



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA – UNEB
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA- CAMPUS I
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA APLICADA

THAINÁ SOUZA COSTA

**Avaliação das razões de Sr/Ca e B/Ca em exoesqueletos de corais da espécie
Siderastrea stellata do Atlântico Sul Tropical**

SALVADOR

2024

THAINÁ SOUZA COSTA

**Avaliação das razões de Sr/Ca e B/Ca em exoesqueletos de corais da espécie
Siderastrea stellata do Atlântico Sul Tropical**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Química Aplicada da Universidade do Estado da Bahia, orientada pelo Prof. Dr. Natan Silva Pereira como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química. Área: Química Ambiental/ Geoquímica.

SALVADOR

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA

Biblioteca Professor **Edivaldo Machado Boaventura - UNEB – Campus I**

Bibliotecária: Célia Maria da Costa – CRB5/918

C837a Costa, Thainá Souza

Avaliação das razões de Sr/Ca e B/Ca em exoesqueletos de corais da espécie
Siderastrea stellata do atlântico sul tropical / Thainá Souza Costa . – Salvador, 2024.

57 f. : il.

Orientador: Natan Silva Pereira.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade do Estado da Bahia.
Departamento de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Química
Aplicada – PGQA. Campus I. 2024.

Contém referências.

THAINÁ SOUZA COSTA

Avaliação das razões de Sr/Ca e B/Ca em exoesqueletos de corais da espécie
Siderastrea stellata do Atlântico Sul Tropical

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Química Aplicada da Universidade do Estado da Bahia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Química. Área: Química Ambiental/Geoquímica.

APROVADA EM ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. NATAN SILVA PEREIRA (ORIENTADOR)

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA

PROF. DR. MADSON DE GODOI PEREIRA (MEMBRO INTERNO)

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA

PROF. DR. RENÊ JOTA ARRUDA DE MACEDO (MEMBRO EXTERNO)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jeová Deus por tudo, por me proporcionar mais uma etapa acadêmica e está comigo sempre na minha vida, sem a permissão dele não estaria onde estou.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Natan Pereira, um grande exemplo de professor, pesquisador, orientador e uma pessoa ímpar. Me trouxe muitos conhecimentos e aprendizagem. Quero agradecer de coração por todo o apoio. Muito obrigada mesmo!

Ao meu esposo e companheiro Luiz Ricardo, obrigada pela compreensão e por acreditar em mim, mesmo quando até eu duvidei. Obrigada pela paciência e pelos puxões de orelha quando necessário.

Aos meus pais, Aurea e Joílson, que sempre acreditaram em mim e tudo que sou hoje agradeço a vocês pelos incentivos e pela educação.

À minha grande e querida família, obrigada pelo apoio. Em especial a meu avô que não está mais entre nós, mas sempre acreditou no meu potencial.

À minhas tias emprestadas Aneide e Marcele, por vibrarem comigo em mais uma conquista e me darem o encorajamento necessário para que eu não desistisse.

As minhas amigas e aos amigos em especial aqueles que me acompanharam desde a graduação até aqui Ismirna, Josy, Amanda, Alex, Jonh e em especial a Mônica e Mylena. Ao reencontro com um professor e hoje amigo de mestrado Luciano, ficam aqui meu muito obrigada por tudo.

A todos que contribuíram nessa linda jornada, muito obrigada!

Ao Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada PGQA, obrigada por existir e possibilitar essa experiência.

À FAPESB pela bolsa concedida.

Enfim, sinto-me grata, muito grata.

Resumo

Os corais do grupo Scleractinia podem viver centenas de anos em ambientes marinhos tropicais e durante esse período, informações geoquímicas são incorporadas em seus exoesqueletos. Tais registros geoquímicos, como elementos traços e razões isotópicas (e.g. Sr/Ca, Mg/Ca, isótopos estáveis de O e C), servem como proxies para determinadas condições e desempenham um importante papel nas investigações sobre as mudanças climáticas e ambientais em regiões tropicais. Neste trabalho foram utilizadas duas colônias de corais coletadas na Baía de Todos os Santos – BTS (códigos atribuídos: FT1 e FT2) e uma em Abrolhos (código atribuído: SA) para análises de razões de Sr/Ca e B/Ca por técnicas de ICP-MS. Dados de Sr/Ca para as colônias de BTS apresentaram variabilidade 8,95 a 9,29 mmol/mol, com média de $9,12 \pm 0,09$ mmol/mol para colônia FT1 e 8,82 a 9,31 mmol/mol, com média de $9,10 \pm 0,11$ mmol/mol para a colônia FT2. Para colônia de Abrolhos apresentaram variabilidade 8,84 a 9,37 mmol/mol, com média de $9,19 \pm 0,08$ mmol/mol. Dados de B/Ca para BTS apresentaram variabilidade 0,48 a 0,60 mmol/mol, com média de $0,55 \pm 0,04$ mmol/mol para colônia FT1 e 0,48 a 0,57 mmol/mol, com média de $0,51 \pm 0,03$ mmol/mol para a colônia FT2. Para colônia de Abrolhos, observou-se variabilidade 0,45 a 0,59 mmol/mol, com média de $0,51 \pm 0,03$ mmol/mol. A correlação entre os dados de Sr/Ca e B/Ca foi boa para colônia FT1 ($r = 0,71$) e ruim para as colônias FT2 ($r = 0,21$) e SA-1 ($r = 0,10$). A correlação entre os dados de B/Ca e temperatura foi boa para as colônias FT1 ($r = -0,77$) e FT2 ($r = -0,77$) e moderada para SA-1 ($r = -0,57$). A correlação entre os dados de Sr/Ca e temperatura foi boa para a colônia FT1 ($r = -0,73$) e ruim para FT2 ($r = -0,21$) e SA-1 ($r = -0,06$). Os dados das razões de B/Ca apresentaram sazonalidade melhores que os das razões de Sr/Ca, sendo compatível com a variação anual da temperatura do mar. Assim, neste trabalho, sugerimos que dados de B/Ca podem ser utilizados como proxies para temperatura.

Palavras-chave: Arquivos naturais; mudanças climáticas; Geoquímica de corais; Paleoclimatologia.

Abstract

Corals from the Scleractinia group have been observed to live for hundreds of years in tropical marine environments. During this period, geochemical information is incorporated into their exoskeletons. Such geochemical records, including trace elements and isotopic ratios (e.g. Sr/Ca, Mg/Ca, stable isotopes of O and C), serve as proxies for certain conditions and play an important role in investigations into climate and environmental changes in tropical regions. In this study, two coral colonies were collected from Baia de Todos os Santos (BTS) and one from Abrolhos (SA). The BTS colonies were assigned the codes FT1 and FT2, while the SA colony was assigned the code SA. The Sr/Ca and B/Ca ratios were analysed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The Sr/Ca data for the BTS colonies exhibited considerable variability, ranging from 8.95 to 9.29 mmol/mol. The average Sr/Ca ratio for the FT1 colony was 9.12 ± 0.09 mmol/mol, while the average for the FT2 colony was 9.10 ± 0.11 mmol/mol. For the Abrolhos colony, the variability ranged from 8.84 to 9.37 mmol/mol, with an average of 9.19 ± 0.08 mmol/mol. The B/Ca data for BTS exhibited variability between 0.48 and 0.60 mmol/mol, with an average of 0.55 ± 0.04 mmol/mol for the FT1 colony and between 0.48 and 0.57 mmol/mol, with an average of 0.51 ± 0.03 mmol/mol for the FT2 colony. For the Abrolhos colony, the variability ranged from 0.45 to 0.59 mmol/mol, with an average of 0.51 ± 0.03 mmol/mol. The correlation between Sr/Ca and B/Ca data was good for colony FT1 ($r = 0.71$), but poor for colonies FT2 ($r = 0.21$) and SA-1 ($r = 0.10$). The correlation between B/Ca and temperature data was found to be good for colonies FT1 ($r = -0.77$) and FT2 ($r = -0.77$), while it was poor for SA-1 ($r = -0.57$). The correlation between Sr/Ca and temperature data was good for colony FT1 ($r = -0.73$) and poor for FT2 ($r = -0.21$) and SA-1 ($r = -0.06$). The data on B/Ca ratios exhibited greater seasonality than those on Sr/Ca ratios, demonstrating compatibility with the annual variation in sea temperature. Consequently, in this study, we propose that B/Ca data can be employed as proxies for temperature.

