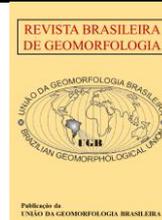




<https://rbgeomorfologia.org.br>
ISSN 2236-5664



Artigo de Pesquisa

Registro Sedimentar de Ciclones Extratropicais no Início do Século XX na Região dos Lagos Fluminenses, Sudeste do Brasil: Análise de Dados Multi-Proxies

Extratropical Cyclone Sedimentary Record at the Beginning of the 20th Century in the Fluminense Lakes Region, Southeast Brazil: Multiproxy Analysis

Caíque Lima Cabral ¹ e João Wagner Alencar Castro ²

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-graduação em Geologia, Rio de Janeiro, Brasil.

Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente (LAGECOST), Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

¹ E-mail: cabral@mn.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5187-7086>

² E-mail: jwacastro@gmail.com

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-8955-5971>

Recebido: 19/09/2020; Aceito: 09/09/2021; Publicado: 06/04/2022

Resumo: Ciclones são agentes meteorológicos-oceanográficos, responsáveis por mudanças rápidas nos padrões de erosão e deposição de sedimentos nas zonas costeiras. O setor oeste do Oceano Atlântico Sul, próximo à costa leste da América do Sul é favorável à gênese de ciclones extratropicais. No litoral do Estado do Rio de Janeiro, a passagem de ciclones, ocorre de forma episódica, acarretando inundações costeiras e impactos ambientais sobre a infraestrutura urbana local. O presente artigo, objetiva investigar o registro sedimentar ciclogênico em camadas de lamelas orgânicas superficiais de pântanos costeiros desse segmento de litoral brasileiro. Procedimentos metodológicos incluem análises de dados multi-proxies, envolvendo, testemunhagem, padrões granulométricos, perfis faciológicos, tratamento palinológico, interpretação de lâminas delgadas de palinóforos, complementadas por técnicas geocronológicas de percentual de carbono moderno - pMC e isótopos estáveis de carbono. Resultados obtidos em testemunhos posicionados a 0,5 m acima do nível médio do mar, à 1,0 km da linha de praia, sugerem inundações marinhas de grande proporção no início do século XX na área ocupada pela Marina Porto Búzios, Armação dos Búzios - Rio de Janeiro.

Palavras-chave: Ciclones extratropicais; Ambientes de sedimentação costeira; Pântanos costeiros; Costa do Estado do Rio de Janeiro.

Abstract: Cyclones are meteorological - oceanographic agents, responsible for rapid changes in erosion and deposition patterns in coastal zones. The western sector of the Southern Atlantic Ocean, close to South America's east coast, is a region known as favorable to the genesis of extratropical cyclones. On the coast of Rio de Janeiro state, the passage of this type of event occurs occasionally with great impacts on coastal sedimentation environments and the local urban infrastructure. This manuscript aims to study the passage of an extratropical cyclone of great magnitude in the Region of the Fluminense Lakes, Rio de Janeiro, through a multi-proxies approach. It is supported by sedimentological, faciologic and palynological analysis, complemented by innovative geochronological techniques, involving a percentage of modern carbon - pMC and analysis of

stable carbon isotopes. Results obtained from cores positioned at 0.5 m above mean sea-level, at a distance of 1.0 km from the coastline, suggest a large proportion of marine inundation in the early 20th century in the area occupied by Marina Porto Búzios, Armação dos Búzios - Rio de Janeiro state.

Keywords: Extratropical cyclone; Coastal sedimentation environments; Coastal swamps; Rio de Janeiro state coastline.

1. Introdução

Registros sedimentares da passagem de ciclones extratropicais no hemisfério sul nos últimos 6.000 anos cal AP foram estudados principalmente na Austrália (NOTT; HAYNE, 2001; NOTT *et al.*, 2009). Abordam questões relacionadas a frequência de eventos ciclogênicos, registrados em cordões litorâneos paralelos a linha de costa contemporânea. Mediante análises sedimentológicas e geocronológicas de testemunhos foi possível compreender diversos eventos extremos associados a passagens de ciclones extratropicais na costa Australiana. Soma-se a esse tipo de abordagem, trabalhos envolvendo simulações e modelagens matemáticas, visando compreender a dinâmica desses eventos episódicos em todo o planeta (LAMBERT, 1988; MURRAY; SIMMONDS, 1991a e 1991b). No âmbito do Oceano Atlântico Sul, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Seluchi e Saulo (1997), Seluchi e Saulo (1998), Piva (2001) e Oda (2005).

O setor Oeste do Oceano Atlântico Sul, próximo à costa leste da América do Sul, é conhecido como uma região favorável à gênese de ciclones extratropicais (REBOITA, 2008). Esse vasto segmento de litoral, caracteriza-se por três áreas onde a densidade ciclogênica é máxima: costa sul/sudeste do Brasil; desembocadura do rio da Prata entre Uruguai e Argentina e na costa sul da Argentina. Conforme Reboita (2008), na região em torno da latitude 25°S, segmento correspondente aos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, a atividade ciclogênica é maior devido a umidade relativa do ar. Sugere-se que a umidade é um dos fatores fundamentais para geração de ciclones extratropicais nesta região.

O Oceano Atlântico Sul, de modo geral, caracteriza-se por agitação marítima intensa, ocasionada por ciclones migratórios, cujo deslocamento segue o sentido Sudoeste - Nordeste (INNOCENTINI; ARANTES; PRADO, 2003). Na região Sudeste e Sul do Brasil, as variações positivas do nível médio do mar são decorrentes de eventos de tempestades provenientes do quadrante Sul e Sudeste, associadas à passagem do sistema frontal e vórtices de ciclones (CALLIARI; TOZZI; KLEIN, 1998). Segundo Bulhões *et al.* (2014) o padrão interanual das tempestades nessas regiões, ocorre entre os meses de abril a setembro, em torno de 80%, classificada como “temporada de ondas de tempestade”. Neste período a agitação oceânica é maior, com ondas que podem atingir 5,0 m de altura em águas profundas.

