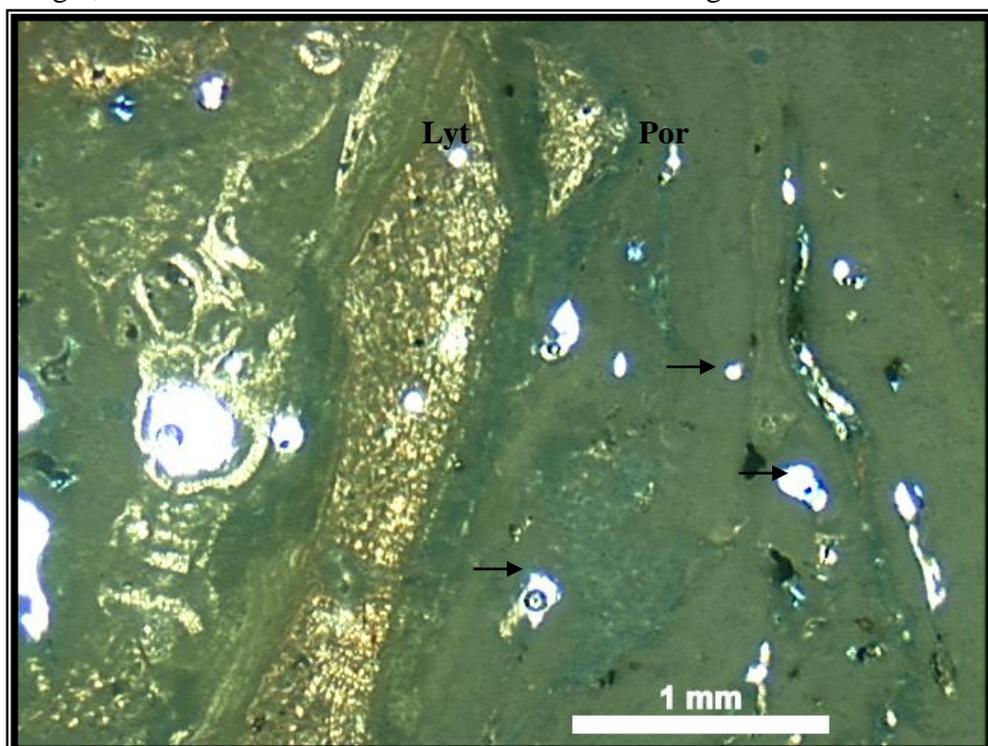
**FOTO 29-** Restos de conchas de moluscos desarticuladas e fragmentadas evidenciando provável alta energia do paleorecife a barlavento há cerca de 3100 anos atrás.



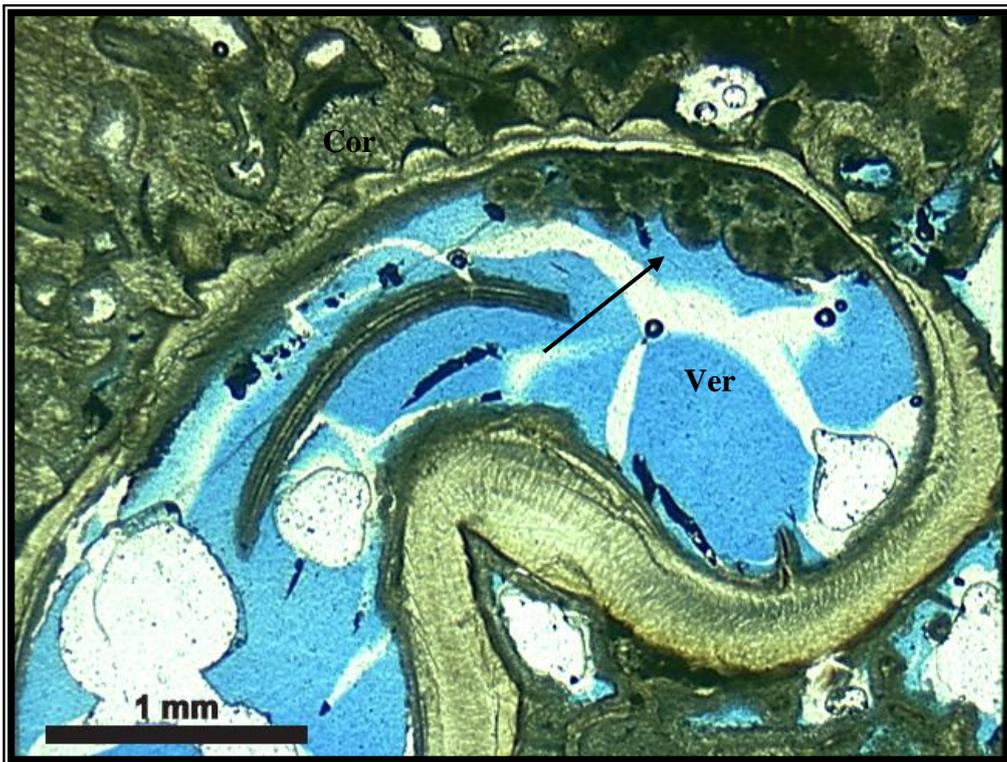
**FOTO 30-** Conchas de gastrópodes vermetídeos com alto preenchimento da porosidade interna (Por).



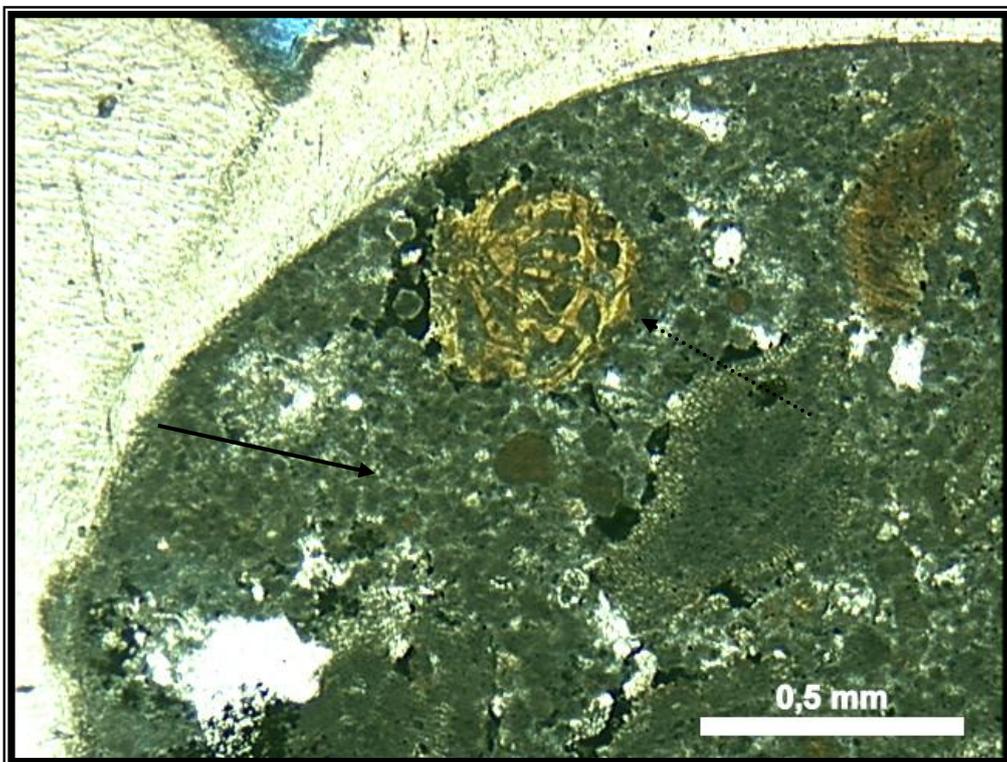
**FOTO 31-** Corais (Cor), moluscos vermetídeos com material peloidal algálico na estrutura interna (Ver) e alga coralina *Porolython pachydermum* (indicado pela seta). Os vermetídeos são encontrados comumente crescendo sobre as algas vermelhas evidenciando a sucessão ecológica sendo uma assinatura tafonômica de paleorecifes de alta energia, baixa turbidez e ausência de influência de terrígenos/siliciclásticos.



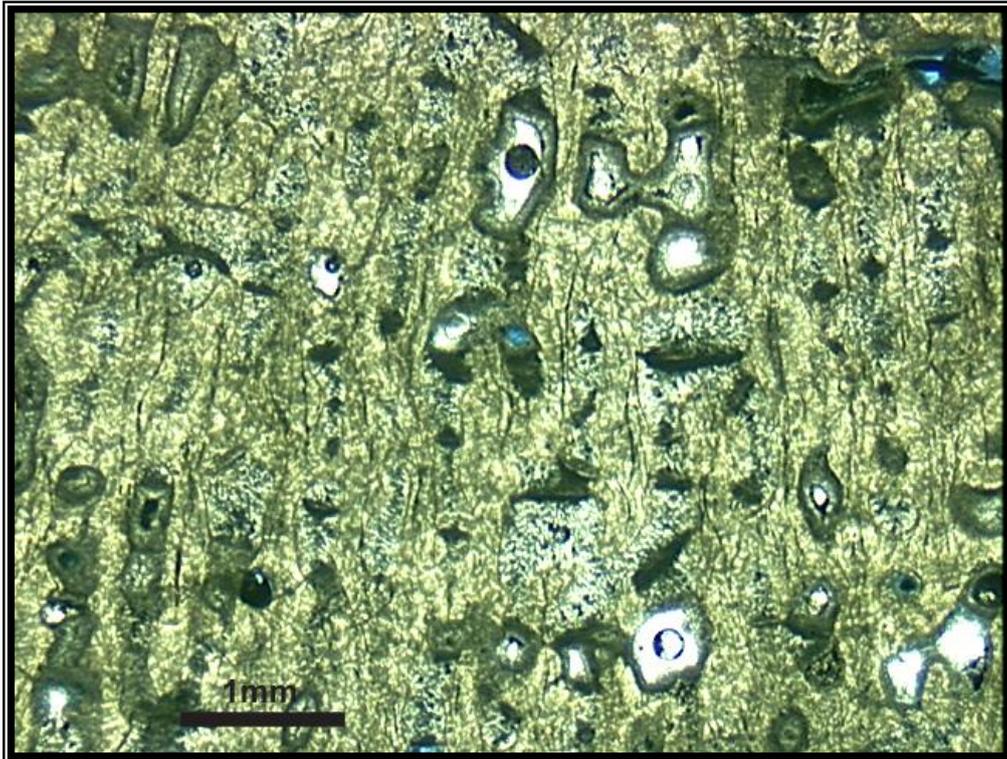
**FOTO 32-** Algas coralinas incrustantes *Porolython* (Por) e *Lythophyllum* (Lyt). Tais algas são predominantes na bioconstrução recifal. Presença de cavidades/ perfurações (indicadas pelas setas).



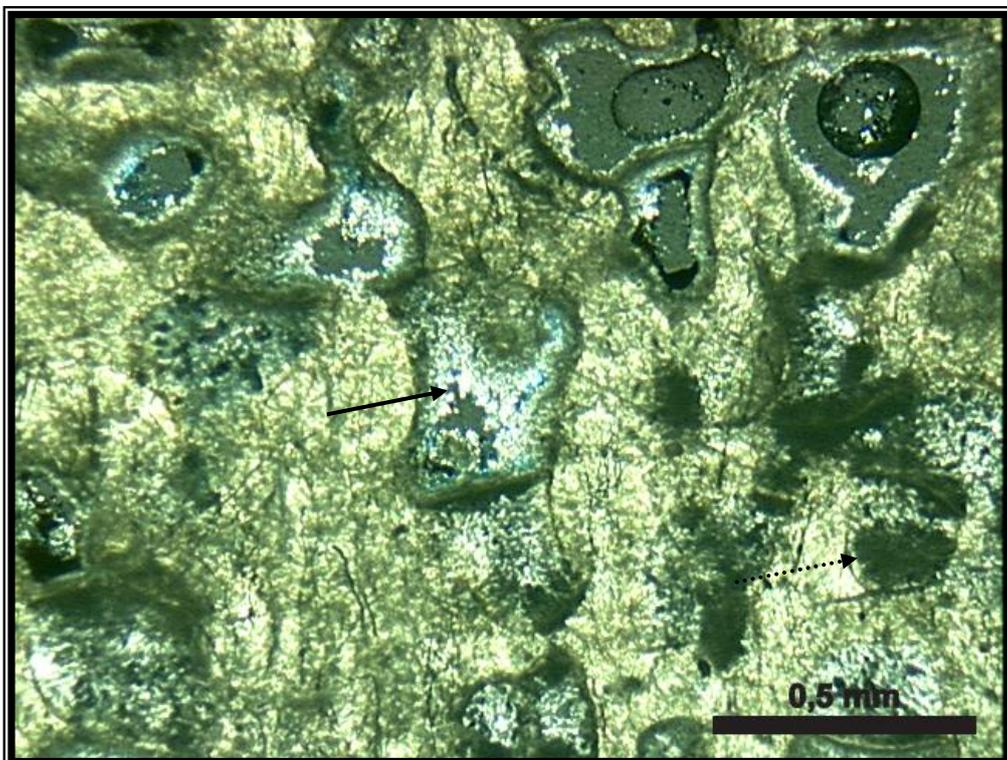
**FOTO 33-** Tubo de molusco vermetídeo com baixo preenchimento da porosidade interna (Ver). Observa-se na estrutura interna material peloidal com micrita (seta). Na seção extraesquelética observa-se amplo crescimento de corais escleractíneos (Cor) na competição por espaço.



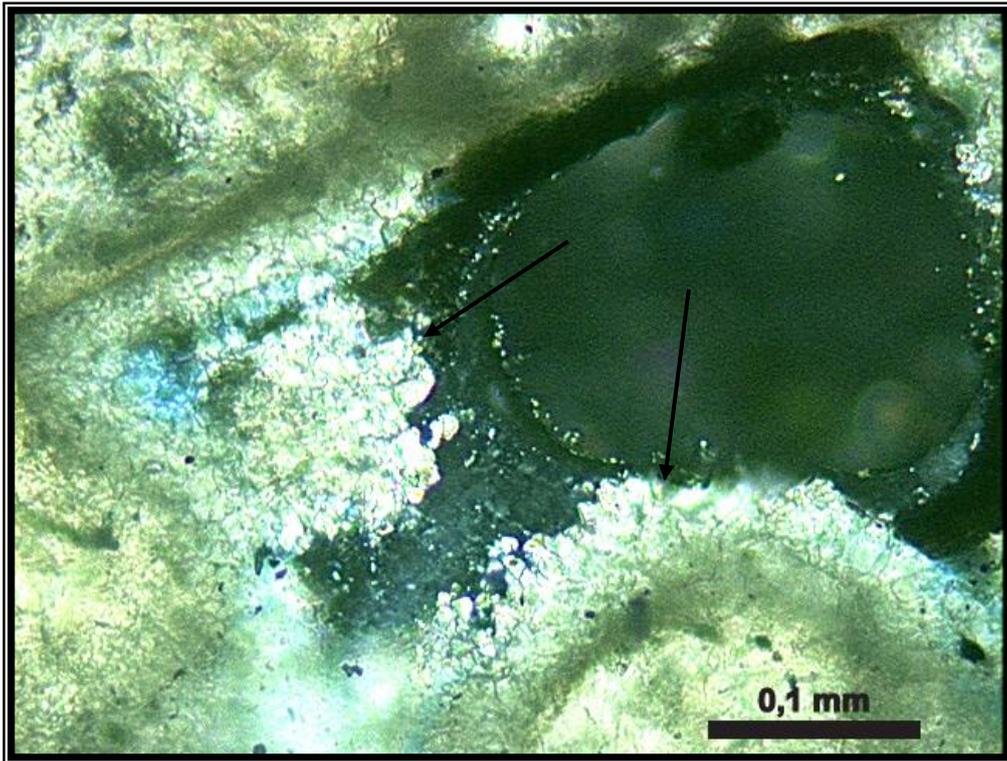
**FOTO 34-** Detalhe do preenchimento da porosidade interna da concha de um molusco vermetídeo evidenciando a presença de material peloidal algálico e foraminífero com sinas de retrabalhamento sedimentar no processo bioestratinômico.