Keywords: Natural archives; climate changes; Coral geochemistry; Paleoclimatology.

Sumário

1. Introdução	11
1.1. Objetivos	12
1.1.1. Objetivo geral	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
2. Referencial Teórico	12
2.1. Mudanças climáticas	12
2.2. Ecossistemas recifais: importância e vulnerabilidade	14
2.3. Geoquímica de corais como proxies ambientais	16
2.3.1. Sr/Ca em corais	17
2.3.2. B/Ca em corais	19
2.4. Geoquímica de corais no Atlântico Sul tropical	20
2.5. Diversidade de corais brasileiros e seu desafio para reconstruções climáticas	22
2.6. Vulnerabilidade de ecossistemas marinhos às mudanças climáticas	23
3. Metodologia	24
3.1. Área de Estudo	24
3.2. Etapas de Laboratório	25
3.2.1. Raios-X e Taxa de crescimento	26
3.2.2. Microamostragem de carbonato	27
3.2.3. Análise por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)	28
3.3. Análises Estatísticas	29
3.3.1. Modelagem de idade e taxa de crescimento	29
4. Resultados	30
4.1. Taxa de crescimento e modelo de idade	30
4.1.1. BTS 1	30
4.1.2. Abrolhos	32
4.2. TSM	32
4.2.1. BTS	32
4.2.2. Abrolhos	33
4.3. Dados geoquímicos coral BTS 1	33
4.3.1. Sr/Ca	33
4.3.2. B/Ca	33
4.3.3. Correlação dos dados geoquímicos	34
4.4. Dados geoquímicos coral BTS	35

4.4.1.	Sr/Ca.....	35
4.4.2.	B/Ca.....	35
4.4.3.	Correlação dos dados geoquímicos.....	36
4.5.	Dados geoquímicos coral Abrolhos.....	37
4.5.1.	Sr/Ca.....	37
4.5.2.	B/Ca.....	37
4.5.3.	Correlação dados geoquímicos.....	38
5.	Discussões.....	39
5.1.	Variabilidade da relação elementar com a temperatura.....	40
5.1.1.	Sr/Ca.....	40
5.1.2.	B/Ca.....	42
6.	Conclusões.....	44
7.	Bibliografias.....	45

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localização geográfica das regiões onde as colônias foram coletadas, Baía de Todos os Santos (BTS) e Abrolhos (SA)	25
Figura 2. Lâminas da Colônias de corais extraídas (a) YCB-SS-01-2D e (b) YCB-SS-05-F coletados na Baía de Todos os Santos e Abrolhos, respectivamente	26
Figura 3. Lâminas dos corais FT (a)e SA (b) coletados na Baía de Todos os Santos e Abrolhos, respectivamente.....	27
Figura 4. Microfuradeira (Micromill) com a amostra obtida de uma única parede de coralito da colônia de coral.	28
Figura 5. ICP-MS Espectrometria massa com plasma indutiva acoplado, no Laboratório da Universidade de Metropolitana de Manchester, Reino Unido.....	29
Figura 6. Registro do crescimento do coral Colonia FT1 B/Ca está representado em vermelho e Sr/Ca em azul. As faixas na vertical em rosa correspondem a alizarina do coral data em fevereiro de 2012 e novembro de 2010.....	30
Figura 7. Registro do crescimento do coral Colonia FT2 B/Ca está representado em vermelho e Sr/Ca em azul. As faixas na vertical em rosa correspondem a alizarina do coral data em fevereiro de 2012 e novembro de 2010.....	31
Figura 8. Registro do crescimento do coral Colônia SA onde o B/Ca está representado em vermelho e Sr/Ca em azul.	32
Figura 9. (a) Série temporal entre a razão de Sr/Ca, B/Ca e SST do coral FT1 coletado na Baía de todos os Santos. (b) Correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca (c) Correlação linear entre Sr/Ca e SST (d) Correlação linear entre B/Ca e SST	34
Figura 10. (a) Série temporal do Sr/Ca, B/Ca e SST do coral FT2 coletado na Baía de todos os Santos. (b) Correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca (c) Correlação linear entre Sr/Ca e SST (d) Correlação linear entre B/Ca e SST	36
Figura 11.(a) Série temporal do Sr/Ca, B/Ca e SST do coral SA coletado em Abrolhos. (b) Correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca (c) Correlação linear entre Sr/Ca e SST (d) Correlação linear entre B/Ca e SST.....	38

1. Introdução

A compreensão das mudanças climáticas passadas é importante para avaliar o impacto das atividades humanas no clima atual e tentar antecipar as consequências em relação ao futuro. Nesse contexto, a calibração de paleotermômetros é essencial para reconstruir as variações de temperatura em períodos anteriores. O uso de corais como registros paleoclimáticos oferece uma oportunidade para estender a compreensão do clima em escala temporal mais ampla.

A calibração de um paleotermômetro baseado na relação elemento/cálcio (X/Ca) da espécie de coral *Siderastrea stellata* é um processo fundamental na pesquisa de reconstrução climática. Os corais são arquivos naturais de variações climáticas ao longo do tempo devido à sua capacidade de incorporar elementos químicos em seus esqueletos em resposta a mudanças nas condições ambientais.

Ao ser contrastado com outros materiais, como sedimentos do leito marinho ou amostras de gelo, o esqueleto coralino se destaca como a única fonte que permite reconstruir as variações paleoambientais ao longo de um espectro de tempo que se estende desde meses até séculos. (Mitsuguchi 2000).

Desde a década de 1970, quando se desvendou o padrão de crescimento dos corais (Knutson et al., 1972), a biogeoquímica avançou significativamente no desenvolvimento de reconstruções paleoambientais. Tornou-se evidente que os corais abrigam informações valiosas capazes de revelar condições ambientais passadas, oferecendo perspicácia tanto sobre os oceanos quanto sobre a atmosfera. Consequentemente, eles se firmaram como ferramentas cruciais na compreensão das oscilações climáticas na história dos oceanos ao longo dos últimos séculos (Schrag; Linsley, 2002; Carricart-Ganivet et al., 2007).