Klumb-Oliveira (2015) identificou 228 eventos de tempestade ao longo de 34 anos, sendo a maior ocorrência concentrada na Classe 3 (significativo), cerca de 60% dos eventos, seguidos pela classe Classe 2 (moderado) com 17% e o restante na Classe 1 (fraco). Durante a ocorrência do episódio *El Niño*, o litoral do Rio de Janeiro fica exposto a concentrações de ondas de tempestades com alta probabilidade de ocorrência de episódios extremos. Durante o episódio *La Niña*, registra-se suave redução dos eventos de tempestades. Eventualmente as ondas apresentam maiores valores de Hs (altura de onda significativa) com maior duração.

Diversos eventos de tempestade foram documentados na Região dos Lagos Fluminenses - RLF, causando danos significativos na infraestrutura urbana de Cabo Frio, Armação dos Búzios, Rio das Ostras e Macaé. Em 2009, o emissário submarino de Rio das Ostras foi parcialmente destruído pela ação das ondas que atingiram 6,0 m de altura na arrebentação (CASTRO; FERNANDES; DIAS, 2009). Em um único episódio no município de Maricá foram calculados prejuízos de aproximadamente R\$ 1.500.000,00 (LINS-DE-BARROS; KLUMB-OLIVEIRA; LIMA,

2018). De acordo com Davis Jr. (1985), as tempestades excepcionais representam um dos principais elementos de alteração morfológica em curto período nas feições costeiras submetidas à ação das ondas de tempestades. Conforme Castro *et al.* (2011) e Vaz (2019) as principais alterações morfológicas e hidrológicas decorrentes de eventos de tempestades na planície costeira RLF, relacionam-se ao recuo de linha de costa (erosão costeira), ruptura de cordões litorâneos frontais e percolação da cunha salina em aquíferos subterrâneos.

Apesar do número significativo de trabalhos desenvolvidos na costa Sul e Sudeste do Brasil sobre eventos de tempestades e ciclones extratropicais, nenhum, abordou eventos históricos ciclogênicos, obtidos a partir de testemunhos geológicos no interior da planície costeira. O presente artigo objetiva investigar camadas de lamelas orgânicas superficiais em pântanos costeiros, submetidos a eventos de tempestade de grande magnitude através de abordagem multi-proxies. Esses depósitos sedimentares, localizam-se na retaguarda de cordões litorâneos holocênicos frontais, posicionados a 0,5 m acima do nível médio do mar. Ações de ondas de tempestades decorrentes de ciclones extratropicais episódicos, provocam, em situações extremas, a ruptura dessas feições geomorfológicas, inundando pântanos costeiros e a infraestrutura urbana da orla local. Investiga-se a hipótese da passagem de um evento catastrófico extremo (ciclone extratropical) no início do século XX nessa região.

2. Contexto Ambiental

A área investigada compreende a costa central do estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil (Figura 1). Nessa região, ocorrem predominantemente dois domínios geológicos distintos, inseridos no Domínio Tectônico Cabo Frio: o substrato do embasamento cristalino e as sequências sedimentares Cenozoicas. Os promontórios são caracterizados por rochas do embasamento, essencialmente formado por um complexo ortognáissico intrudido por diques máficos toleíticos (SCHMITT *et al.*, 2016). Os depósitos Cenozoicos são compostos por sedimentos de ambientes continentais (Formação Barreiras) e costeiros, este último, composto por estuários, deltas, praias, cordões litorâneos, dunas, lagos, lagoas e pântanos costeiros (CASTRO; SENRA; RAMOS, 2009; CASTRO *et al.*, 2014).

Estudos sobre as oscilações do nível relativo do mar - NRM, identificaram antigas posições de linha de costa, referentes à última transgressão holocênica nesse segmento de litoral Brasileiro (MARTIN; SUGUIO; DOMINGUEZ, 1997; CASTRO *et al.*, 2014). O pico dessa transgressão, ocorreu aproximadamente entre 6.260 e 4.819 anos cal AP (Cunha *et al.*, 2018). O paleonível do mar atingiu 3,0 m acima do atual, resultando na formação de uma grande paleolaguna. Sistemas de ilhas-barreira e cristas de praia foram desenvolvidos a partir do rebaixamento do nível relativo do mar. À medida que o nível marinho recuava, o ambiente lagunar anteriormente formado, transformava-se em pântanos, representando a fase atual (CASTRO *et al.*, 2014; CUNHA *et al.*, 2017)

A plataforma continental interna é coberta por areia média-fina e uma pequena camada de lama que se estende até 25 m de profundidade (SILVA, 2009). O clima de ondas é predominantemente do quadrante nordeste e secundariamente de sudeste e sudoeste. A ocorrência de ondas de anticiclone no Oceano Atlântico Sul está associada às frentes frias de leste-sudeste (CASTRO, 2018). A região é submetida a regime de micro maré com preamar de 1,0 m e baixa-mar entre 0,06 e 0,025 m, referindo-se à redução da maré de 0,67 m, conforme Marinha do Brasil (SILVA, 2009).

Conforme Areias *et al.* (2020) a ressurgência costeira, gerada pelos ventos de nordeste, trazem à superfície, águas frias e ricas em nutrientes. Algumas anomalias da superfície do mar, como temperaturas mais baixas causadas pela direção do vento, estão presentes na plataforma continental desse segmento do sudeste Brasileiro, especialmente durante o verão (GYLLENCREUTZ *et al.*, 2012). O clima local é semiárido, com baixas taxas de precipitações pluviométricas e altas taxas de evaporação. Os índices pluviométricos anuais, encontram-se em torno

de 700 mm, com maior concentração de chuvas no verão, classificando assim, essa região como de clima semiárido, similar ao nordeste Brasileiro (SILVA; DEREZYNSKI, 2014).