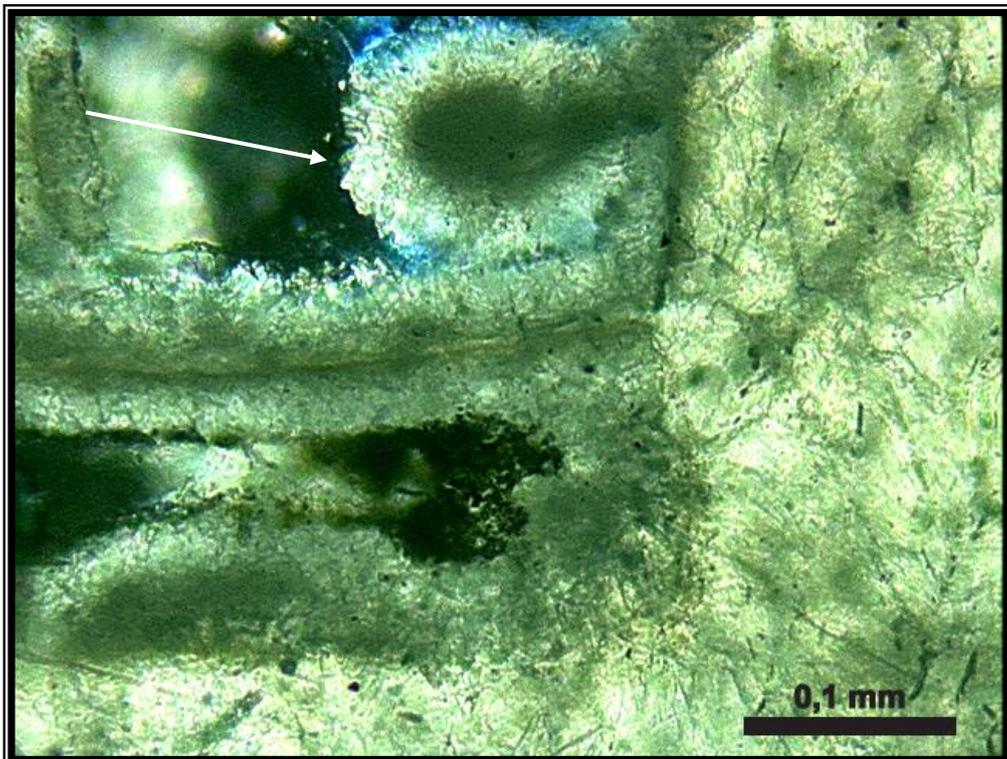
**FOTO 35-** Orifícios da estrutura interna dos corais escleractíneos preenchidos por micrita e/ou cimento pseudo-peloidal.



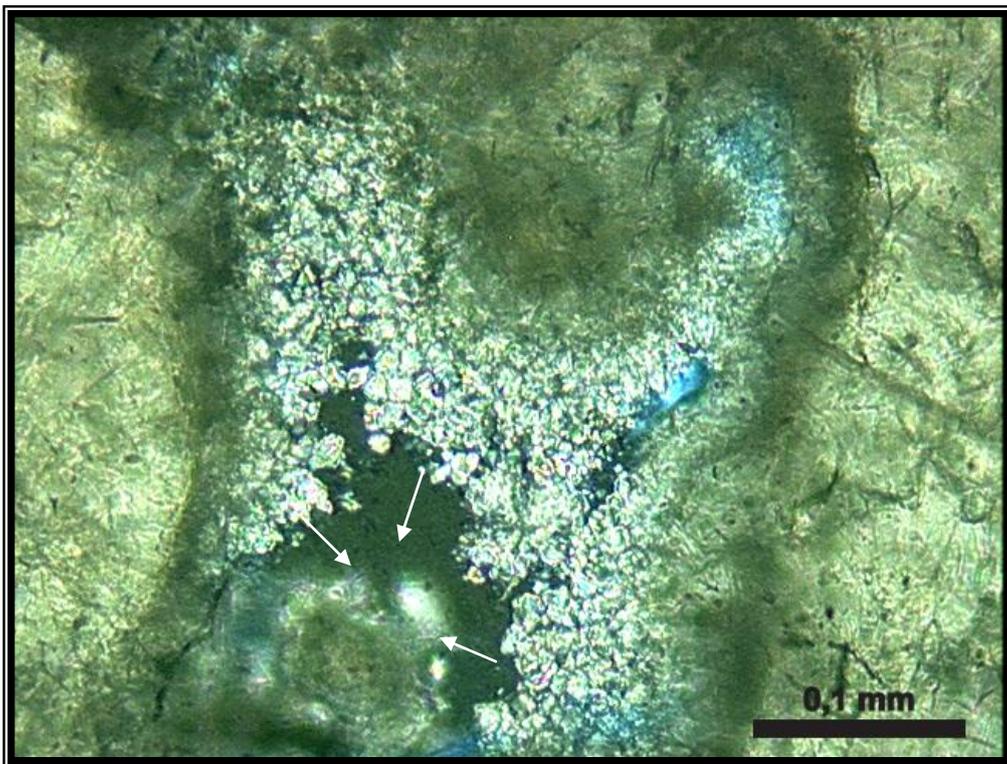
**FOTO 36-** Detalhe do crescimento dos cristais (seta contínua) e do material de preenchimento pseudo-peloidal (seta pontilhada) preenchendo (*pore-filling*) os orifícios do material esquelético carbonático do coral.



**FOTO 37-** Franja isópaca de cristais prismáticos circundando (*pore-lining*) os orifícios da estrutura interna dos corais escleractíneos.

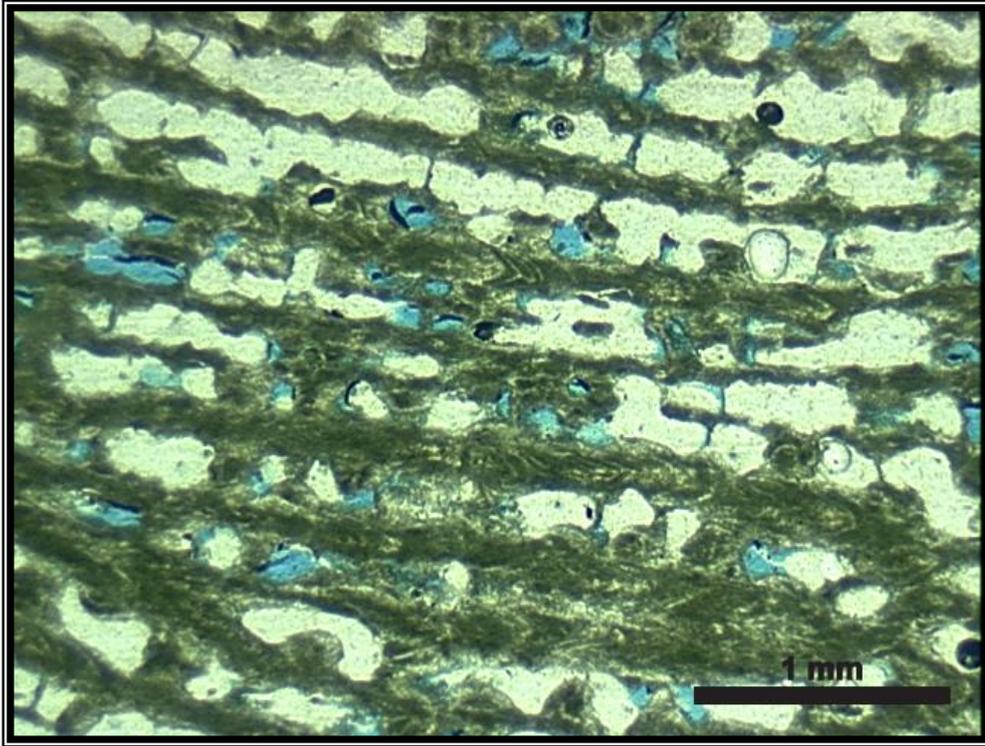


**FOTO 38-** *Pore-lining* da Franja isópaca de cristais prismáticos sobre cutícula micrítica (calcita magnésiana). Indica precipitação marinha freática onde os poros estavam saturados em água. Este processo mineralógico evidencia o nível de mar alto e a submersão do paleorecife.

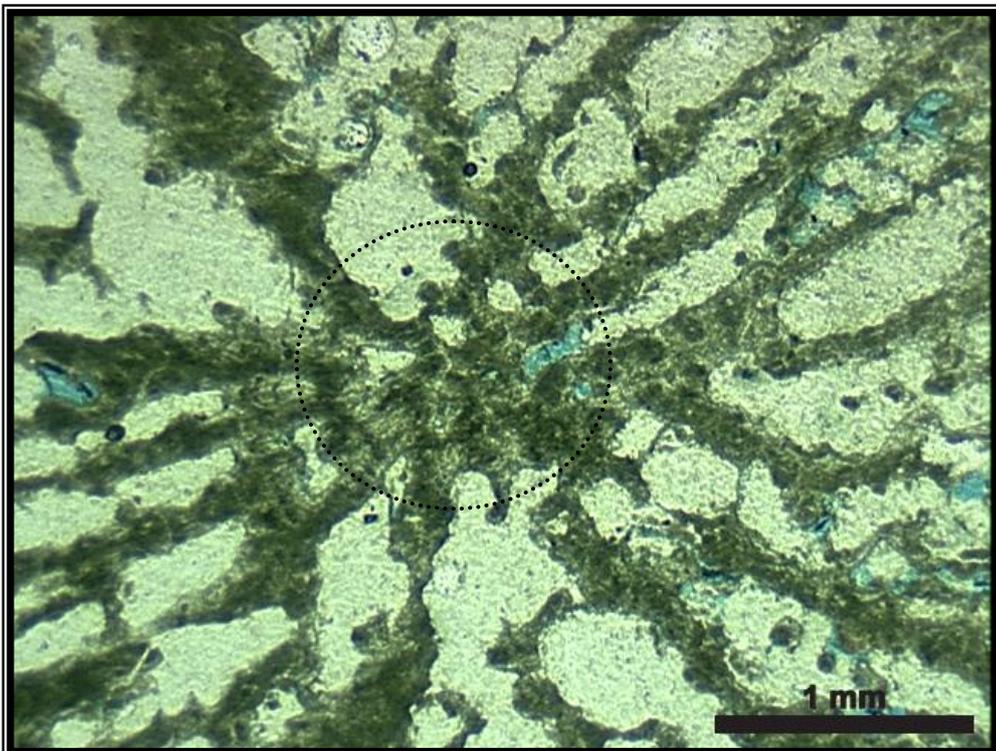


**FOTO 39-** Detalhe do crescimento dos cristais prismáticos. Setas indicam os vetores principais de crescimento mineralógico, em direção a um ponto convergente na parte central do orifício do coral escleractíneo.

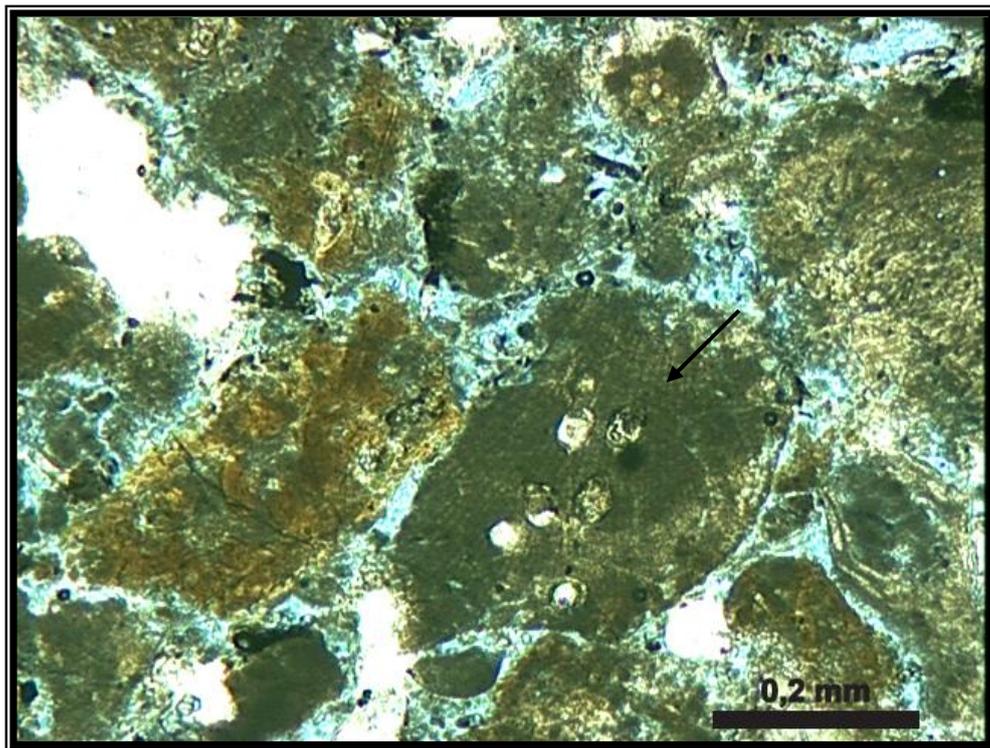
#### 4.5.4. AMOSTRAS DO CALCARENITO



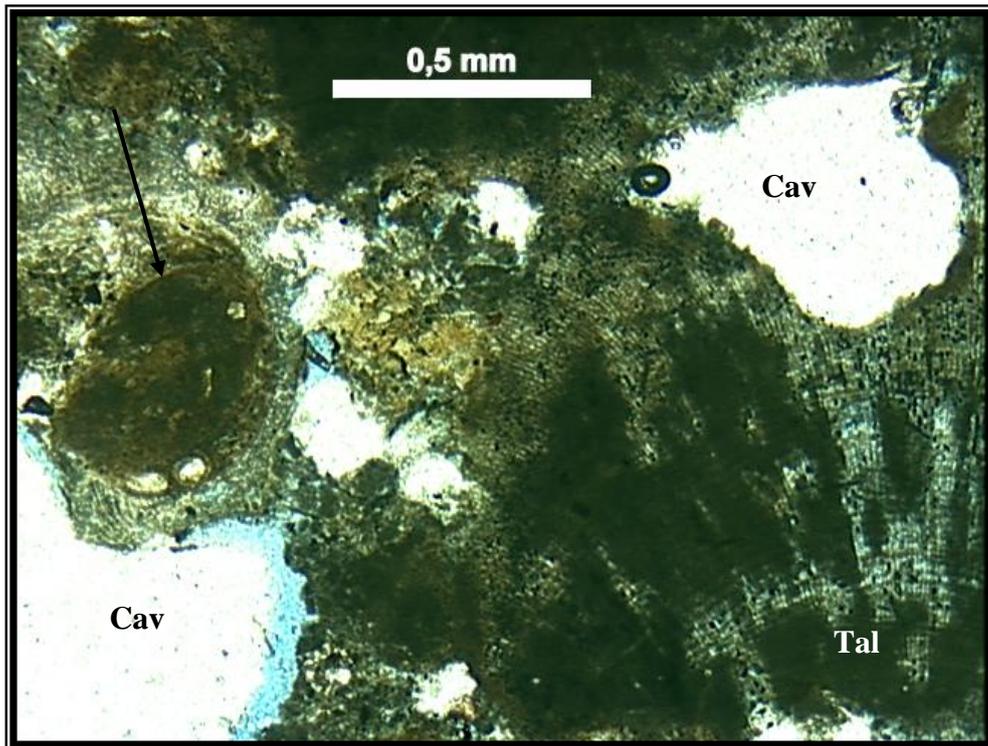
**FOTO 40-** Amostra de topo (2m acima do nível do mar atual) contendo bioconstrução (biolito) de coral escleractíneo. Observa-se estrutura colunar com presença de micritização.