O coral *Siderastrea stellata* é uma espécie particularmente importante para esse tipo de pesquisa devido à sua distribuição geográfica e ao seu potencial para fornecer registros de longo prazo das temperaturas da água do mar em regiões tropicais e subtropicais. No entanto, a calibração de um paleotermômetro baseado em Elemento/Ca é um processo complexo que requer a coleta cuidadosa de amostras de corais, análises laboratoriais precisas e a correlação dos dados resultantes com registros

de temperatura histórica. Essa calibração é necessária para estabelecer a relação entre a concentração de Elemento/Ca nos corais e as temperaturas da água do mar durante o período de crescimento do coral.

A reconstrução de temperaturas do passado usando razão Elemento/Ca de corais da espécie *Siderastrea stellata* pode ajudar a entender as mudanças climáticas passadas, as oscilações climáticas naturais e o impacto das atividades humanas no oceano. Assim, a calibração desse paleotermômetro é essencial para garantir que as reconstruções climáticas sejam precisas e confiáveis.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo avaliar as relações de Sr/Ca e B/Ca e correlacionar sua variabilidade ao longo do exoesqueleto de corais da espécie *Siderastrea stellata* com dados de temperatura da superfície do mar. Além disso, pretende-se verificar a validação para um novo paleotermômetro confiável.

1.1.2. Objetivos específicos

- i. Verificar a correlação entre B/Ca com a temperatura da superfície do mar
- ii. Construir relações temporais com os dados geoquímicos

2. Referencial Teórico

2.1. Mudanças climáticas

As mudanças climáticas surgem como um dos maiores obstáculos enfrentados pela humanidade no século XXI, com implicações profundas para os ecossistemas globais e a diversidade de vida das futuras gerações. O conhecimento dessas transformações complexas e suas origens têm sido ampliada através de estudos de reconstruções ambientais, os quais têm contribuído para demonstrar padrões climáticos já conhecidos e por meio da relação entre atividades humanas e alterações no clima.

O Programa United Nations Environment Programme (UNEP 2021), informou que aproximadamente 40% da população estavam sendo afetados pela deterioração dos ambientes naturais, diante da intensa pressão nos trópicos. Práticas insustentáveis de trato da terra, combinados com as mudanças climáticas, são os principais fatores que contribuem para a deterioração dos habitats naturais do mundo, áreas onde a qualidade ambiental é degradada juntamente com atividades humanas, como mineração ou extração de petróleo, responsáveis por provocarem os fenômenos de desertificação (Leite, 2022).

A crise climática, com seus múltiplos impactos, tem sido objeto de crescente preocupação internacional desde os anos 1990. Fenômenos como o aquecimento global e a acidificação dos oceanos não apenas causam danos diretos aos ecossistemas e às sociedades, mas também desencadeiam ciclos de retroalimentação que amplificam seus efeitos. Segundo Souza e Corazza (2017), "isso se potencializa ao surgirem ciclos de retroalimentação, ou seja, quando um fenômeno decorrente desta problemática, resulta em causa ou efeito de outro e assim sucessivamente".

O IPCC (2022) alerta para a urgência de ações de mitigação, como a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), para evitar os piores cenários. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), assinada em 1992, e o Protocolo de Kyoto, de 1997, marcaram o início de um esforço global para cooperar na luta contra as mudanças climáticas. No entanto, os desafios persistem, exigindo uma intensificação das ações de todos os atores envolvidos, como apontam Souza e Corazza (2017, p. 7) ao discutirem as metas de redução de gás carbônico estabelecidas no Protocolo de Kyoto.

O objetivo central do Protocolo de Kyoto era frear o aumento do progresso das concentrações de GEE na atmosfera. Além das metas de redução, o protocolo introduziu mecanismos de flexibilidade, quanto ao Comércio de Emissões, à Implementação Conjunta (IC) e ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), para consentir que os países atingissem suas metas de técnica mais flexível e eficiente (Deutsche, 2020). O Protocolo de Kyoto entrou em ação em 16 de fevereiro de 2005, logo após ser confirmado por um número satisfatório de países. Notavelmente, os Estados Unidos decidiram não sancionar o protocolo, levantando preocupações sobre seu impacto econômico (Deutsche, 2020).

O protocolo estabeleceu períodos de obrigações, sendo inicialmente o primeiro de 2008 a 2012. Após esse período, as negociações climáticas continuaram resultando no Acordo de Paris em 2015. Esta última obrigação mundial visou fechar o progresso da temperatura global abaixo de 2 graus Celsius (Guitarrara, 2020).

Existe um estreito relacionamento entre a agricultura e as alterações climáticas, tanto em estipulação de causas quanto de efeitos. A agricultura é um dos principais contribuintes para as emissões do efeito estufa (GEE) e para as alterações climáticas. A variação tem sido associada a perdas de repartição agrícola. Portanto, é básico que os produtores rurais contribuam com a realização de alternativas que os ajudem a mitigar o avanço das mudanças climáticas (Langa, 2021).

2.2. Ecossistemas recifais: importância e vulnerabilidade

Um dos ecossistemas marinhos mais diversos e produtivos são os recifes de coral. Numerosos bens e serviços ambientais, incluindo a produção de alimentos, a proteção costeira, o crescimento econômico através do turismo, a reposição dos estoques pesqueiros, a captura de carbono e a preservação da biodiversidade marinha, são proporcionados pelos corais (Lima, 2015).

A degradação dos ecossistemas recifais tem sido uma grande preocupação global devido ao valor social e ecológico dos recifes para o meio natural. Para garantir a continuidade desses ecossistemas e dos bens e serviços que eles fornecem à sociedade, é essencial que estudos sejam realizados para melhor compreender sua estrutura e função (Lima, 2015).

Uma em cada quatro espécies marinhas pode ser encontrada vivendo em recifes de corais, tornando-os um ponto de referência para compreensão da biodiversidade. Como lares e refúgios naturais de diversas espécies, eles têm grande significado para os humanos, tendo em vista que várias espécies pescadas tanto por pescadores comerciais como recreativos podem gerar milhões de dólares (Moura, 2018).

No entanto, a preocupação com tais configurações é bastante nova, sendo discutida há apenas algumas décadas. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, os cientistas mostraram que os ambientes têm sido submetidos a níveis alarmantes de influência antropogênica. Desta forma, a preocupação em manter esses ecossistemas

saudáveis aumentou de forma considerável, impulsionando novas iniciativas de conservação (Brasil, 2006).

O monitoramento de recifes de coral é especialmente importante devido à correlação encontrada entre eventos de branqueamento, fenômeno que vem danificando os recifes de coral no mundo todo, e mudanças climáticas globais. As concentrações de dióxido de carbono na atmosfera têm aumentado nas últimas décadas em uma taxa de várias ordens de magnitude acima dos valores calculados para os últimos 400 mil anos, o que comprova mudanças climáticas não somente como um fato, mas também porque já apresentam suas consequências (Hoegh-Guldeberg, 2004, pag. 12).

Nos últimos anos, um fenômeno amplamente estudado e observado nos recifes de corais é o branqueamento. Este evento é de grande relevância, pois transcende a diversidade e envolve a remoção de algas simbióticas unicelulares, conhecidas como espécies zooxanteladas, dos tecidos dos cnidários. O branqueamento dos recifes de corais, fenômeno amplamente estudado e observado nos últimos anos, é de grande relevância devido à sua abrangência global. A compreensão e a mitigação desse fenômeno tornam-se imperativas para preservar esses ecossistemas marinhos cruciais (Lima, 2015; Moura, 2018).