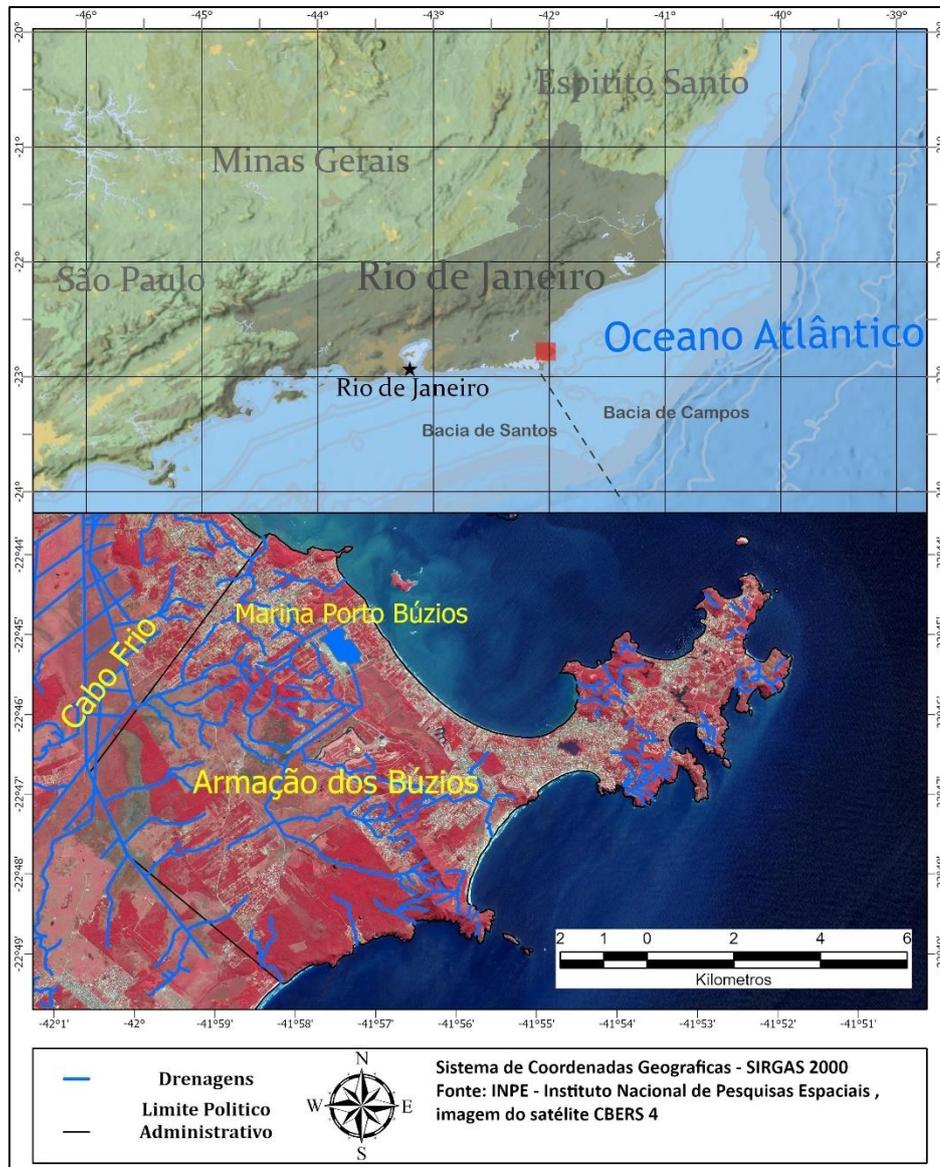


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, inserida nos Municípios de Armação dos Búzios e Cabo Frio, Rio de Janeiro, sudeste brasileiro.

3. Materiais e Métodos

Os procedimentos metodológicos consistem no uso de ferramentas consolidadas na elaboração e desenvolvimento de pesquisas na área de geociências. Abarcam sondagens a trado, análises granulométricas, perfis faciográficos, tratamento palinológico e interpretação de lâminas delgadas de palinóforos. Foram empregadas ainda, técnicas geocronológicas de percentual de carbono moderno - *pMC* e isótopos estáveis de carbono, possibilitando uma análise multi-proxie das informações obtidas.

Foram realizadas 4 (quatro) sondagens a trado manual, envolvendo amostras de lamelas orgânicas, areia, silte e argila em pontos distintos dos pântanos costeiros, Malhada e Ramalho (Armação dos Búzios e Cabo Frio). As amostras coletadas nos pontos **1** (22°45'21.64" S - 41°57'11.80" O) e **4** (22°45'13.52" S - 41°57'20.30" O) foram obtidas

em calhas de drenagens submetidas a ação de ondas e marés. As amostras referentes aos pontos 2 (22°45'35.24" S - 41°57'13.85" O) e 3 (22°45'15.92" S - 41°59'52.25" O) foram obtidas na porção interna da área da Marina Porto Búzios, profundidades de 0,50 e 0,80 m respectivamente (Figura 2).