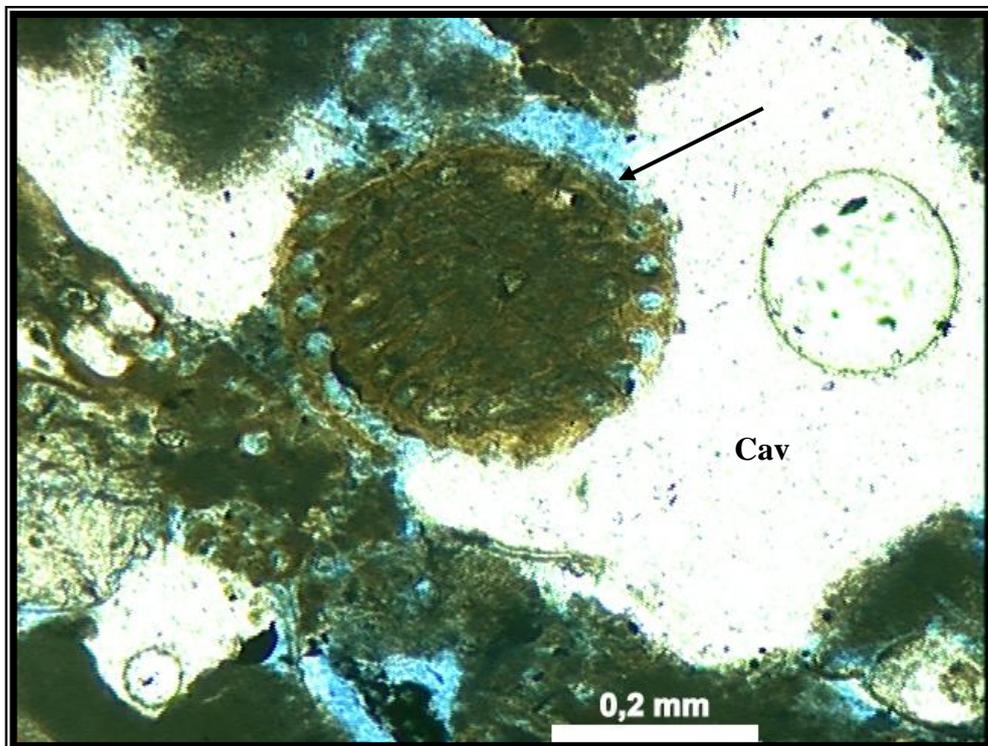
**FOTO 41-** Corte transversal mostrando estrutura central do coralito (círculo) e estrutura carbonática de crescimento. Topo (2m acima do nível do mar atual).



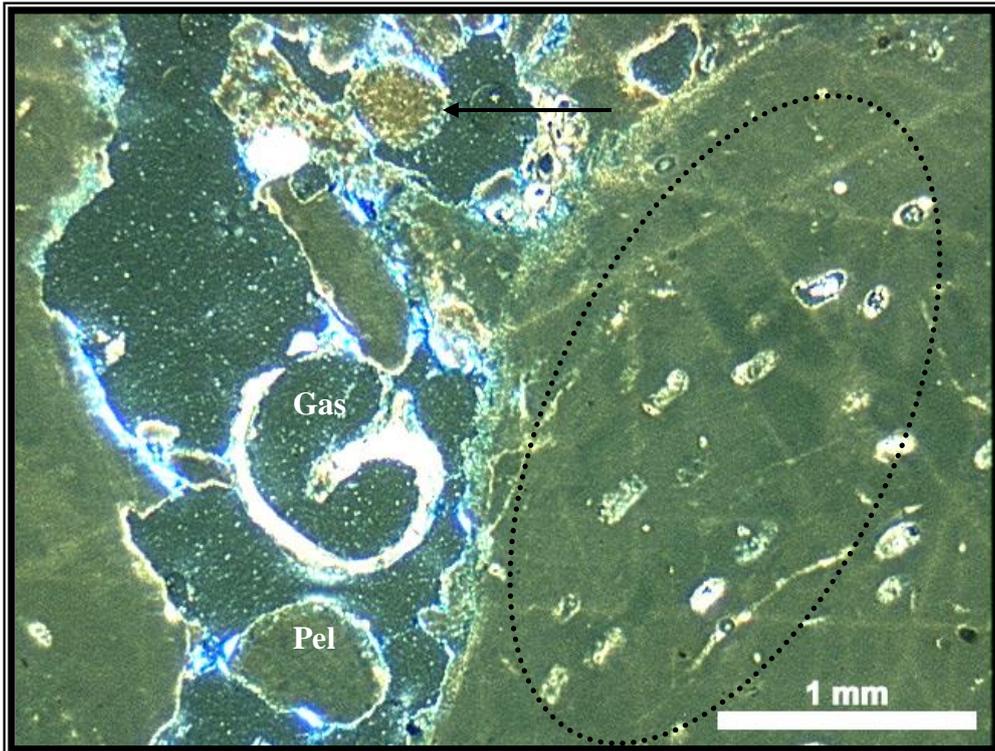
**FOTO 42-** Talo de alga vermelha coralina *Porolython* com estrutura celular característica e esporângios (indicado pela seta). Alta presença de material peloidal / bioclástico de outras algas. Extensa micritização. Fácies de Grainstone Bioclástico/Peloidal. Amostra de base do *beachrock*.



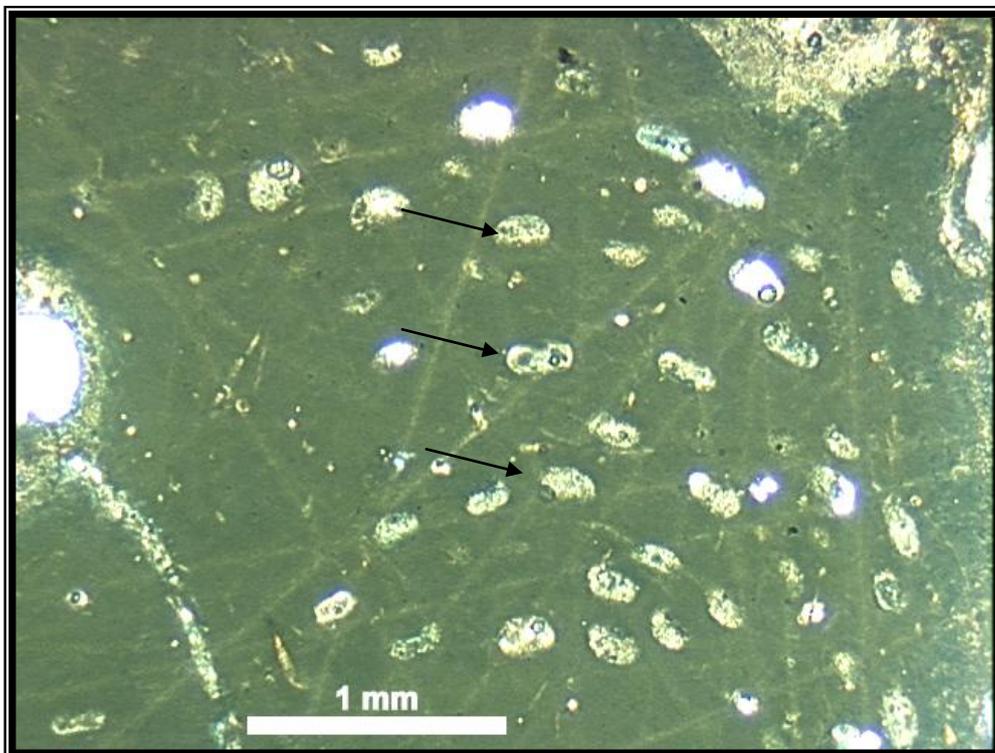
**FOTO 43-** Bioconstrução de alga coralina vermelha com talo característico (Tal). Presença de foraminífero acervulinídeo incrustante (Seta) na estrutura carbonática. Cavidades (Cav) provavelmente originadas por atividade geobiológica (Bioerosão/Bioturbação). Amostra de base do *beachrock*.



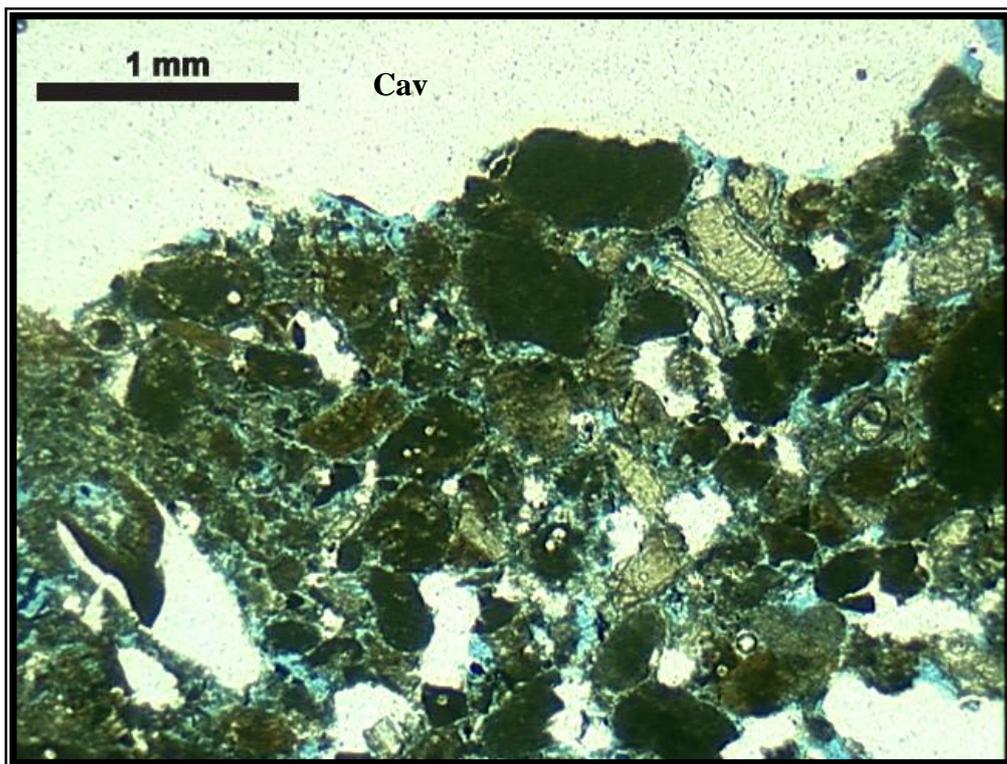
**FOTO 44-** Presença de grão esquelético na base do calcarenito do Atol das Rocas com testa de foraminífero bentônico (seta) em cavidade (Cav). Amostra de base do *beachrock*.



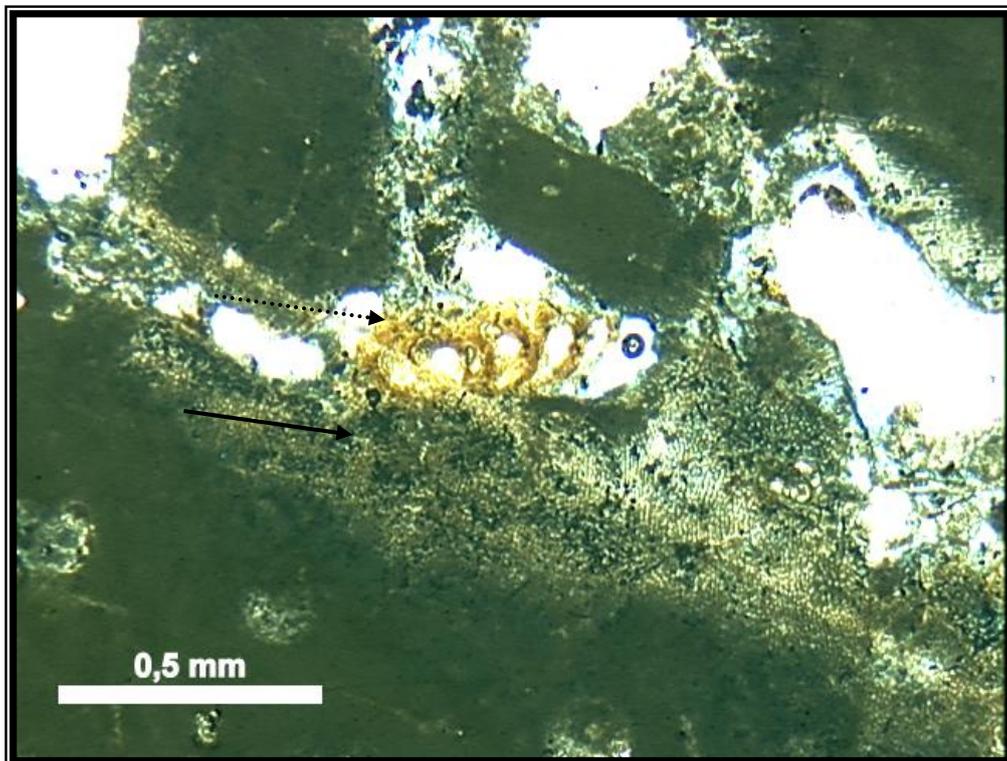
**FOTO 45-** Assembléia fossilífera do calcarenito mostrando a presença de gastrópodes (Gas), foraminíferos (seta), pelóides algálicos (Pel) e talo de alga coralina vermelha com presença de conceptáculos (indicado pela elipse). Formação de agulhas de aragonita na porção externa da alga calcárea. Amostra de base do *beachrock*.



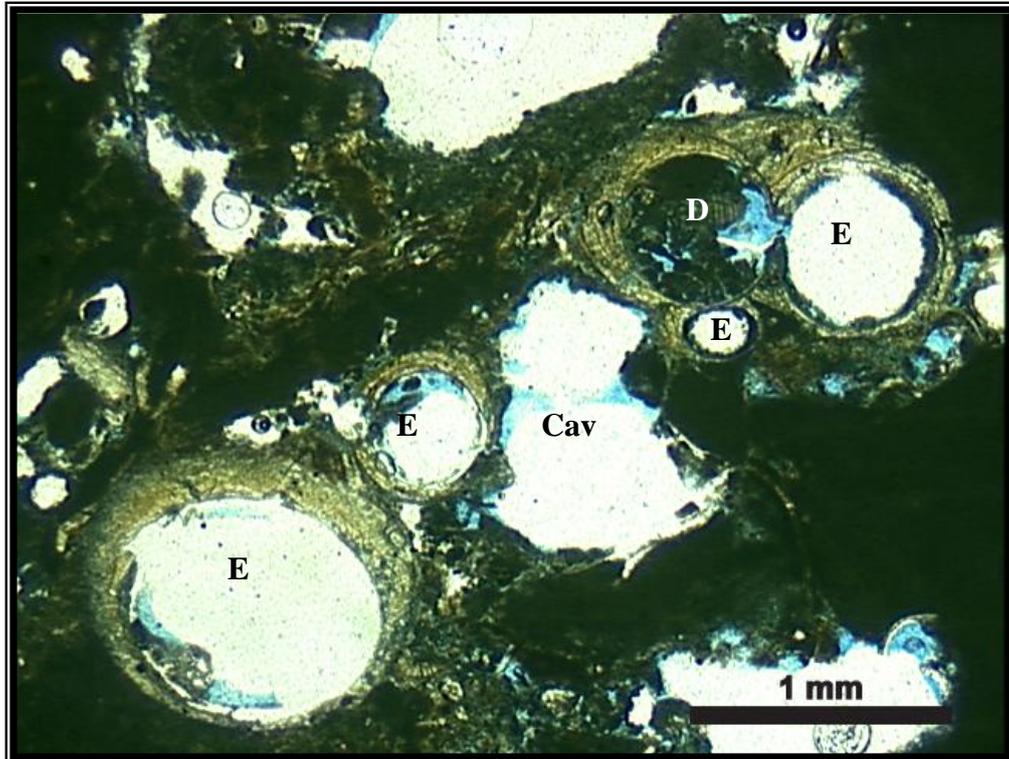
**FOTO 46-** Detalhe do biolito de algas vermelhas com esporângios (estruturas reprodutivas) indicadas por setas. Amostra de base do *beachrock*.