A remoção destes organismos tem um impacto negativo na produção do esqueleto de carbonato de cálcio, podendo levar a morte de uma colônia inteira. O branqueamento e outras doenças, que atingem esse ecossistema, são principalmente atribuídos ao aquecimento dos oceanos, em virtude do aquecimento global, aumento da acidez da água e negligência de preservação desses ecossistemas. A continuidade desse cenário resultará em uma perda massiva de biodiversidade nas próximas décadas (Moura, 2018).

Além disso, o aumento da acidez da água, resultado da absorção de dióxido de carbono pelos oceanos, agrava ainda mais a vulnerabilidade dos recifes de corais. A conscientização e a implementação de medidas para combater as causas subjacentes desses problemas são cruciais para garantir a sobrevivência e a vitalidade dos recifes de corais (Eça *et al*, 2012).

2.3. Geoquímica de corais como proxies ambientais

A geoquímica de corais é uma ferramenta valiosa na pesquisa ambiental, especialmente na investigação de mudanças climáticas e na avaliação da qualidade da água nos ecossistemas de recifes de coral. Corais são organismos marinhos que constroem seus esqueletos a partir de carbonato de cálcio (CaCO_3) e esses esqueletos registram informações valiosas sobre as condições ambientais ao longo do tempo. O conteúdo geoquímico dos corais pode ser usado para diferentes proxies ambientais, o que significa que suas características químicas e isotópicas refletem as condições do ambiente em que cresceram (Grottoli and Swart 2003).

Compreender as transformações ambientais que aconteceram no planeta é de suma importância, pois desvenda o passado climático da Terra auxiliando na compreensão do presente e antecipando o futuro. De acordo com James Hutton, considerado o pai da geologia moderna e defensor da teoria uniformitarista, o presente é a chave para compreender o passado. Isso implica que muitos dos fenômenos que observamos hoje já ocorreram em épocas e períodos geológicos anteriores. Essa concepção representa um dos princípios fundamentais da geologia moderna e é essencial para entender como os registros das mudanças climáticas no passado contribuem para prever as mudanças climáticas no futuro (Grotzinger; Jordan, 2013).

Assim, entram em cena os "proxies" (i.e. informações indiretas sobre uma determinada variável ambiental), que desempenham um papel fundamental na coleta e identificação de informações acerca da história climática do nosso planeta. Através desses dados, é possível obter informações relacionadas a diversos aspectos, como temperatura, precipitação, níveis de dióxido de carbono (CO_2), distribuição de vegetação, configuração dos continentes, extensão das camadas de gelo, composição da atmosfera, erupções vulcânicas e mudanças na química dos oceanos. Por exemplo, para avaliar o aumento atual da concentração de carbono na atmosfera, o que pode ser uma das causas do aquecimento global, é necessário conhecer a concentração desse gás no período pré-industrial, ou seja, antes da era em que existem registros instrumentais confiáveis. Essa informação só é acessível por meio da análise de estudos que utilizam dados proxies (conforme discutido por Brandley; Eddy, 1989).

O uso de razões elementais e isotópicas como indicadores naturais de origens e

processos dinâmicos tem sido amplamente adotada em estudos multidisciplinares colaborativos (Caxito; Silva, 2015). Isótopos estáveis são uma presença comum na natureza, e, semelhante a diversos elementos traço, sua incorporação e concentração no esqueleto dos corais variam conforme o ambiente onde os corais habitam (Smith et al., 1979; Cross; Cross, 1983; Shen; Boyle, 1987; Shen; Dunbar, 1995; Hart; Cohen, 1996).

2.3.1. Sr/Ca em corais

Devido ao extenso tempo de residência do estrôncio e do cálcio nos oceanos globais, que equivale a 6 e $0,7 \times 10^6$ anos, respectivamente (Pilson, 1998), geralmente se considera que a razão Sr/Ca não tenha variado nas escalas temporais abordadas pela maioria dos estudos de reconstrução paleoclimática (Smith et al., 2006), ainda que alguns estudos posteriores tenham questionado essa suposição (de Villiers et al., 1994, e Alibert et al., 2003).

A relação estrôncio/cálcio (Sr/Ca) em corais é uma medida geoquímica importante que tem sido amplamente utilizada em estudos paleoceanográficos e climáticos. Ela fornece informações valiosas sobre as condições ambientais passadas e pode ser usada para reconstruir variações de temperatura da água do mar ao longo do tempo (Gonçalves, 2010).

Para medir a relação Sr/Ca em corais, os cientistas coletam amostras de testemunhos de esqueletos de coral. Essas amostras são cuidadosamente datadas para estabelecer uma linha do tempo e, em seguida, a concentração de estrôncio e cálcio é medida usando técnicas de espectrometria de massa ou espectrometria de emissão atômica. A relação Sr/Ca é calculada dividindo a concentração de estrôncio pela concentração de cálcio (Gonçalves, 2010).

Weber (1973) apresentou evidências de que a concentração de estrôncio em relação ao cálcio (razão Sr/Ca) no esqueleto de certos gêneros de corais diminuía à medida que a temperatura da água do mar aumentava, uma conclusão que foi posteriormente corroborada por Smith et al. (1979).

Vários fatores podem influenciar a relação Sr/Ca nos esqueletos de coral,

incluindo a temperatura da água, o pH da água, a taxa de crescimento do coral e a concentração de estrôncio na água do mar. Portanto, especialistas geralmente calibram a relação Sr/Ca com outros proxies e registros climáticos para obter uma interpretação precisa. (Santedicola, 2014).

A concentração de estrôncio incorporada nos esqueletos de coral é influenciada pela temperatura e pelo pH da água do mar. À medida que a temperatura da água do mar aumenta, a concentração de estrôncio nos esqueletos de coral tende a diminuir, enquanto em águas mais ácidas, a concentração de estrôncio aumenta. Portanto, a relação Sr/Ca pode ser usada para inferir as variações de temperatura da água do mar e do pH ao longo do tempo (Santedicola, 2014).

Os esqueletos de corais construtores de recifes, organismos de vida longa, oferecem um arquivo favorável para o registro de informações paleoclimáticas. Ao longo do crescimento dos corais, a geoquímica da aragonita que compõe seus esqueletos se mostra sensível a flutuações nas condições ambientais, incluindo a temperatura da superfície do mar (TSM). O proxy de temperatura baseado em corais mais utilizado atualmente é o termômetro Sr/Ca, que explora a relação inversa entre a razão Sr/Ca e a TSM (Kinsman & Holland, 1969; Smith et al., 1979; Gaetani & Cohen, 2006; DeCarlo et al., 2015a).

Normalmente, as razões Sr/Ca são primeiro calibradas com registros instrumentais modernos de TSM para estabelecer uma relação Sr/Ca-temperatura específica do coral e depois aplicadas no núcleo do esqueleto mais antigo do mesmo coral, ou em alguns casos a corais fósseis, a fim de reconstruir o SST passado [Smith et al., 1979 ; Felis et al., 2009 ; Hereid et al., 2013 ; Tierney et al., 2015].