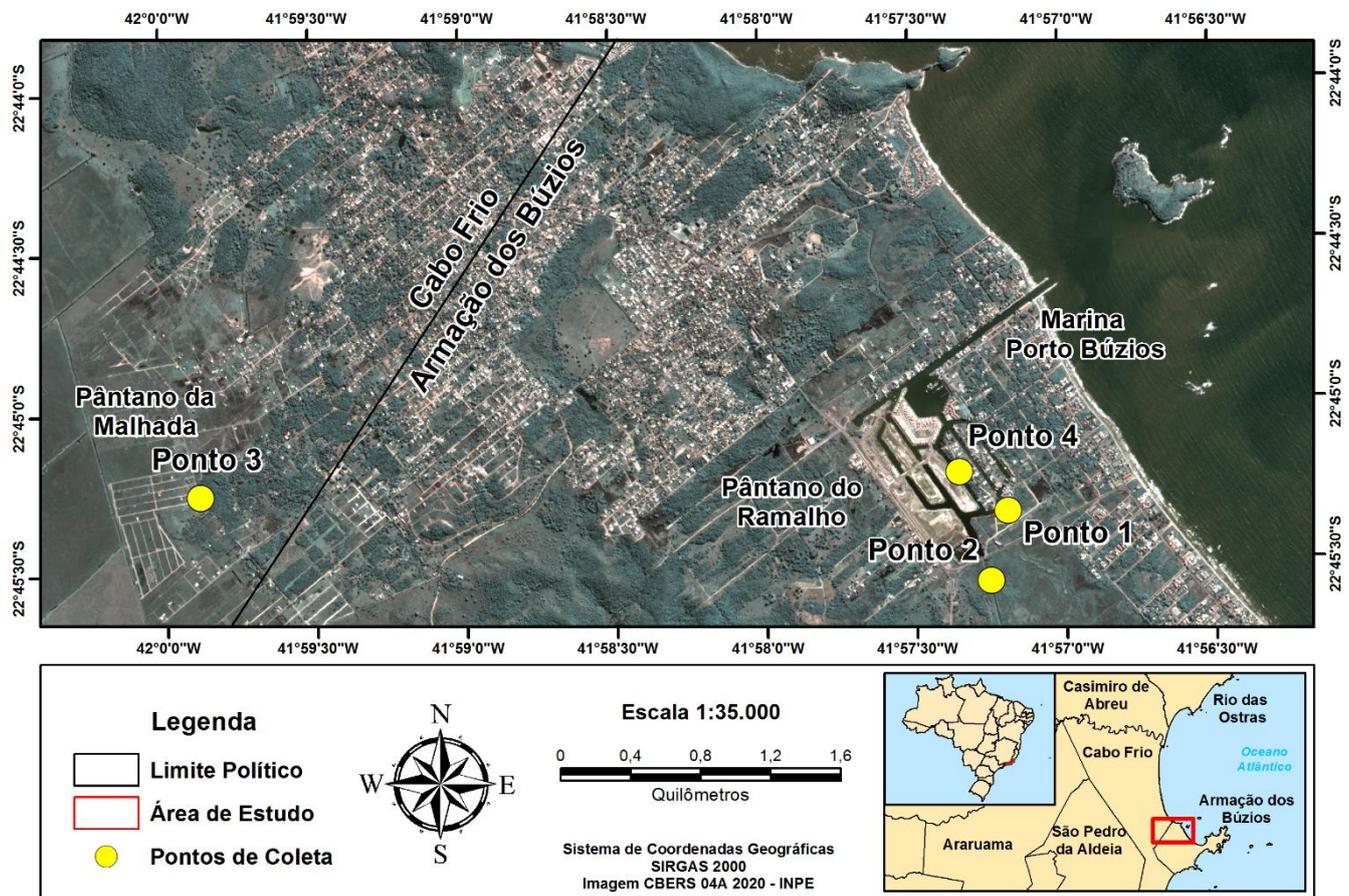


Figura 2. Localização dos 4 (quatro) pontos de coleta de amostras na Região dos Pântanos da Malhada e Ramalho, Municípios de Armação dos Búzios e Cabo Frio, Rio de Janeiro.

Os perfis sedimentológicos foram executados com a utilização de trado manual e trena métrica, visando definir a espessura de cada camada e coletar as amostras identificadas nas sucessões sedimentares analisadas. As análises granulométricas foram realizadas no Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente - LAGECOST do Departamento de Geologia e Paleontologia, Museu Nacional - UFRJ. A seguir, foram elaborados os perfis sedimentológicos, inserindo os aspectos faciológicos identificados e categorizados, desenhados através do *software* Corel Draw X7. A partir dos dados obtidos foi elaborada tabelas de fácies, contendo atributos referentes a código, diagnose, descrição e interpretação, conforme Della Fávera (2001).

As amostras de lama orgânica foram submetidas a tratamento palinológico e técnicas de processamento de acordo com protocolo proposto por Antunes (1997) para confecção de lâminas delgadas. Realizou-se a desagregação física de 40 g do material em elementos menores, de até 5,0 mm, visando reação com ácidos clorídrico e fluorídrico de forma mais eficaz. Após a etapa de fragmentação, utilizou-se ácidos para dissolução e eliminação de minerais inorgânicos presentes nas amostras, tendo como produto final o querogênio. Por fim, as lâminas palinológicas foram confeccionadas e os palinomorfos analisados no Laboratório de Paleoecologia Vegetal - LAPAV do Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional - UFRJ.

A amostra mais representativa de lama orgânica, correspondente ao Ponto 2 (Marina Porto Búzios) foi encaminhada ao Laboratório *Beta Analytic Inc*, Miami - Estados Unidos para datação ao radiocarbono. A técnica utilizada foi o *Percent Modern Carbon – pMC* (percentual de carbono moderno). Esta técnica é empregada quando o material analisado apresenta mais ¹⁴C do que o padrão de referência moderno (até 1950), sugerindo que o material analisado fazia parte de um sistema que respirava carbono após o teste nuclear, antes da década de 1950. A datação ao radiocarbono é essencialmente um método desenvolvido para medir radioatividade residual. Ao saber o quanto de ¹⁴C resta em uma amostra é possível inferir a idade do material. Os valores de $\delta^{13}C$ indicam a proporção de isótopos estáveis de carbono de ¹³C e ¹²C, sendo indicado em partes por mil (BRONK RAMSEY, 2009).

4. Resultados

Os perfis sedimentológicos-faciológicos caracterizam-se, de modo geral, por uma camada de areia média com concreções ferruginosas na base, seguida por lama arenosa maciça e areias lamosas com conchas inteiras de 0,2 e 0,3 cm de tamanho com indivíduos preservados em posição de vida. Sequencialmente, identificou-se areia fina com estratificação cruzada de baixo ângulo. No topo, observou-se camadas antrópicas ou de lamas orgânicas constituídas por foraminíferos marinhos recentes (Figura 3).