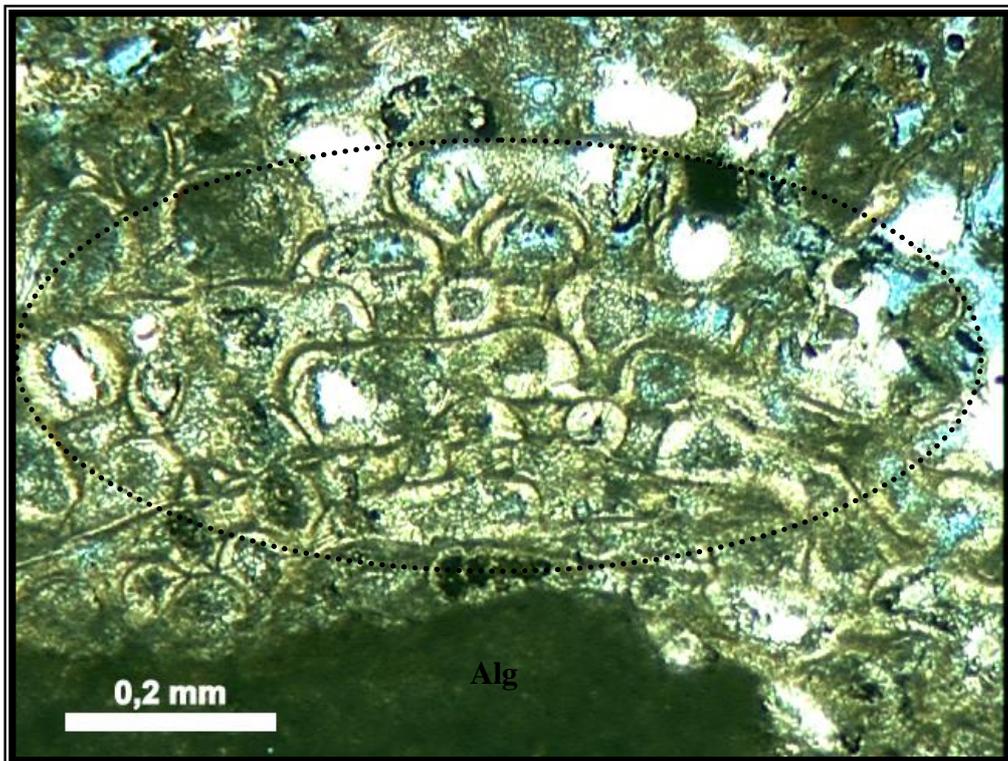
**FOTO 47-** Cavidade com alto preenchimento de pelóides (maioria algálicos) e micrita. Amostra de base do *beachrock*.



**FOTO 48-** Concha de gastrópode (seta pontilhada) sobre estrutura celular (células epiteliais) de algas coralinas vermelhas incrustantes (seta contínua). Amostra de base do *beachrock*.



**FOTO 49-** Bioacumulação de conchas de vermetídeos com preenchimento da porosidade interna de maneira distinta. Exemplar da direita (D) com alto preenchimento de material peloidal. Demais exemplares (E) com alta porosidade não preenchida. Presença de cavidades / perfurações por bioerosão na parte central (Cav). Amostra de base do *beachrock*.



**FOTO 50-** Bioconstrução (indicada pela elipse) de conchas de moluscos vermetídeos (*Dendropoma irregulare*) sobre alga vermelha bioconstrutora (Alg). Tais gastrópodes são um dos principais bioconstrutores do recife do Atol das Rocas e indicadores de variações do nível do mar por serem de áreas entremarés ou imediatamente submaré. Amostra de base do *beachrock*.

#### 4.6. TÁBUA DE MARÉS UTILIZADA DURANTE AS COLETAS DA EXPEDIÇÃO OCEANOGRÁFICA.

##### 4.6.1. TÁBUA DE FERNANDO DE NORONHA EXTRAÍDA DO SITE DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DA MARINHA DO BRASIL (JANEIRO DE 2008).

###### TÁBUAS DAS MARÉS

[Clique aqui para uma nova consulta](#)

###### ILHA DE FERNANDO DE NORONHA - BAÍA DE SANTO ANTÔNIO

Latitude: 03°50',0S  
Instituição: DHN

Longitude: 032°24',2W  
30 Componentes

Fuso: +02,0  
Nível Médio: 1.34

Ano: 2008  
Carta: 52

Lua	Dia	Hora	Alt.(m)
	TER 01/01/08	05:39	0.8
		12:04	1.9
		18:17	0.9
	QUA 02/01/08	00:28	1.8
		06:45	0.9
		13:09	1.9
		19:28	0.9
	QUI 03/01/08	01:38	1.8
		07:47	0.9
		14:04	2.0
		20:24	0.8
	SEX 04/01/08	02:36	1.9
		08:36	0.8
		14:47	2.1
		21:08	0.8
	SAB 05/01/08	03:17	1.9
		09:17	0.8
		15:23	2.1
		21:45	0.6
	DOM 06/01/08	03:56	2.0
		09:56	0.7
		16:00	2.2
		22:15	0.5

---

	<b>SEG 07/01/08</b>	04:28	2.1
		10:30	0.6
		16:34	2.3
		22:51	0.4
⊕	<b>TER 08/01/08</b>	05:00	2.1
		11:02	0.5
		17:08	2.4
		23:24	0.3
	<b>QUA 09/01/08</b>	05:36	2.2
		11:38	0.4
		17:45	2.4
	<b>QUI 10/01/08</b>	00:00	0.2
		06:11	2.2
		12:11	0.3
		18:19	2.4
	<b>SEX 11/01/08</b>	00:39	0.2
		06:53	2.2
		12:54	0.3
		19:00	2.4
	<b>SAB 12/01/08</b>	01:17	0.2
		07:36	2.2
		13:38	0.4
		19:43	2.3
	<b>DOM 13/01/08</b>	02:02	0.3
		08:24	2.1
		14:26	0.5
		20:32	2.2
	<b>SEG 14/01/08</b>	02:53	0.4
		09:19	2.1
		15:23	0.6
		21:28	2.1
⊕	<b>TER 15/01/08</b>	03:51	0.6
		10:21	2.0
		16:26	0.7
		22:34	2.0
	<b>QUA 16/01/08</b>	05:00	0.7
		11:32	2.0
		17:39	0.7
		23:49	2.0
	<b>QUI 17/01/08</b>	06:21	0.8
		12:49	2.0
		18:58	0.7

---

	<b>SEX 18/01/08</b>	01:15	1.9
		07:45	0.7
		14:00	2.1
		20:13	0.6
	<b>SAB 19/01/08</b>	02:38	2.0
		08:54	0.7
		15:02	2.2
		21:19	0.5
	<b>DOM 20/01/08</b>	03:39	2.1
		09:47	0.5
		15:54	2.4
		22:09	0.3
	<b>SEG 21/01/08</b>	04:26	2.3
		10:28	0.4
		16:36	2.5
		22:54	0.2
☺	<b>TER 22/01/08</b>	05:08	2.4
		11:06	0.3
		17:13	2.6
		23:34	0.1
	<b>QUA 23/01/08</b>	05:47	2.4
		11:45	0.3
		17:51	2.6
	<b>QUI 24/01/08</b>	00:09	0.1
		06:23	2.4
		12:23	0.3
		18:30	2.6
	<b>SEX 25/01/08</b>	00:49	0.2
		07:02	2.3
		13:02	0.3
		19:09	2.5
	<b>SAB 26/01/08</b>	01:26	0.3
		07:41	2.2
		13:45	0.4
		19:54	2.3
	<b>DOM 27/01/08</b>	02:08	0.4
		08:19	2.1
		14:24	0.5
		20:38	2.2
	<b>SEG 28/01/08</b>	02:53	0.5
		09:02	2.0
		15:08	0.6
		21:21	2.0

	<b>TER 29/01/08</b>	03:38	0.7
		09:49	1.9
		15:54	0.8
		22:11	1.9
☾	<b>QUA 30/01/08</b>	04:30	0.9
		10:45	1.9
		16:54	0.9
		23:23	1.7
	<b>QUI 31/01/08</b>	05:41	1.0
		11:56	1.8
		18:26	1.0

Existe para o mes Jando ano 2008 selecionados um nº de 119 previsões !

Legenda para as fases da lua: ☽ Cheia ☾ Crescente 🌑 Nova ☾ Minguante

Este Serviço não exime os navegantes da responsabilidade de manterem em suas embarcações a publicação Tábuas das Marés, conforme preconizado nas Normas da Autoridade Marítima, aprovadas pela [Diretoria de Portos e Costas](#) (DPC) da [Marinha do Brasil](#).

Esta Diretoria disponibiliza dados e possui outros produtos relacionados à Maré, mediante consulta prévia, ao [Banco Nacional de Dados Oceanográficos](#).

[Clique aqui para maiores informações e explicações sobre as Tábuas das Marés](#)

É proibida a reprodução desta página por qualquer meio sem a prévia autorização da DHN.

Projeto e desenvolvido pela Seção de Desenvolvimento de Sistemas do BNDO, pertencente ao CHM.

[Nova consulta](#)

#### 4.6.2. TÁBUA DE FERNANDO DE NORONHA EXTRAÍDA DO SITE DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DA MARINHA DO BRASIL (FEVEREIRO DE 2008).

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN)  
CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM)  
BANCO NACIONAL DE DADOS OCEANOGRÁFICOS (BNDO)



TÁBUAS DAS MARÉS

[Clique aqui para uma nova consulta](#)

##### ILHA DE FERNANDO DE NORONHA - BAÍA DE SANTO ANTÔNIO

Latitude: 03°50',0S      Longitude: 032°24',2W      Fuso: +02.0      Ano: 2008  
Instituição: DHN      30 Componentes      Nível Médio: 1.34      Carta: 52

Lua	Dia	Hora	Alt.(m)
SEX	01/02/08	00:56	1.7
		07:00	1.0
		13:15	1.8
		19:53	1.0
SAB	02/02/08	02:09	1.8
		08:09	1.0
		14:19	1.9
		20:51	0.9
DOM	03/02/08	03:04	1.9
		09:00	0.8
		15:04	2.1
		21:28	0.7
SEG	04/02/08	03:45	2.0
		09:41	0.7
		15:45	2.2
		22:02	0.5
TER	05/02/08	04:15	2.1
		10:13	0.5
		16:17	2.3
		22:36	0.4
QUA	06/02/08	04:47	2.2
		10:47	0.4
		16:53	2.4
		23:08	0.2

---

⊕	QUI 07/02/08	05:19	2.3
		11:19	0.3
		17:24	2.5
		23:45	0.1
	SEX 08/02/08	05:56	2.4
		11:56	0.2
		18:00	2.6
	SAB 09/02/08	00:19	0.1
		06:32	2.4
		12:34	0.2
		18:39	2.5
	DOM 10/02/08	00:56	0.1
		07:11	2.3
		13:13	0.2
		19:19	2.5
	SEG 11/02/08	01:38	0.2
07:56		2.3	
14:02		0.3	
20:08		2.3	
TER 12/02/08	02:24	0.4	
	08:47	2.1	
	14:56	0.5	
	21:04	2.2	
QUA 13/02/08	03:21	0.6	
	09:47	2.0	
	16:00	0.6	
	22:09	2.0	
⊖	QUI 14/02/08	04:32	0.7
		11:00	1.9
		17:17	0.7
		23:38	1.8
	SEX 15/02/08	06:06	0.9
		12:30	1.9
		18:53	0.8
	SAB 16/02/08	01:23	1.8
		07:43	0.8
		13:54	2.0
		20:17	0.7
	DOM 17/02/08	02:49	2.0
		08:53	0.7
		14:58	2.2
		21:21	0.5

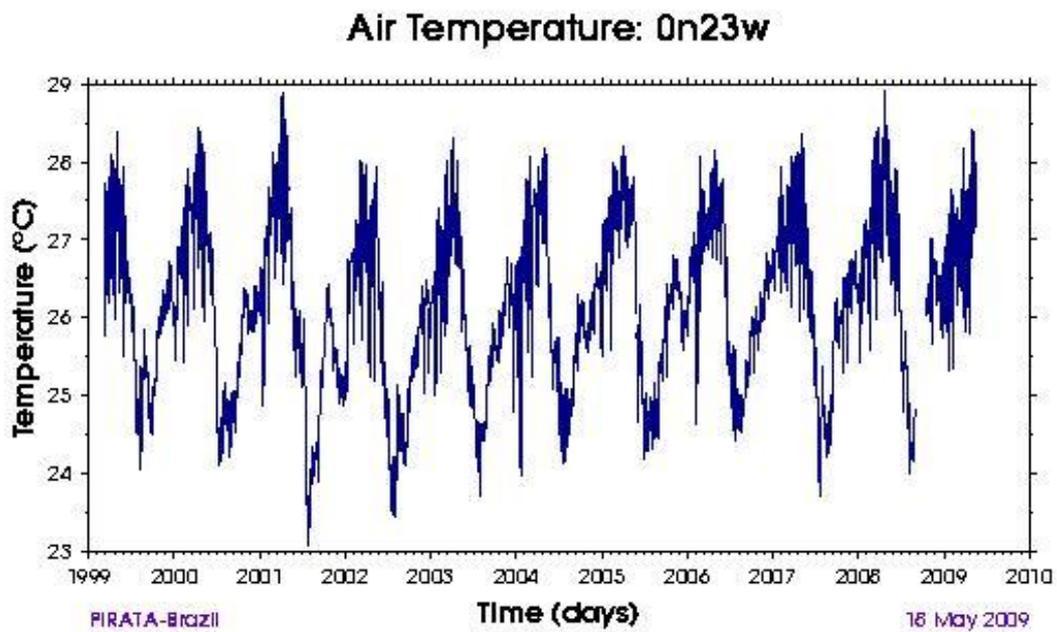
	<b>SEG 18/02/08</b>	03:43	2.1
		09:43	0.6
		15:49	2.4
		22:08	0.3
	<b>TER 19/02/08</b>	04:23	2.3
		10:19	0.4
		16:24	2.5
		22:47	0.2
	<b>QUA 20/02/08</b>	04:58	2.4
		10:54	0.3
		16:58	2.6
		23:17	0.2
☺	<b>QUI 21/02/08</b>	05:28	2.4
		11:24	0.2
		17:30	2.6
		23:49	0.2
	<b>SEX 22/02/08</b>	05:58	2.4
		11:58	0.2
		18:04	2.6
	<b>SAB 23/02/08</b>	00:17	0.2
		06:26	2.4
		12:32	0.3
		18:39	2.5
	<b>DOM 24/02/08</b>	00:53	0.3
		07:00	2.3
		13:04	0.3
		19:15	2.3
	<b>SEG 25/02/08</b>	01:26	0.4
		07:34	2.2
		13:39	0.4
		19:51	2.2
	<b>TER 26/02/08</b>	02:04	0.5
		08:09	2.1
		14:15	0.6
		20:26	2.0
	<b>QUA 27/02/08</b>	02:45	0.7
		08:56	2.0
		15:00	0.7
		21:08	1.9
☾	<b>QUI 28/02/08</b>	03:30	0.9
		09:47	1.9
		15:54	0.9
		22:06	1.7
	<b>SEX 29/02/08</b>	04:36	1.0
		10:56	1.8
		17:13	1.0
		23:59	1.6