As razões Sr/Ca do esqueleto de coral foram aplicadas isoladamente e combinadas com razões isotópicas de oxigênio para reconstruir a hidrografia oceânica superficial anterior (DeLong et al., 2013, 2014; Ramos et al., 2019). As aplicações incluem a avaliação da frequência passada do El Niño ~ Oscilação Sul (ENSO) (Corrège et al., 2000; Lawman et al., 2020), avaliando mudanças na sazonalidade da TSM nos trópicos durante o último período interglacial (Brocas et al., 2016), e registrando mudanças na aridez do Saara e Desertos árabes durante a Pequena Idade do Gelo (Felis et al., 2018).

Em relação à incorporação de Sr na estrutura no coral, ela é controlada diretamente pela TSM (Beck et al., 1992), além disso também é controlada pela composição Sr/Ca da água do mar (Devilliers et al., 1994).

2.3.2. B/Ca em corais

Os recifes de coral, ecossistemas marinhos de rica biodiversidade, enfrentam sérios desafios devido às mudanças climáticas. O aumento da temperatura da água do mar e a acidificação dos oceanos ameaçam a saúde e a calcificação dos corais, colocando em risco a sua sobrevivência a longo prazo.

A geoquímica do boro nos esqueletos dos corais oferece um método promissor para reconstruir a química do carbono inorgânico dissolvido (CID) no fluido de calcificação dos corais (Allison et al., 2014; Allison, 2017). O CID é um componente crucial para a biomineralização dos corais, a base da formação dos recifes.

Estudos como o de Hoegh-Guldberg et al. (2007) demonstram que o aumento da temperatura da água do mar impacta negativamente na calcificação dos corais. Por outro lado, Caldeira e Wickett (2003) alertam para os efeitos da acidificação dos oceanos, que reduz a disponibilidade de CID e dificulta a formação dos esqueletos de coral.

O boro, elemento essencial para a compreensão da formação dos recifes de coral, está presente na água do mar principalmente como ácido bórico ($B(OH)_3$) e borato ($B(OH)_4^-$) (Hemming & Hanson, 1992). A proporção entre essas duas formas é controlada pelo pH do ambiente. Como boro se incorpora como HBO_3 derivado de $B(OH)_4^-$, ele deve responder à alcalinidade e à salinidade, além da temperatura (Gaillardet e Alle`gre, 1995; Hemming e Hanson, 1992; Vengosh, 1999; Vengosh et al., 1994)

Estudos demonstram que o borato ($B(OH)_4^-$) se incorpora à aragonita, um mineral crucial dos esqueletos de coral, substituindo o carbonato (CO_3^{2-}) na estrutura cristalina (Sen et al., 1994; Balan et al., 2016). Essa incorporação seletiva é um processo fascinante que nos fornece informações valiosas sobre o pH da água do mar em que o coral viveu.

A razão isotópica de boro ($\delta^{11}\text{B}$) na aragonita reflete o pH do fluido no qual o coral se formou (Allison et al., 2010). Isso significa que, ao analisar o $\delta^{11}\text{B}$ de um esqueleto de coral, podemos determinar o pH da água do mar em um determinado momento no passado.

A concentração de boro [B] na aragonita, geralmente medida como a razão B/Ca, também é um indicador importante. Ela reflete tanto o pH do fluido quanto a concentração de outras espécies, como o carbonato (CID), que competem com o borato por um lugar na estrutura do esqueleto (Allen et al., 2012). Ao combinar as informações de $\delta^{11}\text{B}$ e [B], pode ser reconstruído a história do pH e da concentração de CID na água do mar ao longo do tempo. Isso nos permite avaliar como as mudanças climáticas, como o aumento da temperatura e a acidificação dos oceanos, impactaram os recifes de coral no passado.

Dissart et al (2012) investigaram a relação entre B/Ca em corais *Acropora sp.* com luminosidade, pH e temperatura e concluíram que as razões B/Ca diminuem com o aumento da intensidade de luz, o que estaria relacionado com a redução do pH observada no sítio de calcificação quando a intensidade de luz é aumentada. Ao manter a intensidade de luz constante, Dissart et al (2012) observaram que as concentrações de boro em *Acropora sp.* Variam com a temperatura.

2.4. Geoquímica de corais no Atlântico Sul tropical

No Atlântico Sul, os trabalhos com geoquímica de corais têm sido realizados desde o início do século XXI, com os primeiros trabalhos de Mayal et al. 2009, na ilha oceânica do Atol das Rocas, Rio Grande do Norte, que avaliaram o estresse térmico a partir de isótopos estáveis de oxigênio. A rápida Mudança do Clima tem fomentado as pesquisas nessa área, pela necessidade de conhecer como essas mudanças afetam os ecossistemas. O Atlântico Sul Tropical ainda possui poucos dados para serem explorados, mas alguns pesquisadores têm se dedicado a essas análises da geoquímica de corais nessa região.

Em 2015, Pereira et al. relataram um dos primeiros registros isotópicos à base de corais do Atlântico Sul Equatorial de duas colônias de *Porites astreoides* do Atol das Rocas (costa do Brasil). Os registros dos isótopos C e O dos corais foram apresentados

em séries temporais a partir de perfis ao longo do vale do coralito de uma colônia e do ápice do leque de coralito da outra colônia. Ambas registram o evento El Niño 2009/2010 - um período de branqueamento generalizado de corais.

Em 2016, Pereira et al. analisaram assinaturas de isótopos de cromo em corais escleractinianos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Tropical, a fim de elaborarem uma reconstrução de mudanças paleoambientais passadas no reino marinho, e potencialmente às mudanças climáticas em terra.

Em 2017, Pereira et al. Avaliaram o potencial da espécie de coral *Porites astreoides* como arquivo paleoclimático para o Oceano Atlântico Sul Tropical. Foram apresentados os registros baseados em corais de Sr/Ca, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ e a primeira calibração $\delta^{18}\text{O}$ -SST para a espécie de coral escleractiniano *Porites astreoides* do Atol das Rocas. Utilizou-se médias mensais de $\delta^{18}\text{O}$ e TSM do período de 2001–2013 para propor uma calibração para um paleotermômetro baseado em *Porites*, que dá $T(^{\circ}\text{C}) = -8,69(\pm 0,79) * \delta^{18}\text{O} - 7,05(\pm 3,14)$, e se produziu uma reconstrução dependente de SST $\delta^{18}\text{O}$ com fidelidade melhor que 0,5 °C para a maior parte do registro.

Em 2018, Pereira et al. Analisaram três registros de corais *Siderastrea stellata* do Atlântico Sul tropical. Isótopos estáveis de carbono de esqueletos de corais ($\delta^{13}\text{C}_{\text{coral}}$) têm sido usados como proxy para múltiplas variáveis em uma base sazonal. Os pesquisadores associaram que as mudanças de longo prazo no $\delta^{13}\text{C}$ podem estar relacionadas à mudança na composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$). O $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, por sua vez, reflete mudanças no $\delta^{13}\text{C}$ do CO_2 atmosférico, que no sistema terrestre moderno é governado principalmente pela injeção antropogênica de CO_2 na atmosfera – um processo conhecido como Efeito Suess. Em 2019, Da Silva Santos, Pereira e Sial, aplicaram os isótopos estáveis de carbono na avaliação da taxa de crescimento do coral *Porites astreoides* (Lamarck, 1816) do Atol das Rocas.