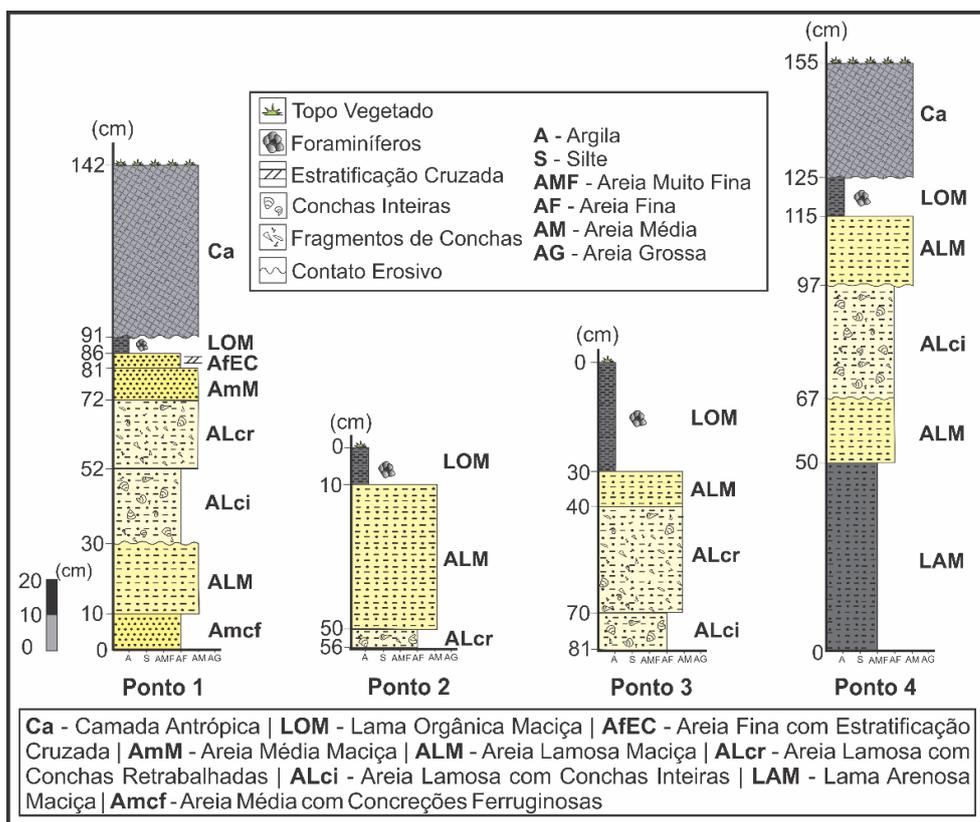


Figura 3. Perfis sedimentológicos dos pontos 1 a 4, contendo informações referentes a granulometria, estruturas, conteúdo fóssilífero e espessura das camadas sedimentares. Destaque para a camada LOM – Lama Orgânica Maciça, com conteúdo fóssilífero de foraminíferos, presente em todos os pontos do estudados.

A partir das análises, envolvendo padrão granulométrico e estrutura sedimentares, foi possível identificar 9 (nove) fácies. A Tabela 1 apresenta informações faciológicas, contendo atributos referentes a: código; diagnose; descrição e interpretação.

Tabela 1. Descrição das fácies identificadas nos perfis sedimentológicos realizados.

Código	Diagnose	Descrição	Interpretação
Ca	Camada antrópica	Camada de material remobilizado, contendo mistura das camadas descritas no perfil. Estrato arbustivo de aproximadamente 10 cm no topo.	Ambiente submetido a processos antrópicos com forte remobilização de material anteriormente depositado.
LOM	Lama Orgânica maciça	Camada de argila orgânica de coloração escura.	Ambiente de pântano costeiro.
AfEC	Areia fina com Estratificação Cruzada	Camada de areia fina a média, bem selecionada, grãos subarredondados a arredondados e coloração branco-cinzenta. Mineralogia constituída por quartzo e opacos. Estratificação cruzada de baixo ângulo.	Ambiente de praia dissipativa de baixa energia.
AmM	Areia média Maciça	Camada de areia média a fina, bem selecionada, grãos subangulosos a angulosos, com pequenas porções subarredondadas e coloração amarelada. Mineralogia constituída por quartzo e opacos em menor proporção.	Ambiente lagunar aberto com influência da ação de ondas e processos litorâneos.
ALM	Areia-Lamosa Maciça	Camada de areia média a fina, moderadamente selecionada, grãos subarredondados a subangulosos. Coloração cinzenta e partes amareladas. Mineralogia constituída predominantemente por quartzo.	Ambiente lagunar restrito, submetido a baixa agitação de ondas.
ALcr	Areia-Lamosa com conchas retrabalhadas	Camada de conchas, areia média e lama (silte e argila), mal selecionada, grãos de areia subarredondados a arredondados e coloração cinzenta. Conchas fragmentadas e conchas bem preservadas e em posição de vida. Coloração branca e mineralogia constituída predominantemente por quartzo.	Ambiente lagunar restrito, submetido ocasionalmente a ondas capilares e eólicas (vagas).
ALci	Areia Lamosa com conchas inteiras preservadas	Camada de conchas, areia média e lama (silte e argila), moderadamente selecionada, grãos de areia subarredondados a subangulosos e coloração cinzenta. Conchas brancas, bem	Ambiente lagunar de baixa energia. O processo deposicional marca a transgressão marinha.

		conservadas e predominantemente de bivalves. Mineralogia constituída predominantemente por quartzo. Camada bem compactada.	
LAM	Lama Arenosa Maciça	Camada de argila, silte e areia fina.	Ambiente lagunar restrito, submetido a baixa energia de ondas e marés.
Amcf	Areia média com conecções ferruginosas	Camada de areia média, bem selecionada, grãos subarredondados, e coloração amarelada. Apresenta conecções de ferro. Mineralogia constituída predominantemente por quartzo.	Ambiente continental sob influência de material rico em ferro, proveniente provavelmente da Formação Barreiras.

Conforme tratamento palinológico e técnicas de processamentos propostas por Antunes (1997), o arranjo sugere espécies de foraminíferos da subordem *Textulariina* e algumas formas de águas mixohalinas, com mistura de água marinha e doce. A Figura 4 apresenta algumas das espécies observadas nas lâminas de IOL (*Inner Organic Linning*). O indivíduo ilustrado em (A) mostra aberturas (*foram*) presentes; (B) e (C) Pseudoquitina de *Textularia sp.*, e *Trochammina sp.*