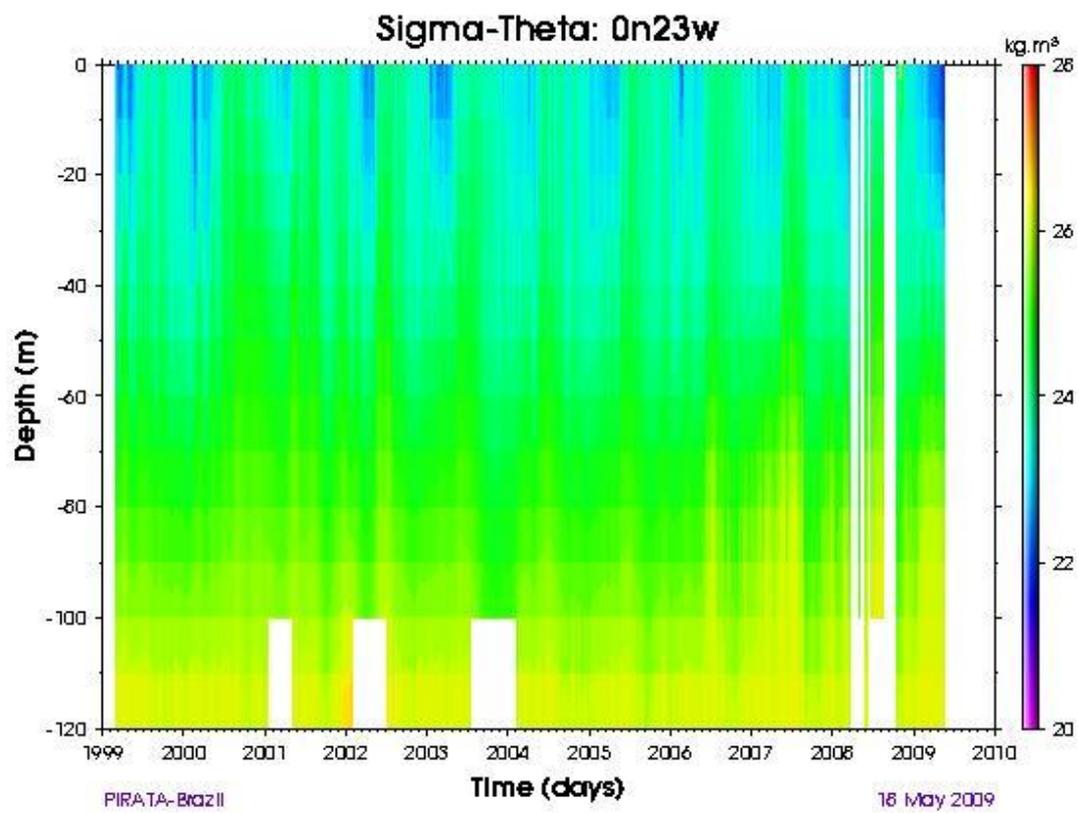
Existe para o mes Fev do ano 2008 seleccionados um nº de 113 previsões !

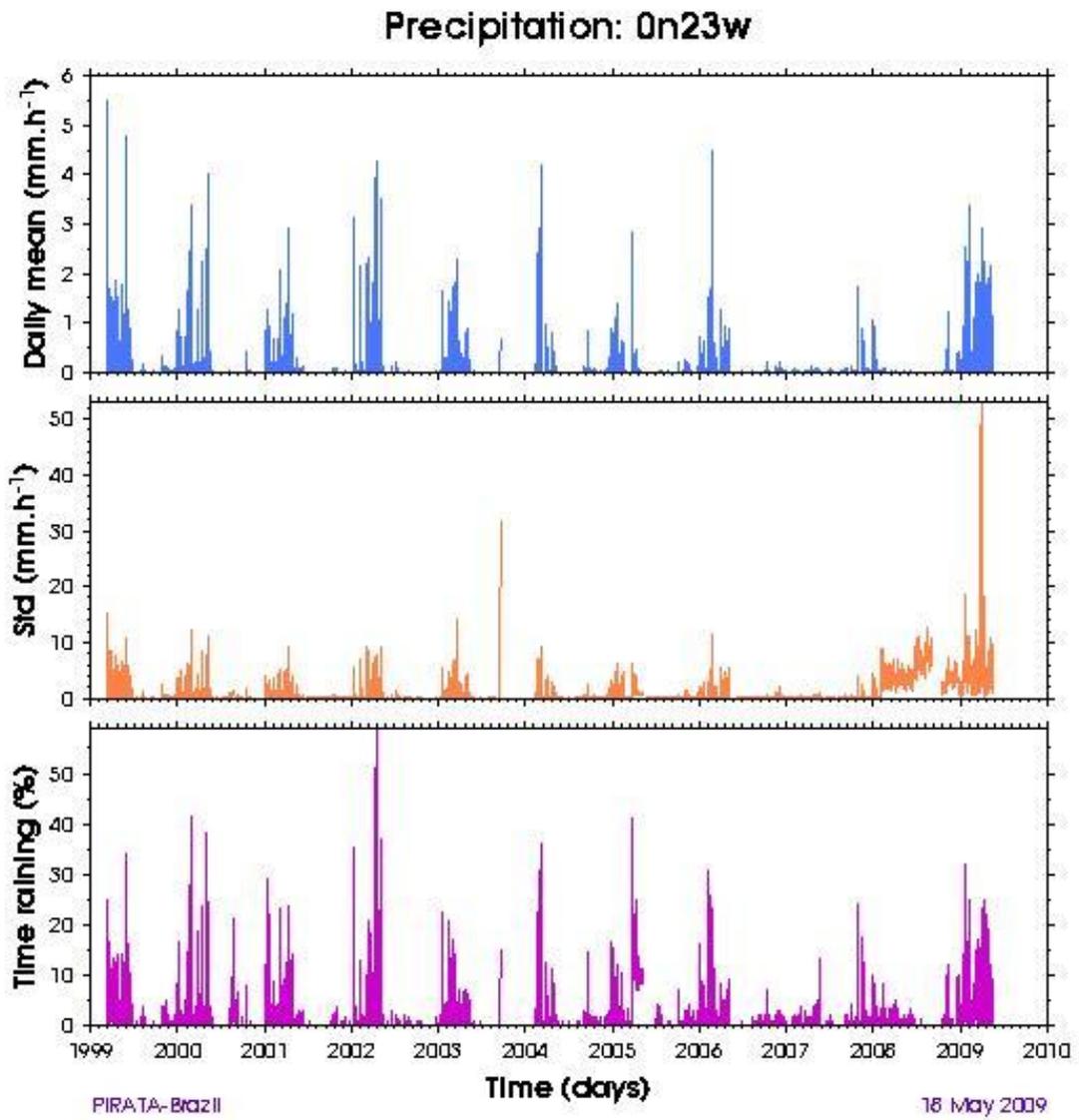
Legenda para as fases da lua: ☺ Cheia ☾ Crescente ☼ Nova ☾ Minguante

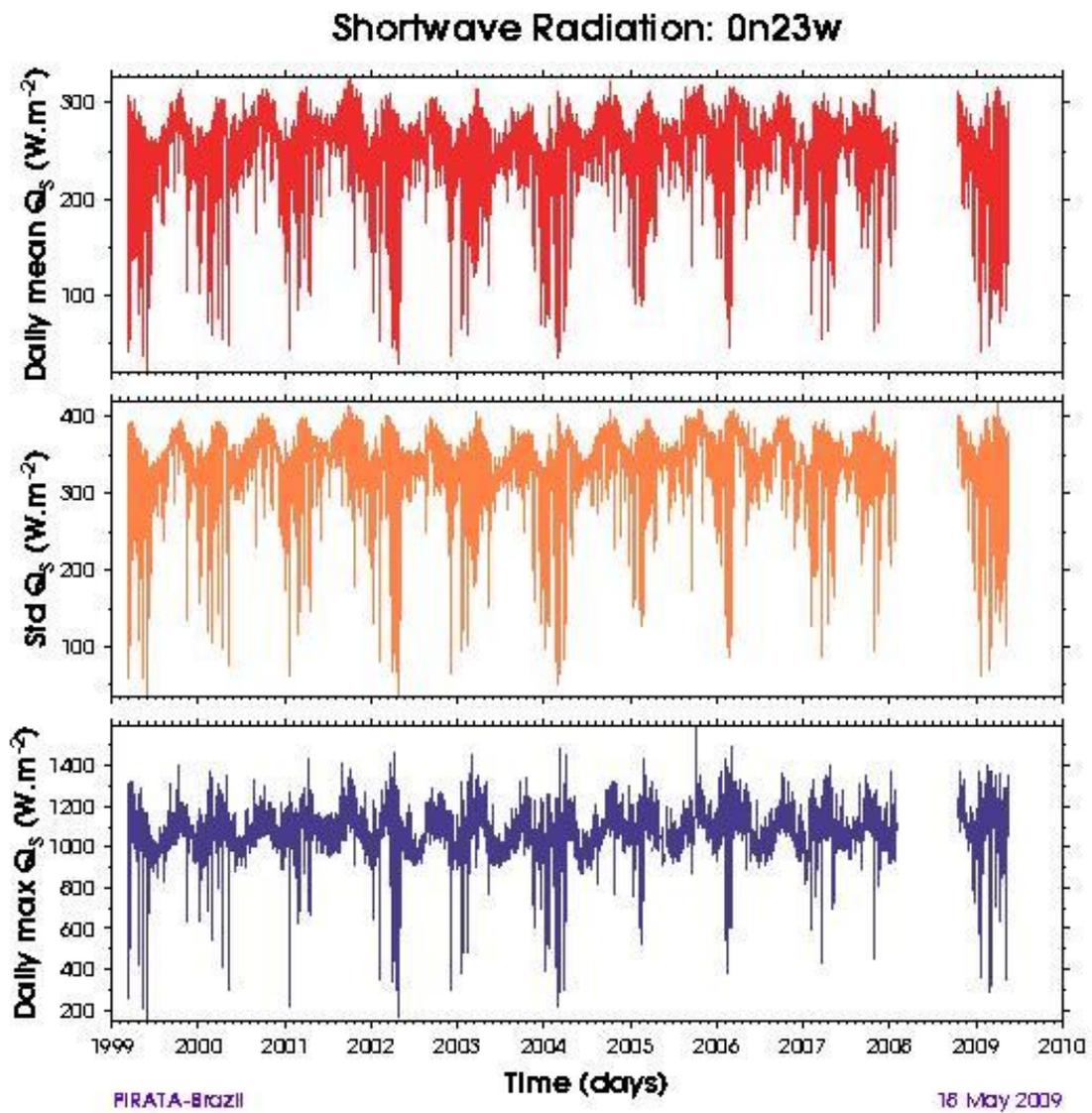
#### 4.7. DADOS OCEANOGRÁFICOS SELECIONADOS. BÓIAS DO PIRATE BRAZIL. PROGRAMA DE COOPERAÇÃO GOOS. ÁREAS PRÓXIMAS AO ATOL DAS ROCAS.