Em 2022, Pereira et al. apresentaram registros sazonalmente resolvidos de oxigênio estável ($\delta^{18}\text{O}$) e carbono ($\delta^{13}\text{C}$) valores isotópicos de um coral *Siderastrea stellata* do nordeste do Brasil (Maracajaú, $\sim 5^{\circ}\text{S}$). Os pesquisadores combinaram o registro dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ do coral com a TSM instrumental, apresentando a primeira reconstrução das mudanças de $\delta^{18}\text{O}$ na água do mar no Atlântico Sul tropical ocidental até o início do século XX, um parâmetro que está relacionado a mudanças na salinidade da superfície do mar. As mudanças reconstruídas na água do mar $\delta^{18}\text{O}$ indicam um

resfriamento proeminente entre meados da década de 1940 e meados da década de 1970, que coincide com um enfraquecimento do gradiente inter-hemisférico de TSM do Atlântico durante este intervalo de tempo.

Em 2023, Pereira et al realizaram a Primeira calibração Sr/Ca-TSM para a espécie *Montastraea cavernosa* do Atlântico Sul tropical ocidental, arquipélago oceânico de Fernando de Noronha. Foi observado uma heterogeneidade Sr/Ca em diferentes estruturas esqueléticas e o viés potencial em reconstruções da temperatura da superfície do mar.

2.5. Diversidade de corais brasileiros e seu desafio para reconstruções climáticas

Embora a diversidade de corais no Brasil seja modesta em comparação com o Caribe ou Indo-Pacífico, a riqueza de espécies endêmicas (metade das 41 espécies) torna a diversidade coralina única e crucial para a biodiversidade marinha. Dos 16 corais pétreos ou verdadeiros, os 3 corais negros, passando por 17 octocorais e 5 hidrocorais, os recifes brasileiros, apesar de sua extensão menor, são oásis de vida e beleza, impulsionando a pesca, o turismo e a proteção da costa. No entanto, o branqueamento dos corais, impulsionado pelas mudanças climáticas. As mudanças climáticas são consequências das atividades humanas, coloca em risco esse patrimônio natural inigualável. É urgente que existam medidas para proteger os recifes de coral do Brasil, garantindo a preservação dessa riqueza inestimável para as futuras gerações. (CORAL VIVO, 2016)

Os recifes de corais no Brasil, se estendem por uma vasta área costeira, apresentam uma rica diversidade de espécies, o que os torna essenciais para a compreensão das mudanças climáticas ao longo do tempo. No entanto, essa diversidade enfrenta desafios significativos devido a fatores como mudanças climáticas, poluição e práticas de pesca insustentáveis, que ameaçam a integridade dos ecossistemas recifais e, conseqüentemente, a capacidade de os corais servirem como registros paleoclimáticos confiáveis (Barradas et al., 2011).

Os corais brasileiros, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais, têm demonstrado uma capacidade notável de registrar variações climáticas através da sua estrutura, que incorpora elementos químicos em resposta a mudanças nas condições ambientais. Essa propriedade é fundamental para a calibração de paleotermômetros, que

são utilizados para reconstruir as temperaturas do passado (Steiner et al., 2015). No entanto, a diversidade específica de corais, que é crucial para a resiliência dos recifes, está em declínio.

2.6. Vulnerabilidade de ecossistemas marinhos às mudanças climáticas

A vulnerabilidade do Brasil diante das mudanças climáticas tem sido objeto de crescente discussão nacional, com foco nas interações de estresses locais, como poluição, desmatamento e incêndios florestais, que amplificam os efeitos nos biomas brasileiros. No entanto, os locais de litoral, precisamente o ambiente marinho, tem recebido pouca atenção (Horta et al., 2020).

O Brasil tem uma das costas mais longas do mundo, com cerca de 9.000 quilômetros de extensão, e sua zona econômica exclusiva (ZEE, que se estende até o mar por até 200 milhas náuticas) é comumente chamada de Amazônia Azul. Sua superfície equivale aproximadamente à área da Amazônia Legal, a qual se estende por cerca de 3,5 milhões de quilômetros quadrados (Horta et al., 2020).

Os efeitos das alterações climáticas na biodiversidade marinha são conhecidos há algum tempo, tendo em vista que estudos como o de Matias et al. (2021) apontam para consequências geradas aos ecossistemas costeiros e oceânicos, sendo as espécies endêmicas frequentemente as que estão em maior risco. Os resultados deste processo podem ter efeitos ecológicos, sociais e econômicos negativos, estes que serão sentidos ainda no curto prazo, de modo que grande parte da população brasileira tem moradia em regiões litorâneas (Matias et al., 2021).

Cerca de 60% da população urbana do país e remanescentes de Mata Atlântica, Caatinga e Amazônia podem ser encontrados na região conhecida como litorânea. O crescimento populacional, o mau planejamento espacial e a falta de saneamento básico têm efeitos negativos no ambiente, alterando a paisagem e contribuindo para a poluição do ar, do solo e principalmente da superfície do oceano (Horta et al., 2020).

As discussões sobre o aquecimento global e as alterações climáticas fizeram de várias formas de carbono o foco do discurso acadêmico e público. As incertezas futuras

baseadas em vários cenários estão agora a ser sistematicamente compiladas e divulgadas pelo Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, 2014). Na mesma linha, tem havido uma percepção crescente de que os oceanos e os seus vários ecossistemas marinhos costeiros absorvem uma parte substancial do dióxido de carbono (CO₂) libertado pela combustão de combustíveis fósseis e pela destruição de florestas. A maior parte deste carbono acumula-se no fundo do oceano como matéria orgânica, poeira e carbonatos mineralizados (Zhang et al., 2017).

Uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas é a América do Sul. Isso ocorre porque a região sofre desproporcionalmente com aumentos de temperatura causados tanto por fatores naturais, como o aquecimento dos oceanos Pacífico e Atlântico e o El Niño, quanto pela atividade humana, como a queima de combustíveis fósseis e a expansão da industrialização. Como resultado, os efeitos de eventos climáticos extremos serão sentidos mais fortemente nesta parte do mundo (Almeida, 2021).

Muitos ecossistemas podem entrar em colapso como resultado de mudanças climáticas, levando a consequências sociais e ambientais negativas e a repercussões econômicas. Dado que os efeitos das alterações climáticas nos oceanos são resultados das ações do homem no planeta, existe uma preocupação internacional crescente sobre a dinâmica dos oceanos e as consequências das alterações climáticas, necessitando de pesquisa, gestão integrada e governança global para garantir vida nas próximas décadas (Matias et al., 2021).

3. Metodologia

3.1. Área de Estudo

As duas áreas de estudo estão localizadas no litoral da Bahia. A primeira está localizada no extremo sul do Estado, no arquipélago de Abrolhos, entre as latitudes 17°20' - 18°10'S e longitudes de 38°35' - 39°20'W (Figura 1), distando cerca de 800 km da cidade de Salvador. A segunda área de estudo está situada na Baía de Todos os Santos nas coordenadas com latitude de 12°50'S e longitude de 38°38'W. Esse material encontrava-se no laboratório de Química Analítica e Ambiental do Prédio do Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada da Universidade do Estado da Bahia. Todas as

coletas foram previamente autorizadas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, via licença SISBIO.