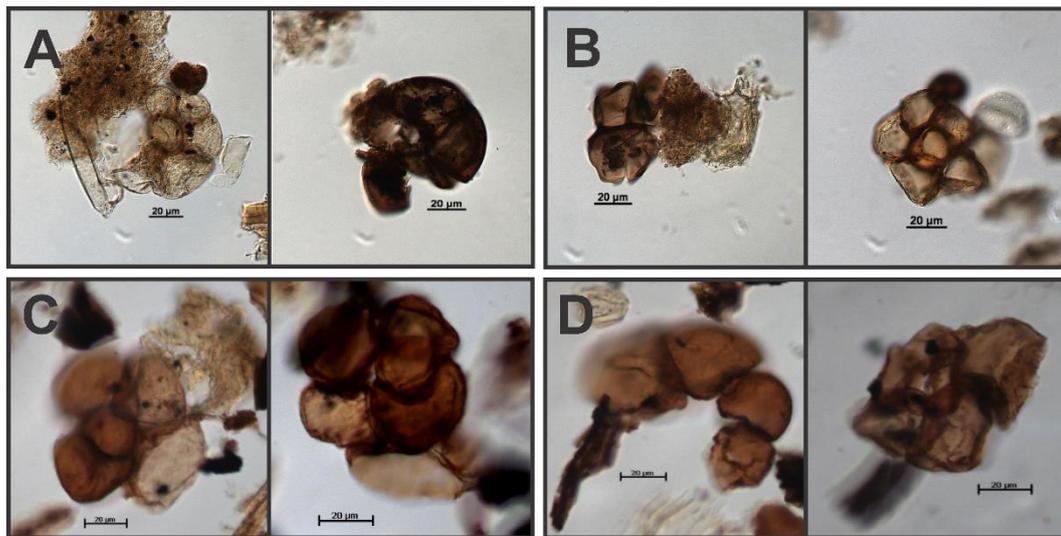


Figura 4. Espécies de foraminíferos observadas nas lâminas de IOL (Inner Organic Linning). A) Ponto 1; B) Ponto 2; C); Ponto 3; D) Ponto 4.

Do ponto de vista geocronológico, a idade da amostra mais representativa do material coletado em sedimentos constituídos por lama orgânica foi de 108 ± 0.3 pMC (percentual de carbono moderno). O valor isotópico de $\delta^{13}C_{\text{‰}}$ foi de -21,9. A tabela 2 apresenta a localização, coordenada geográfica, idade convencional, isótopos estáveis e laboratório, referente a amostra do Ponto 2 (Marina Porto Búzios).

Tabela 2. Datação ao radiocarbono ^{14}C da amostra de lama orgânica coletada no Ponto 2. Destaca-se os valores de idade convencional e ‰ de $\delta^{13}\text{C}$.

Localização	Coordenadas geográficas	Idade Radiocarbono Medida	Idade Convencional	Resultados dos Isótopos ‰	Laboratório
Ponto 2	22°45'35" S 41°57'13" O	109.0 ± 0.3 pMC	108,3 ± 0.3 pMC	$\delta^{13}\text{C} =$ - 21,9	Beta Analytic

5. Discussão

Análises dos perfis sedimentológicos-faciológicos, sugerem que a camada basal, constituída por concreções ferruginosas, associa-se a paleoambiente fluvial (CASTRO *et al.*, 2014). Camadas de lama arenosa maciças e areias lamosas com conchas inteiras, relacionam-se a transgressão máxima holocênica, ocorrida entre 6.260 e 4.819 anos cal AP (CUNHA *et al.*, 2018). Durante esse intervalo, o paleonível marinho, encontrava-se a 3,0 m acima do nível atual na costa do Sudeste Brasileiro (CASTRO *et al.*, 2014; CUNHA *et al.*, 2017). Análises faciológicas, apontam para ambiente lagunar com ampla conexão com o mar aberto, interrompido por ilhas barreiras (CABRAL; CASTRO; CUNHA, 2018). À medida que o nível do mar foi paulatinamente rebaixando, formaram-se os cordões litorâneos frontais, e na retaguarda, pântanos costeiros, posicionados pouco acima do nível marinho atual. No litoral da RLF por ocasião de eventos extremos, associados a tempestades, eventualmente ocorrem rupturas de cordões litorâneos frontais, favorecendo, inundação marinha parcial desses pântanos.

Conforme Scott, Medioli e Schafer (2001) pântanos e lagoas costeiras têm sido frequentemente associados à deposição de sedimentos decorrentes de inundações marinhas por ciclones, embora outros agentes de transporte possam resultar em depósitos de tipo semelhantes. Na tabela 1, foi identificada uma fácies de lama orgânica de coloração escura com forte presença de foraminíferos de origem marinha. A ocorrência de espécies de foraminíferos, nessa camada, sugere incursão marinha no pântano do Ramalho. Resultados obtidos por técnicas de percentual de carbono moderno - pMC e isótopos estáveis de carbono, apontam para inundação relativamente recente. Dos 4 (quatro) pontos analisados de acordo com a figura 2, somente no Ponto 2 (Marina Porto Búzios) localizado na retaguarda de cordões litorâneos frontais à 1000 m da linha de praia, foi possível obter resultados em pMC. Deste modo, a deposição da camada de lama orgânica escura com forte conteúdo de foraminíferos bentônicos é atribuída a um evento de grande inundação marinha, ocorrida durante um evento catastrófico (ciclone extratropical) datado em pMC, ocorrido no início do século XX.

Um dos proxies mais utilizados na identificação de paleociclones são os foraminíferos bentônicos (LANE; DONNELLY; WOODRUFF, 2011). Por ocasião de um ciclone extratropical, ondas de tempestades rompem barreiras arenosas, inundando ambientes de água doce com água marinha. Várias espécies bentônicas são carregadas para os pântanos e lagoas costeiras, depositando-se sobre lamas, após a passagem do evento de tempestade (SCOTT; MEDIOLI; SCHAFFER, 2001). Na área de estudo, foram identificados foraminíferos de subordem *Textulariina* e outras, de águas mixohalinas, sugerindo mistura de água marinha e água doce no horizonte LOM (Lama Orgânica Maciça). O material constituído por material lamoso orgânico teria sido, portanto, submetido a ação marinha, decorrente de eventos de tempestade. As espécies com grande *proloculum* indicam crescimento em condições de águas rasas e geração assexuada, consolidando a interpretação das condições de deposição desses sedimentos.

Segundo Cabral, Castro e Cunha (2018), os pântanos costeiros dessa região são abastecidos por água doce, proveniente do sistema de drenagem local. As incursões marinhas são muito episódicas e ocasionais. Ocorrem muito em função de rupturas de cordões litorâneos frontais por ação de ondas de tempestades. De acordo com Meyers (1994), valores de $\delta^{13}\text{C}$ no intervalo de - 22 a - 20‰ são tipicamente marinhos. Deste modo, o valor isotópico de $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ igual a - 21,9, indica forte influência marinha na área do Ponto 2 (Marina Porto Búzios). Resultados obtidos através de *pMC* e isótopos estáveis, corroboram informações referentes a passagem de ciclones extratropicais na cidade de Rio das Ostras em 2009, documentada por Castro, Fernandes e Dias (2011).