##### 4.7.1. DADOS OCEANOGRÁFICOS DAS BÓIAS NA POSIÇÃO 0° N 23' W. SÉRIE HISTÓRICA – 1999-2009.

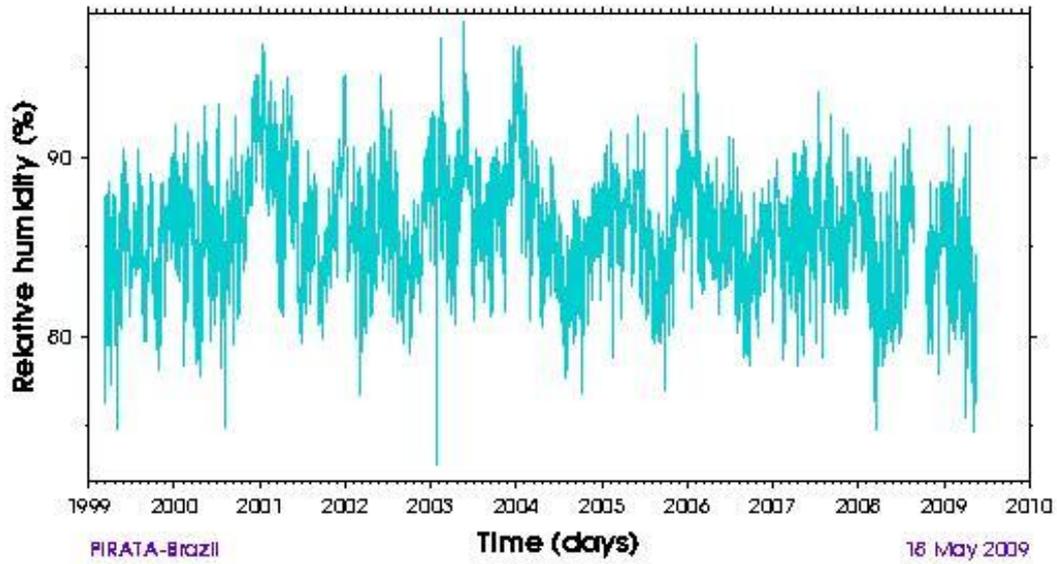




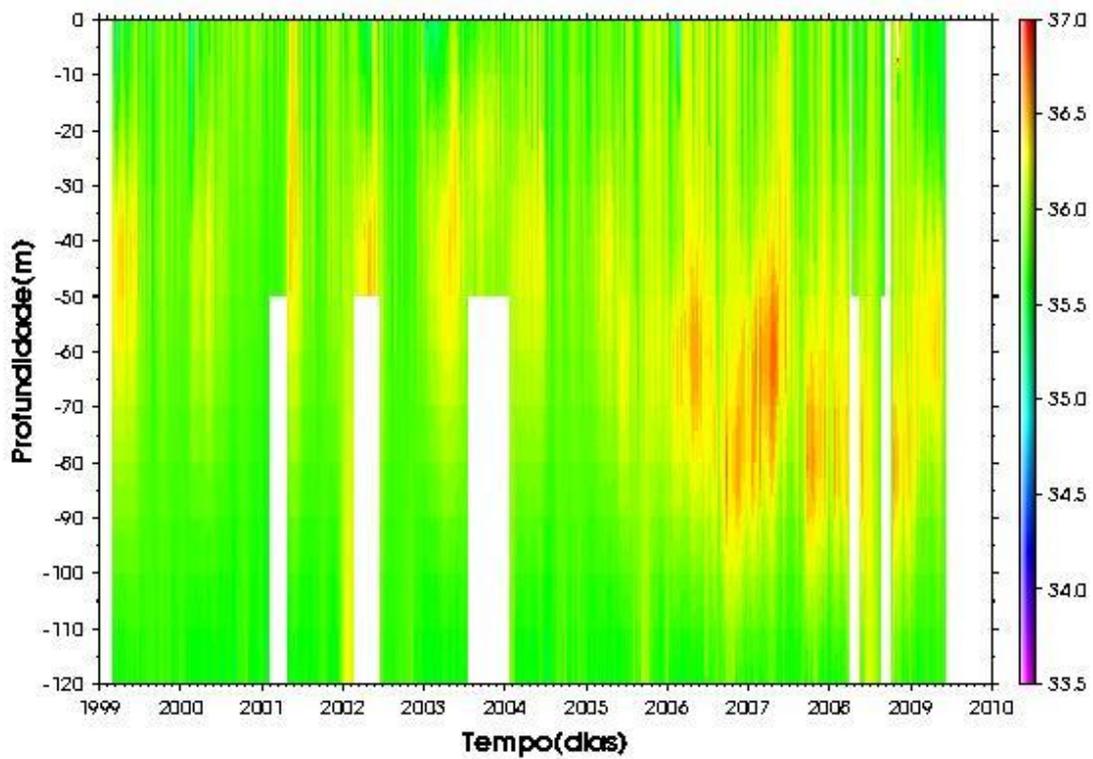


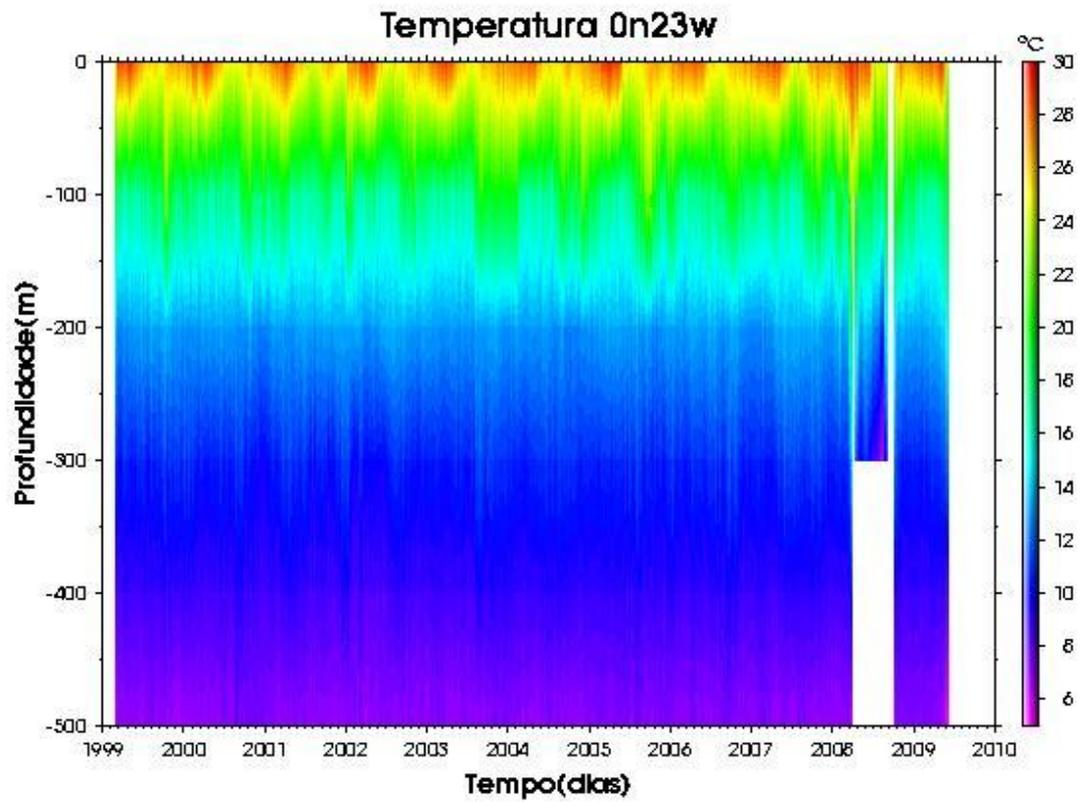


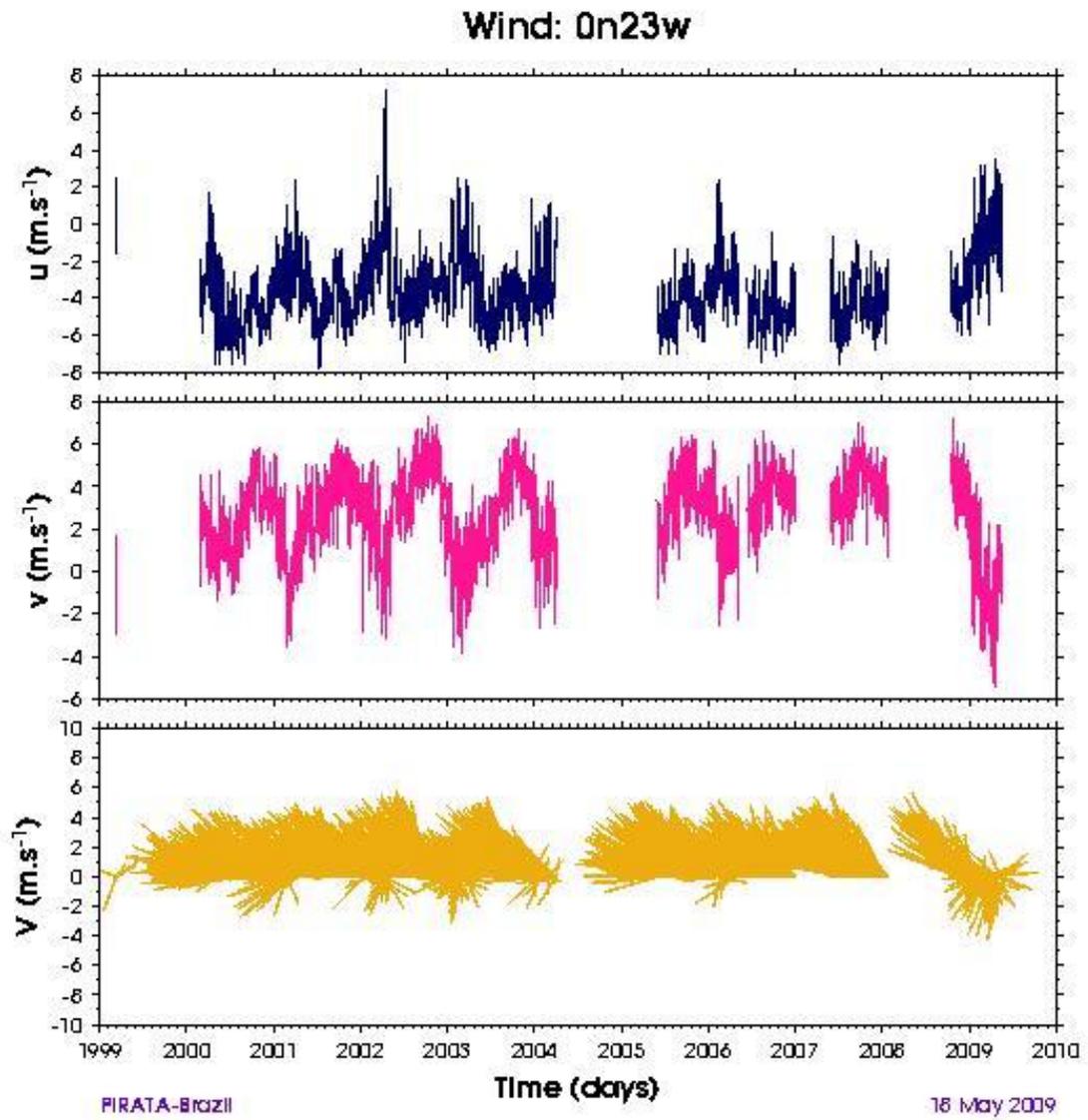
### Relative Humidity: 0n23w



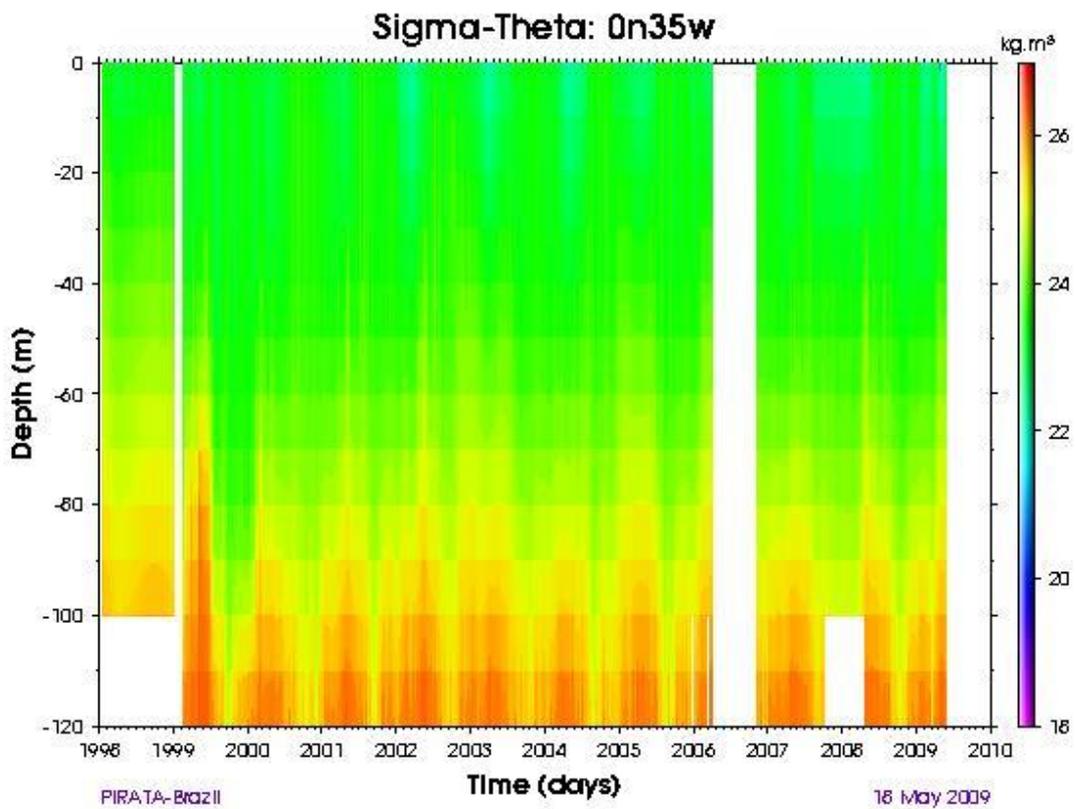
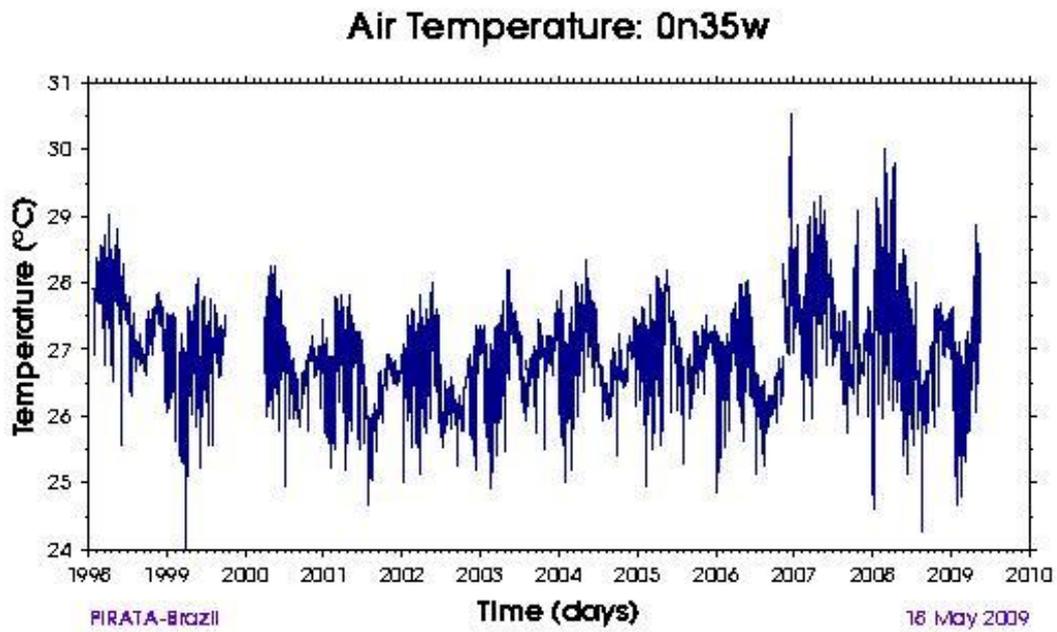
### Salinidade 0n23w