A Baía de Todos os Santos (BTS), a segunda maior baía do Brasil, abrange uma área de aproximadamente 1200 km², com uma largura máxima de 30 km no sentido Oeste-Leste e um comprimento máximo de 50 km no sentido Norte-Sul, (Cirano e Lessa, 2007). A baía possui uma costa recortada e inclui diversas ilhas, sendo a maior delas a ilha de Itaparica. Dois canais delimitam a BTS, permitindo a circulação de água em direção ao oceano. O canal de Itaparica, situado no Sudoeste, apresenta topografia suave, profundidade média de cerca de 10 metros e estreitamento. Por outro lado, o canal de Salvador, localizado a leste, possui profundidade média de 25 metros, atingindo uma profundidade máxima de 102 metros. Este último canal é o principal ponto de intercâmbio de água entre a baía e o oceano (Lessa et al. 2001).

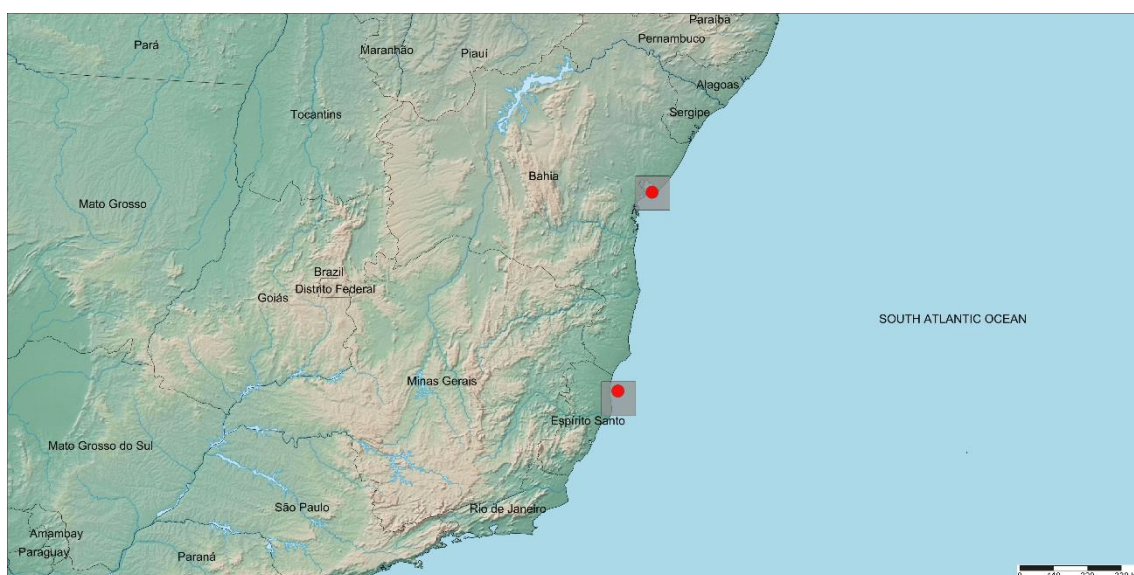


Figura 1. Mapa de localização geográfica das regiões onde as colônias foram coletadas, Baía de Todos os Santos (BTS) e Abrolhos (SA)

3.2. Etapas de Laboratório

Duas colônias de corais da espécie *S. stellata* foram coletadas, a primeira em 2013 e a segunda em 2021. Para a coleta foram realizados mergulhos autônomos e foram utilizadas uma marreta e uma talhadeira para retirada das colônias. Posteriormente as colônias foram transportadas e armazenadas no Laboratório de Química Analítica e Ambiental do Centro de Ciências Exatas e da Terra da UNEB, onde foram etiquetadas

com os respectivos códigos de referência: YCB-SS-01-2D e YCB-SS-05-F, como demonstradas na figura 2.

As colônias de corais foram lavadas com água corrente, secadas e posteriormente enxaguadas com água destilada e secado a temperatura ambiente. Cada testemunho recebeu um código contendo referências sobre o ano de coleta, espécie, localização e lâminas de corte.



Figura 2. Lâminas da Colônias de corais extraídas (a) YCB-SS-01-2D e (b) YCB-SS-05-F coletados na Baía de Todos os Santos e Abrolhos, respectivamente

3.2.1. Raios-X e Taxa de crescimento

Lâminas de 0,5 cm de espessura foram cortadas ao longo do eixo de crescimento de cada coral utilizando uma serra de mesa lubrificada com água. As lâminas foram secadas ao ar livre por 48 horas. Posteriormente, cada lâmina foi radiografada seguindo as seguintes configurações: aceleração de voltagem de 50 kV e amperagem de 320 mA, com tempo de exposição de 3,2 segundos e distância entre o equipamento e a lâmina do coral de 108 cm. As radiografias geradas foram digitalizadas e utilizadas para identificação dos bandamentos de baixa e alta densidade, como demonstradas na figura 3.

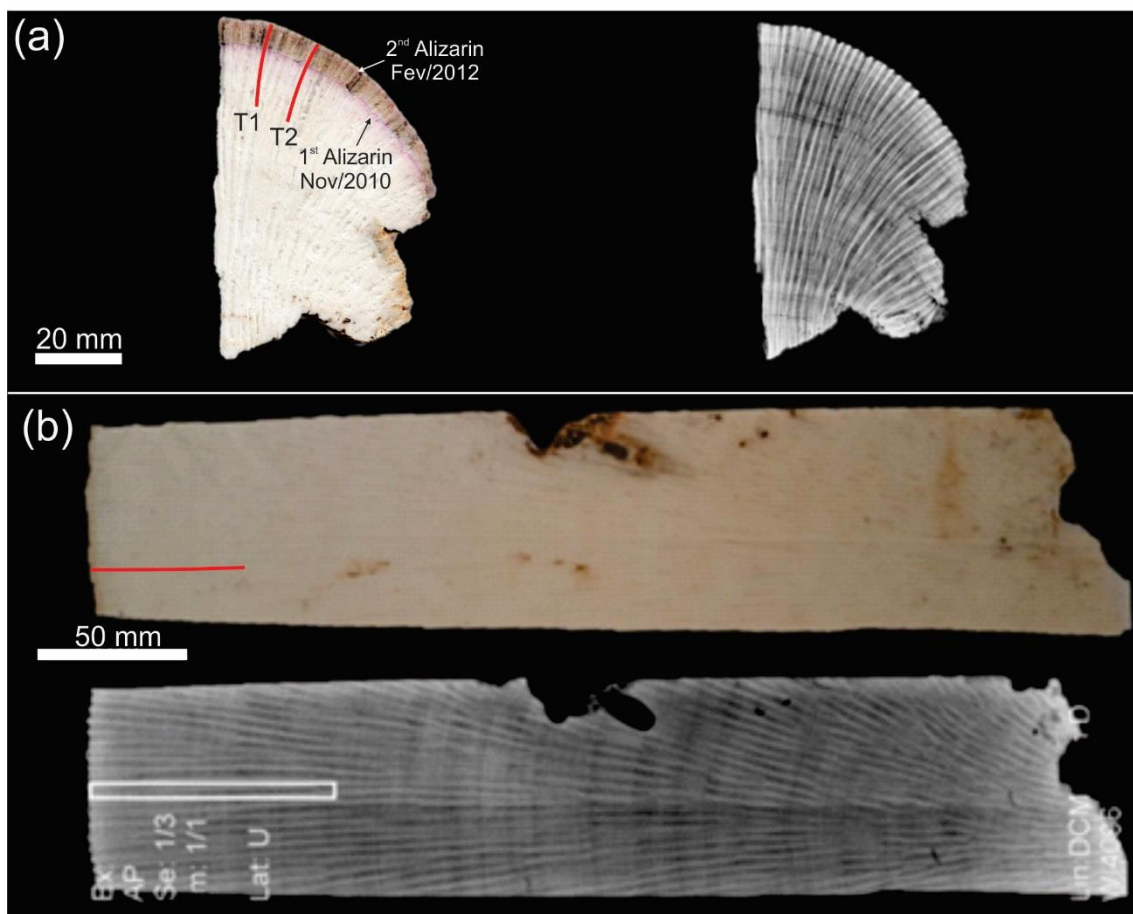


Figura 3. Lâminas dos corais FT (a) e SA (b) coletados na Baía de Todos os Santos e Abrolhos, respectivamente