Datação ao radiocarbono envolvendo percentual de carbono moderno, ainda é uma técnica pouco conhecida no Brasil (CABRAL; CASTRO; CUNHA, 2018). Trata-se de um método inovador no âmbito da geocronologia aplicada a estudos de ambientes de sedimentação muito recentes. Nesse trabalho, procurou-se utilizar essa tecnologia em decorrência da ausência de registros históricos da época sobre ciclones extratropicais no sul e sudeste do Brasil. Com a evolução do conhecimento sobre as mudanças climáticas, faz-se necessário o uso desse tipo de ferramenta tecnológica, visando contribuir para melhoria dos modelos de previsão de cenários futuros sobre eventos ciclogênicos.

6. Conclusões

Foi investigada a hipótese da possível passagem de um evento catastrófico extremo, caracterizado por um ciclone extratropical, no início do século XX sobre os pântanos costeiros da Malhada e Ramalho, Região dos Lagos Fluminenses, Estado do Rio de Janeiro. Informações multi-proxies, apoiadas em dados sedimentológicos, faciográficos, palinológicos, geocronológicos e isotópicos, possibilitaram desenvolver uma abordagem abrangente sobre potenciais eventos históricos ciclogênicos nesse segmento do litoral brasileiro, obtidos a partir de testemunhos geológicos.

Os pântanos costeiros da RLF, em geral, caracterizam-se por terras baixas e planas, um pouco acima do nível médio do mar atual. São controlados do ponto de vista geomorfológico pela Formação Barreiras e rochas de embasamento cristalino, na retaguarda, e por cordões litorâneos frontais à linha de costa contemporânea. Essas condições favorecem a processos de inundações marinhas, decorrentes da ação de ondas de tempestade, impulsionadas em algumas ocasiões, por ciclones extratropicais. Estima-se que o tempo de recorrência desse tipo de evento episódico na região é de 8,0 a 10 anos.

A previsão precisa de inundações costeiras requer uma compreensão detalhada, envolvendo várias variáveis, apoiada em dados multi-proxies, obtidos através de técnicas analíticas bem difundidas nas geociências. Com isso, os resultados alcançados visam subsidiar e fornecer informações com o intuito de colaborar com o avanço do conhecimento sobre registros de passagens de ciclones extratropicais no sudeste brasileiro. As técnicas analíticas e ferramentas tecnológicas utilizadas nesse trabalho demonstraram-se eficientes e contribuem vigorosamente para a temática envolvendo a compreensão, impacto e previsão de eventos extremos no litoral brasileiro. As conclusões obtidas se revestem de caráter ímpar tendo em vista o impacto desses eventos episódicos sobre o litoral do Estado do Rio de Janeiro nos aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Contribuições dos Autores: C.L.C.: metodologia; software; validação; análise formal; pesquisa; preparação de dados; escrita de artigo; revisão. J.W.A.C.: metodologia; análise formal; recursos; supervisão; aquisição de financiamento. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES através da concessão de bolsa de pesquisa de mestrado ao autor principal (Processo N° 88882.425387/2019-01), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo N° 310567/2020-3 - Bolsa de produtividade em

pesquisa / Bolsista 1D CNPq - Projeto Desastres Naturais Associados a Processos de Erosão Costeira Acelerada e Soterramento por Dunas na Zona Costeira do Sudeste Brasileiro) e pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (Processo N° E-26/200.064/2019).

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Prof. Dr. Marcelo Araújo Carvalho do Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional (UFRJ) e Profa. Dra. Cátia Fernandes Barbosa do Departamento de Geoquímica da Universidade Federal Fluminense (UFF) pelo apoio na preparação de amostras e interpretação de lâminas delgadas.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. ANTUNES, R. L. **Introdução ao estudo dos nanofósseis calcários**. Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. 115p.
2. AREIAS, C.; SPOTORNO-OLIVEIRA, P.; BASSI, D.; RYU, Y.; NASH, M.; CASTRO, J.W.A.; TAMÊGA, F. T. S. Holocene sea-surface temperatures and related coastal upwelling regime recorded by vermetid assemblages, southeastern Brazil (Arraial do Cabo, RJ). **Marine Geology**, v. 425, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106183>
3. BRONK RAMSEY, C. Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. **Radiocarbon**, v. 51(1), p. 337-360, 2009. DOI. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
4. BULHÕES, E. M. R.; FERNANDEZ, G. B.; OLIVEIRA FILHO, S. R.; PEREIRA, T. C.; ROCHA T. B. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 05(2), p.155-165, 2014. DOI. <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v5i2.36460>
5. CABRAL, C. L.; CASTRO, J. W. A.; CUNHA, A. M. Registros das Variações do Nível Relativo do Mar na Península de Armação dos Búzios, Rio de Janeiro: Análise de Dados Faciológicos e Geocronológicos. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 41, p. 130-141, 2018. DOI http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_130_141
6. CALLIARI, L. J.; TOZZI, H. A. M.; KLEIN, A. H. F. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surge in Southern Brazil - Rio Grande to Chuí, RS. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, v. 70, n. 2, 1998.
7. CASTRO, J. W. A.; SENRA, M. C. E.; RAMOS, R. R. C. Coquinas da paleolaguna da Reserva Tauá-Pântano da Malhada, RJ - Um registro de optimum climático holocênico. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E. T.; CAMPOS, D. A.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S. (Edit.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. SIGEP / UNESCO. 2ed. Brasília: UNB, p. 1-8, 2009.
8. CASTRO, J. W. A.; SUGUIO, K.; SEOANE, J. C. S.; CUNHA, A. M.; DIAS, F. F. Sea level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. v. 86 (2), p. 671 – 683, 2014. DOI. 10.1590/0001-3765201420140007
9. CASTRO, J.W.A. The morphodynamics behaviour of a cross-shore smndbar in a Microtidal environment, Anjos Cove, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro – Brazil. In: BOTERO, C. M., CERVANTES, O. D., FINKL, C.W. (Eds), **Beach management tools - Concepts, methodologies and case studies**. Coastal Research Library 24. Springer, 745 p, 2018. DOI. 10.1007/978-3-319-58304-4_16
10. CASTRO, J.W.A.; FERNANDES, D.; DIAS, F.F. Monitoramento do Processo de Erosão Costeira na Praia das Tartarugas, Rio das Ostras - Estado do Rio de Janeiro/ Brasil: Aplicação de Metodologia Quantitativa. **Revista de Gestão Costeira Integrada**. 11 (3): 355 – 368. 2011. DOI 10.5894/rgci276