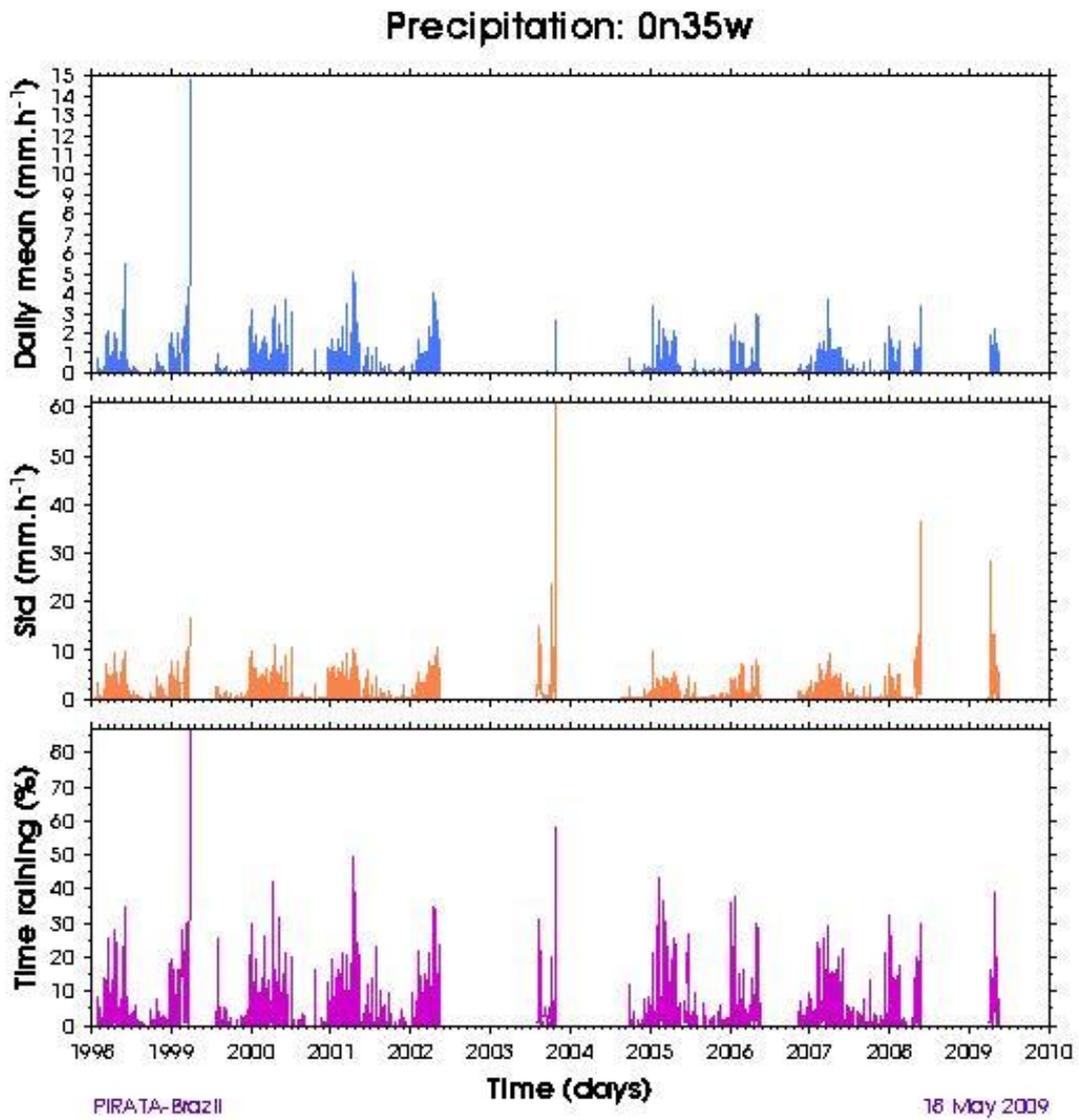


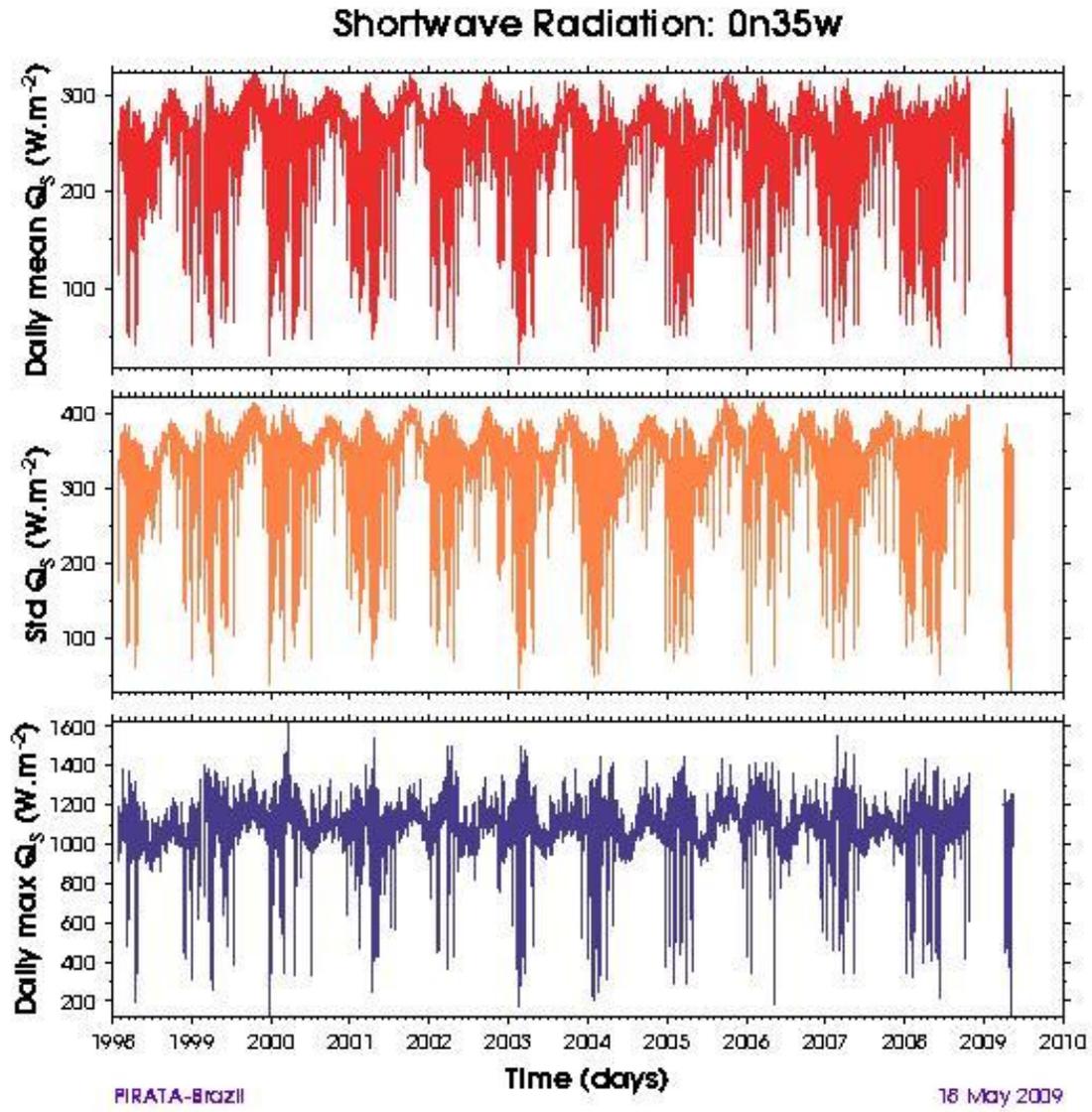


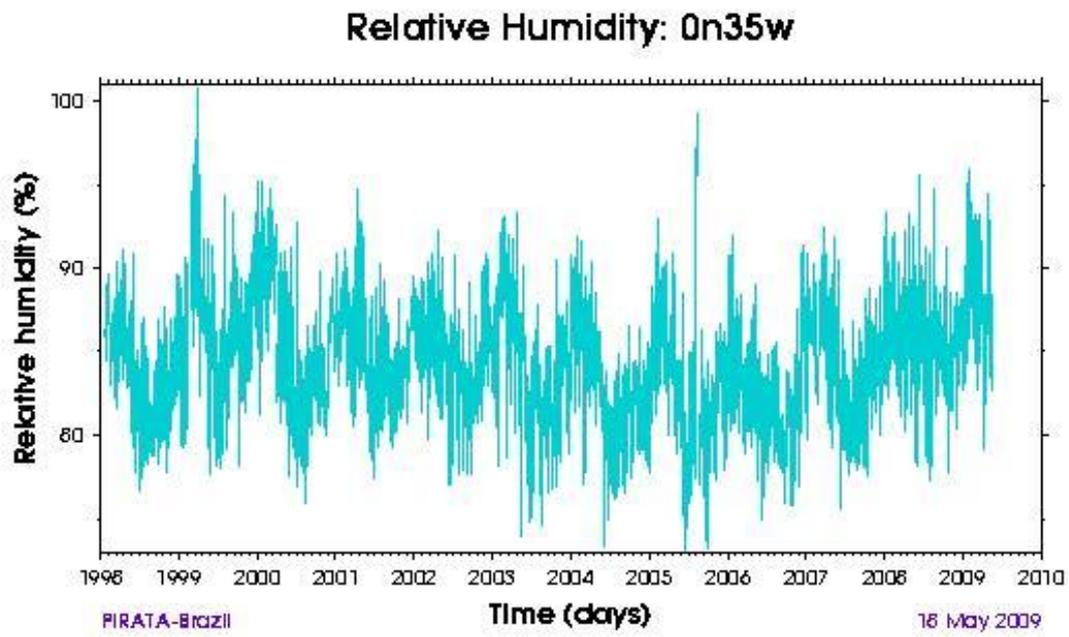


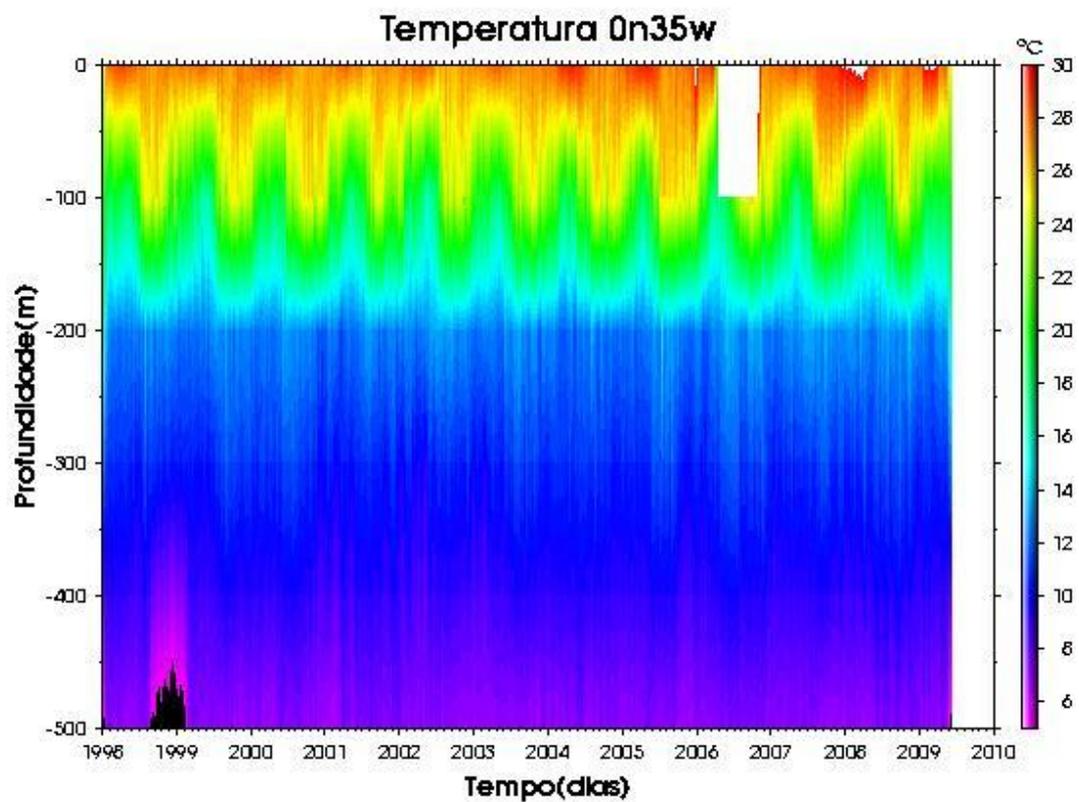
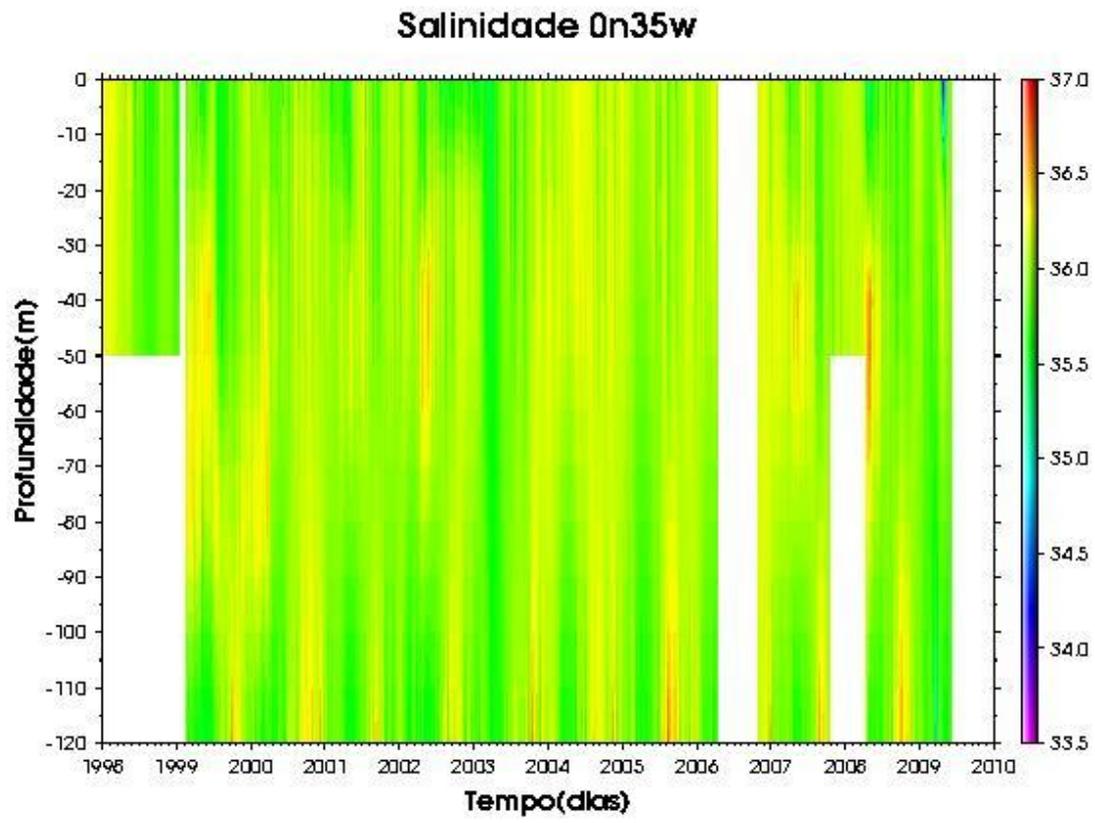
#### 4.7.2. DADOS OCEANOGRÁFICOS DAS BÓIAS NA POSIÇÃO 0° N 35' W. SÉRIE HISTÓRICA – 1999-2009.

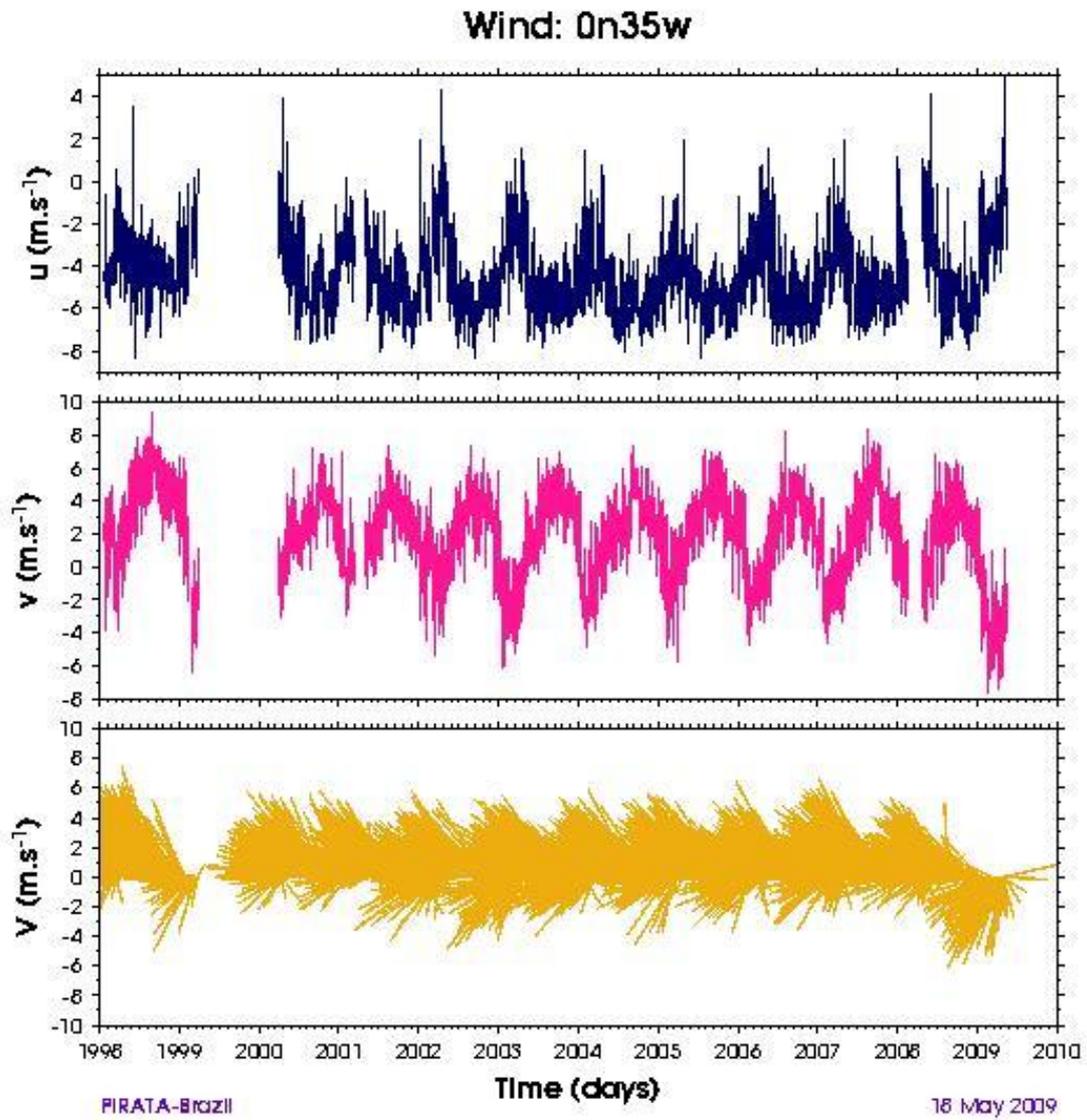












## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AISSAOUI, D.M.; MCNEILL, D.F.; KIRSCHVINK, J.L. Magnetostratigraphy dating of Mururoa atoll and global eustasy. **Earth Planet Sci. Lett**, v. 97, p.102-120, 1990.