11. CUNHA, A. M.; CASTRO, J. W. A.; PEREIRA, F. M. B.; CARVALHO, M. A.; SUGUIO, K. Variações do nível relativo do mar durante o Holoceno na Bacia do Rio Una, Cabo Frio - Rio de Janeiro: Aspectos Sedimentológicos, faciológicos e geocronológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.18, N^o.1, p.143-154, 2017. DOI. 10.20502/rbg.v18i1.1039
12. CUNHA, A. M.; CASTRO, J. W. A.; CARVALHO, M. A. Holocene shell accumulations from the Cabo Frio coastal plain, southeastern Brazil: taxonomy, taphonomy, geochronology and paleoenvironmental implications. **Ameghiniana**, 55, 55-74. 2018. DOI. 10.5710/AMGH.27.07.2017.2979
13. DAVIS Jr., R. A. 1985. **Coastal Sedimentary Environments**. Springer, New York: p. 716.
14. DELLA FÁVERA, J. C. **Fundamentos de Estratigrafia Moderna**. EdUERJ, Rio de Janeiro, 2001. 264p.
15. GYLLENCREUTZ R.; MAHIQUES M. M.; ALVES D. V. P. & WAINER I. K. C. Mid- to Late-Holocene Paleoceanographic Changes on the Southeastern Brazilian Shelf Based on Grain Size Records. **The Holocene**, 20(6): 863 - 875. 2012 DOI. 10.1177/0959683610365936
16. INNOCENTINI, V.; ARANTES, F. O.; PRADO, S. C. C. Modelo de Ondas Aplicado ao Caso 5-8 de Maio de 2001. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18 (01), p. 97-104, 2003.
17. KLUMB-OLIVEIRA, L. A. **Variabilidade Interanual do Clima de Ondas e Tempestades e Seus Impactos Sobre a Morfodinâmica de Praias do Litoral Sudeste do Estado do Rio De Janeiro**. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015. 105p.
18. LAMBERT, S. J. A. Cyclone Climatology of the Canadian Centre General Circulation Model. **Journal of Climate**, v. 1, p. 109-115, 1988. DOI. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1988\)001<0109:ACCOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1988)001<0109:ACCOTC>2.0.CO;2)
19. LANE, P.; DONNELLY, J.P.; WOODRUFF, J.D. A decadal-resolved paleohurricane record archived in the late Holocene sediments of a Florida sinkhole. **Marine Geology**, 287(1-4): 14 -30, 2011. DOI. 10.1016/j.margeo.2011.07.001
20. LINS-DE-BARROS, F. M.; KLUMB-OLIVEIRA, L.; LIMA, R. F. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do Estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v.18(2), p. 85-102, 2018. DOI. 10.5894/rgci-n146
21. MARTIN, L.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Geologia do Quaternário Costeiro do litoral norte do Estado do Rio de Janeiro e Espírito Santo**. CPRM, 1997. 125p.
22. MEYERS, P. A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. **Chemical Geology**, n. 114, p. 289-302, 1994. DOI. 10.1016/0009-2541(94)90059-0
23. MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 155-166, 1991a.
24. MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 167-180, 1991b.
25. NOTT, J.; HAYNE, M. High frequency of 'super-cyclones' along the Great Barrier Reef over the past 5,000 years. **Nature**, v. 413, p. 508-512, 2001. DOI. 10.1038/35097055
26. NOTT, J.; SMITHERS, S.; WALSH, K.; RHODES, E. Sand beach ridges record 6000 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia. **Quaternary Science Reviews**, v. 28, p. 1511-1520, 2009. DOI. 10.1016/j.quascirev.2009.02.014
27. ODA, T. O. **Efeitos da Distribuição Espaço-Temporal da Temperatura do Mar no Desenvolvimento de Ciclones Extratropicais**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005. 125p.

28. PIVA, E. **Estudo de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-8498-TDI/781. 2001. 162p.
29. REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade.** Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. 2008. 316p.
30. SCHMITT, R. D.; TROUW, R. A.; SCHMUS, W. R.; ARMSTRONG, R. B.; STANTON, N. S. The tectonic significance of the Cabo Frio Tectonic Domain in the SE Brazilian margin: a Paleoproterozoic through Cretaceous saga of a reworked continental margin. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46(Suppl 1), p. 37-66, 2016. DOI. 10.1590/2317-4889201620150025
31. SCOTT, D.B.; MEDIOLI, F.S.; SCHAFFER, C.T. **Monitoring in Coastal Environments Using Foraminifera and Thecamoebian Indicators.** Cambridge: Cambridge University Press. 2001, 133 p DOI. 10.1017/CBO9780511546020
32. SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. **Australian Meteorological Magazine**, v. 47, p. 309-320, 1998.
33. SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Simulación de 10 ciclogênese costeras sobre Sudamérica utilizando un modelo regional. **Meteorologica**, v. 22 (2), p. 49-66, 17, 1997.
34. SILVA, A.C. **Dinâmica Batimétrica e Sedimentológica da Região do Cabo Frio, Estado do Rio de Janeiro.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.157p.
35. SILVA, L.W.; DEREZYNKI, C. P. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências UFRJ**, v. 37 - 2, p.123-138, 2014. DOI. 10.11137/2014_2_123_138
36. VAZ, S. R. **Monitoramento do Aquífero Costeiro do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, Estado do Rio de Janeiro: Avaliação do Comportamento da Cunha Salina.** Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2019. 151p.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.