ALLEN, P.A.; ALLEN, J.R. **Basin analysis** – Principles and Applications. 1990. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 451p.

ALMEIDA, F.F.M. **Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral/ Departamento de Geologia e Mineralogia, DNPM/DGM, 1955, 181p. (relatório, 13).

ALMEIDA, F.F.M. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terrae Didactica**, v.2, n.1, p.3-18, 2006.

ALMEIDA, C.E.; MARCHON-SILVA, V.; RIBEIRO, R.; SERPA-FILHO, A.; ALMEIDA, J.R.; COSTA, J. Entomological fauna from reserva biológica do atol das rocas, RN, Brasil: I- Morphospecies composition. **Revista brasileira de Zoologia**, v. 60, n.2, p. 291-298, 2000.

ANDRADE, G.O. O recife anular das Rocas (Um registro das recentes variações eustáticas no Atlântico equatorial). **Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, v.11, p. 29-61, 1959.

ARAÚJO, T.M.F. **Morfologia, composição, sedimentologia e história evolutiva do recife de coral da Ilha de Itaparica, Bahia**. 92f, Dissertação (Mestrado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1984.

BARRY, S.J.; COWELL, P.J.; WOODROFFE, C.D. A morphodynamic model of reef-island development on atolls. **Sedimentary Geology**, v.197, p.47-63, 2007.

BEZERRA, F.H.R.; BARRETO, A.M.F.; SUGUIO, K. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte coast, Brazil. **Marine Geology**, v. 196, p. 73-89, 2003.

BRYAN, G.M.; KUMAR, N. The north Brazilian ridge and the extension of equatorial fracture zones into the continent. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., Belém, **Anais...** Belém: SBG-NORTE, 1973, v.2, p.133-144.

CORDANI, U.G. Idade do vulcanismo do Atlântico Sul. **Boletim do Instituto de Geociências e Astronomia – USP**, v.1, p. 9-76, 1970.

DALY, R.A. Pleistocene glaciation and the coral reef problem. **Am. J. Sci [Ser 4]**, v.30, p. 297-308, 1910.

DAMUTH, J.E. ; PALMA, J.C. Geomorfologia do fundo atlântico equatorial oeste. In: DAMUTH, J.E ; PALMA, J.C. **Geomorfologia da Margem continental Brasileira e das áreas oceânicas adjacentes**. PETROBRAS/CENPES/DINTEP, v.7, p.53-88, 1979.

DANA, J.D. **On Coral Reefs and Islands**. 1853. New York, Putnam, 300p.

DARWIN, C. **The structure and Distribution of Coral reefs**. 1842, London, Smith Elder, 256p.

DARWIN, C. **On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life**. 1859. 1<sup>st</sup> ed. London: John Murray, 410p.

DAVIS, W.M. The small islands of almost-atolls. **Nature**, v. 105, p. 292-293, 1920.

DAVIS, W.M. The coral reef problem. **Am. Geogr. Soc. Spec. Pap**, v. 9, p.1– 596, 1928.

DICKINSON, W.R. Impacts of eustasy and hidro-isostasy on the evolution and landforms of Pacific atolls. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 213, p. 251-269, 2004.

ECHEVERRÍA, C.A.; PIRES, D.O. Cnidarians of the Atol das Rocas. In: PROC. 8<sup>TH</sup>. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, **Proceedings...Panamá:PICRS**. 1997, v.1, p. 443-446.

FLOOD, P.G. The ‘Darwin Point’ of Pacific Ocean atolls and guyots: a reappraisal. **Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v.175, p.147-152, 2001.

FRIEDRICHS, M.; LEIPE, T.; PEINE, F.; GRAF, G. Impact of macrozoobenthic structures on near-bed sediment fluxes. **Journal of Marine Systems**, v.75, p. 336-347, 2009.

GEISTER, J.; DÍAZ, J.M. 1997. A field guide to the oceanic barrier reefs and atolls of the southwestern caribbean (Archipelago of San Andres and Providencia, Colombia). In: PROC. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, 8., 1997, **Proceedings...Panamá**, v.1, p. 235-262, 1997.

GHERARDI, D.F.M.; BOSENCE, D.W.J. Modeling of the ecological succession of encrusting organisms in recent coralline-algal frameworks from Atol das Rocas, Brazil. **Palaios**, v.14, n. 2, p.145-158, 1999.

GHERARDI, D.F.M.; BOSENCE, D.W.J. Late Holocene reef growth and relative sea-level changes in Atol das Rocas, equatorial South Atlantic. **Coral Reefs**, v.24, p.264-272, 2005.

GISCHLER, E.; HUDSON, J.H. Holocene development of three isolated carbonate platforms, Belize, Central America. **Marine Geology**, v. 144, p. 333-347, 1998.

GISCHLER, E.; HUDSON, J.H. Holocene development of the Belize Barrier Reef. **Sedimentary Geology**, v. 164, p. 223-236, 2004.

GOLDBERG, W.M. Cay Sal Bank, Bahamas: A Biologically Impoverished, Physically controlled environment. **Atoll Research Bulletin**, v.271, p. 1-36, 1983.

GORINI, M.A. The tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern of Brazil. In: ASMUS, H.E. **Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais**. Rio de Janeiro, PETROBRAS, CENPES, DINTEP, 1981, v.9, p. 11-116.

HALL, S.J. Physical disturbance and marine benthic communities: life in unconsolidated sediments. **Oceanography Marine Biology Annuals Reviews**, v. 32, p. 179-239, 1994.

HUTCHINGS, P.A. Biological destruction on coral reefs: a review. **Coral Reefs**, v.4, p.239-252, 1986.

IMaRS, Institute for Marine Remote Sensing. Millennium. **Coral Reef Mapping Project Atolls & Banks**, Imagem, Disponível em: <  
<http://imars.usf.edu/MC/atolls.html>>. Acesso em 22 de fevereiro de 2009.

JOHNSTON, G. Belize's barrier reef, approximately 185 miles in length. **Concierge Inspired Travel Starts Here**, 21 de fevereiro de 2009, Imagem, Disponível em: <  
<http://www.concierge.com/travelguide/belize/photos/photoview/15082?photoSourceType=0&sortParam=-createDate&geoUrlName=&sourceType=0>>. Acesso em 21 de fevereiro de 2009.

KIKUCHI, R.K.P.; ABDON, M.M. Mapeamento do Atol das Rocas (Reserva Biológica-IBAMA/RN) com a utilização de produtos orbitais TM-Landsat. In: **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE**, 14., 1991, **Anais...** Recife: SBG. p.115-118.

KIKUCHI, R.K.P.; LEÃO, Z.M.A.N. Atol das Rocas: morfologia e estruturas sedimentares, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, **Anais...** Natal: SBG. p. 45-46.

KIKUCHI, R.K.P. **Geomorfologia, Estratigrafia e Sedimentologia do Atol das Rocas (REBIO-IBAMA/RN)**. 1994, 144f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Pós-graduação em Geologia. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1994.

KIKUCHI, R.K.P.; LEÃO, Z.M.A.N. Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): an atoll built primarily by coralline algae. In: PROC. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, 8., 1997, **Proceedings...**Panamá, v.1, p. 731-736, 1997.

LEÃO, Z.M.A.N. **Guia para identificação dos corais do Brasil**. Salvador: Univ. Fed. da Bahia., 1986, 57p.

MACHADO, A.J.; SOUZA, F.B.C. Principais espécies de foraminíferos e briozoários do Atol das Rocas. **Revista brasileira de Geociências**, v.24, n.4, p. 247-261, 1994.

MARQUES, L.V. **Influência de peixes herbívoros na palatabilidade de macroalgas do Atol das Rocas**. 2003, 49f. Dissertação (Mestrado em Biologia Marinha) - Pós-graduação em Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2003.

MARTIN, L.; FLEXOR, J.M.; BLITZKOW, D.; SUGUIO, K. Geoid change indications along the Brazilian coast during the last 7000 years: In: PROC. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, 5., 1985, **Proceedings...**Tahiti, v.1, p. 85-90, 1985.

MCDONALD, J.; SMALLCOMBE, A. The Seven Natural Wonders of the World. **The Great Barrier Reef**, 21 de fevereiro de 2009, Imagem, Disponível em: <<http://t3.pacific.edu/teams/M043406/thegreatbarrierreef.htm>>. Acesso em 21 de fevereiro de 2009.

MCNEILL, D.F. Accumulation rates from well-dated late Neogene carbonate platforms and margins. **Sedimentary Geology**, v.175, p.73-87, 2005.

MILLIMAN, J.D. The geomorphology and history of Hogsty Reef, a Bahamian atoll. **Bulletin of Marine Science**, v.17, n.3, p.519-543, 1967.

MILLIMAN, J.D. Four southwestern Caribbean atolls: Courtown Cays, Albuquerque Cays Roncador Bank and Serrana Bank. **Atoll Research Bulletin**, v. 129, p.1-49, 1969.

MIURA, K.; BARBOSA, J.C. Geologia da plataforma continental do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 26., **Anais...** Belém: SBG, 1972, v. 2, p. 57-66.

NAKADA, M. Holocene sea levels in oceanic islands: implications for the rheological structure of the Earth's mantle. **Tectonophysics**, v. 121, p. 263-276, 1986.

NAYLOR, L.A.; VILES, H.A.; CARTER, N.E.A. Biogeomorphology revisited: looking towards the future. **Geomorphology**, v. 47, p. 3-14, 2002.

NAYLOR, L.A. The Contributions of biogeomorphology to emerging field of geobiology. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.219, p.35-51, 2005.

NETTO, S.A.; ATTRILL, M.J.; WARMICK, R.M. The effect of a natural water-movement related disturbances on the structure of meiofauna and macrofauna communities in the intertidal sand flat of Rocas Atoll (NE, Brazil). **Journal of Sea Research**, v.42, p.291-302, 1999.

NOLASCO, M.C. **Construções carbonáticas da costa norte do Estado da Bahia (Salvador a Subáúma)**. 1987. 143p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 1987.

OTTMAN, F. "L'atol das Rocas" dans l'Atlantique sud tropical. **Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique**, v.2, p. 101-107, 1963.

PHILLIPS, J.D. Biogeomorphology and landscape evolution: The problem of scale. **Geomorphology**, v.13, p. 337-347, 1995.

PHILLIPS, J.D. Soils as extended composite phenotypes. **Geoderma**, 149: 143-151, 2009.

PONTE, F.C.; ASMUS, H.E. As bacias marginais brasileiras: estágio atual de conhecimento. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 12, n.2, p. 385-420, 2004.

PURDY, E.G.; WINTERER, E.L. Contradicting Barrier Reef relationships for Darwin's evolution of reef types. **Int. J. Earth. Sci (Geol Rundsch)**, v.95, p. 143-167, 2006.

ROSSI, A. R.; LEIPNITZ, I. I.; LEIPNITZ, B. Foraminíferos Holocênicos do Atol das Rocas. **Acta Geologica Leopoldensia**, v.19, n.43, p.77-91, 1996.

SANDERS, D.; BARON-SZABO, R.C. Scleractinian assemblages under sediment input: their characteristics and relation to the nutrient concept. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 216, p. 139-181, 2005.

SCOFFIN, T.P.; DIXON, J.E. The distribution and structure of coral reefs: one hundred years since Darwin. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 20, p. 11-38, 1983.

SMITH, F. G.W. **Atlantic Reef Corals**. 1971, Florida, University of Miami Press, 164p.

SOARES, M.O.; LEMOS, V.B.; KIKUCHI, R.K.P. Aspectos biogeomorfológicos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. **Revista Brasileira de Geociências**. submetido.

SPENCER, T.; VILES, H. Bioconstruction, bioerosion and disturbance on tropical coasts: coral reefs and rocky limestone shores. **Geomorphology**, v.48, p. 23-50, 2002.

STALLINS, J.A. Geomorphology and ecology: Unifying themes for complex systems in biogeomorphology. **Geomorphology**, v.77, p. 207-216, 2006.

STANLEY JR., G.D. Evolution of modern corals and their early history. **Earth-Science Reviews**, v.60, p.195-225, 2003.

STODDART, D.R. Three Caribbean Atolls: Turneffe Islands, Lighthouse Reef, and Glover's Reef, British Honduras. **Atoll Research Bulletin**, v.87, p.1-51, 1962.

STODDART, D.R. The shape of atolls. **Marine Geology**, v.3, n.5, p. 369-383, 1965.

STODDART, D.R. Ecology and morphology of recent coral reefs. **Biological Reviews**, v. 44, p. 433-498, 1969.

TSUJI, Y. Tide influenced high energy environments and rodolith-associate carbonate deposition on the outer shelf and slope off the Miyako Islands, southern Ryukyu Island Arc, **Japan Marine Geology**, v.113, p.255-271, 1993.

TUDHOPE, A.W. Shallowing-upwards sedimentation in a coral reef lagoon, Great Barrier Reef of Australia. **J. Sediment. Petrol**, v.59, p.1036-1051, 1989.

VALLAUX, C. La formation atollienne de Rocas (Brésil). **Bulletin de L'Institut Océanographique**, v.37, p. 1-8, 1940.

VERDE, M. Bioerosão – In: CARVALHO, I.S.; FERNANDES, A.C.S., (ed.). **Ichologia**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2007, p. 108-117 (Séries Textos n° 3).

WARME, J.E. Boring as trace fossils, and the process of marine bioerosion. In: FREY, R.W. (ed.) **The study of trace fossils: a synthesis of principles, problems and procedures in ichnology**. Berlin: Springer Verlag, 1975, p.181-227.

WIENS, H.J. **Atoll environment and Ecology**. 1962. Connecticut, Yale Univ. Press, 523p.

---

WOODROFFE, C.D. Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise. **Global and Planetary Change**, v.62, n.1-2, p. 77-96, 2008.

YAMANO, H.; KAYANNE, H.; MATSUDA, F.; TSUJI, Y. Lagoonal facies, ages, and sedimentation in three atolls in the Pacific. **Marine Geology**, v.185, p. 233-247, 2002.

ZENETOS, A. Re-evaluation of numerical classification methods for delimiting biofacies and biotopes in an estuarine environment. **Lethaia**, v.24, p. 13-26, 1991.