3.2.2. Microamostragem de carbonato

Microamostragens de carbonato em alta resolução (escala mensal) foram obtidas por meio de uma microfuradeira (micromill). As amostras foram obtidas de uma única parede de coralito ao longo do eixo de crescimento da colônia de coral. Foram feitas três amostragens como mostra a figura 4, essas amostragens tiveram profundidade máxima de 0,5 mm, a fim de evitar a amostragem de outras estruturas do exoesqueleto do coral como a columela, garantindo que as amostras extraídas fossem exclusivas da parede do coralito.

Os bandamentos formados na estrutura do exoesqueleto do coral são originados das variações cíclicas anuais, com as radiografias a visualização fica mais evidente dos bandamentos de alta e baixa densidade (Buddemeier; Maragos; Knutson, 1974). Essa característica única torna os corais ferramentas valiosas para a reconstrução de paleoambientes, pois cada banda anual representa um 'proxy' climático, permitindo a datação precisa de eventos passados e a correlação com outros registros paleoclimáticos.



Figura 4. Microfuradeira (Micromill) com a amostra obtida de uma única parede de coralito da colônia de coral.

3.2.3. Análise por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)

Razões de Sr/Ca foram determinadas por técnicas de espectrometria massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) na Universidade Metropolitana de Manchester, Reino Unido, instituição parceira do projeto figura 5. Para isso foram necessárias alíquota com cerca de 200 a 500 μg de carbonato de cada amostra. Essa quantidade é fundamental para assegurar que a análise seja sensível o suficiente para detectar as concentrações de estrôncio e cálcio.

Após a coleta, as amostras passaram por um processo de preparação, etapa crucial, pois a ICP-MS exigia que a amostra estivesse em solução para que os íons pudessem ser transportados para o plasma. As amostras foram introduzidas no ICP-MS, onde utilizou-se um plasma de argônio para ionizar os elementos presentes na amostra, permitindo a detecção e quantificação dos íons gerados. A ICP-MS é vantajosa devido à sua alta

sensibilidade e capacidade de realizar análises multielementares simultaneamente, o que era essencial para a determinação precisa das razões isotópicas.

Na análise dos dados incluiu a avaliação de possíveis interferências de matriz, que poderiam afetar a quantificação dos elementos de interesse. Por fim, os resultados da análise das razões de Sr/Ca foram interpretados, onde variações nas razões podiam indicar mudanças nas condições ambientais, como temperatura e salinidade da água em que os corais cresceram. Essa interpretação era fundamental para entender as oscilações climáticas passadas e suas implicações para o clima passado e futuro.



Figura 5. ICP-MS Espectrometria massa com plasma indutiva acoplado, no Laboratório da Universidade de Metropolitana de Manchester, Reino Unido.

3.3. Análises Estatísticas

3.3.1. Modelagem de idade e taxa de crescimento

Foi utilizado o software QAnalySeries para construção de um modelo de idade para cada colônia, através da interpolação de dados de Sr/Ca com dados de temperatura da superfície do mar (TSM). O software QAnalySeries converte valores de distâncias da amostragem do Sr/Ca em tempo. A taxa de crescimento do coral foi determinada medindo a extensão (mm) entre dois picos consecutivos dos ciclos, uma vez que cada ciclo é interpretado como anuais.

4. Resultados

4.1. Taxa de crescimento e modelo de idade

4.1.1. BTS 1

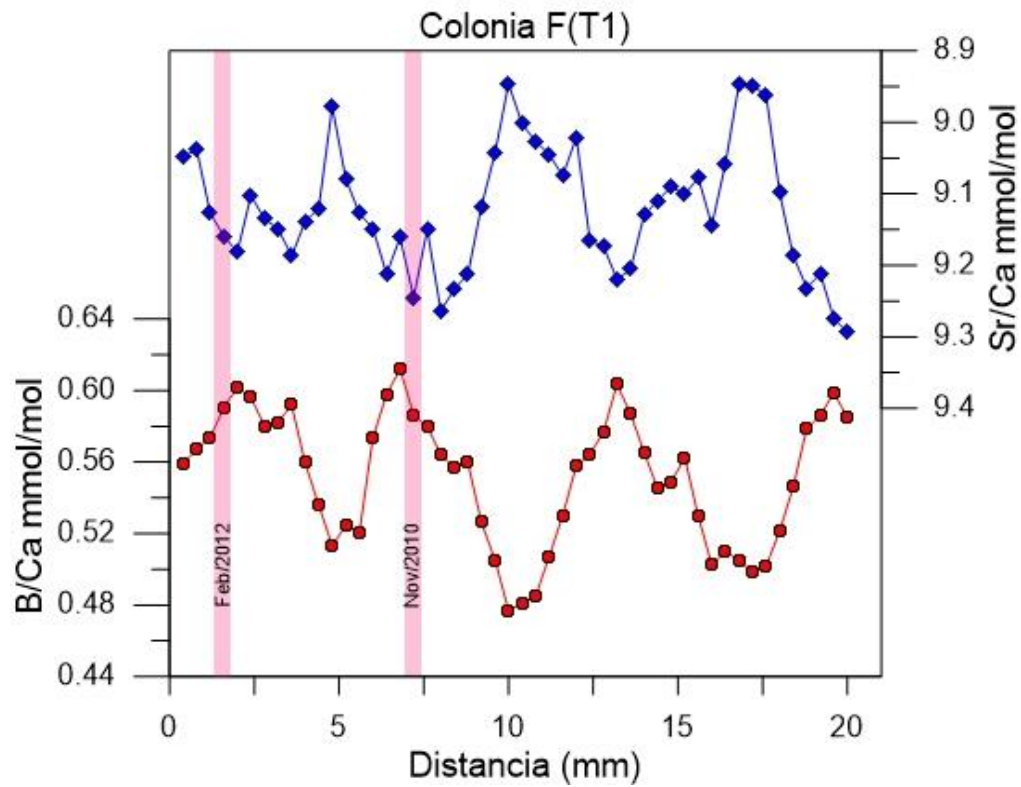


Figura 6. Registro do crescimento do coral Colonia FT1 B/Ca está representado em vermelho e Sr/Ca em azul. As faixas na vertical em rosa correspondem a alizarina do coral data em fevereiro de 2012 e novembro de 2010

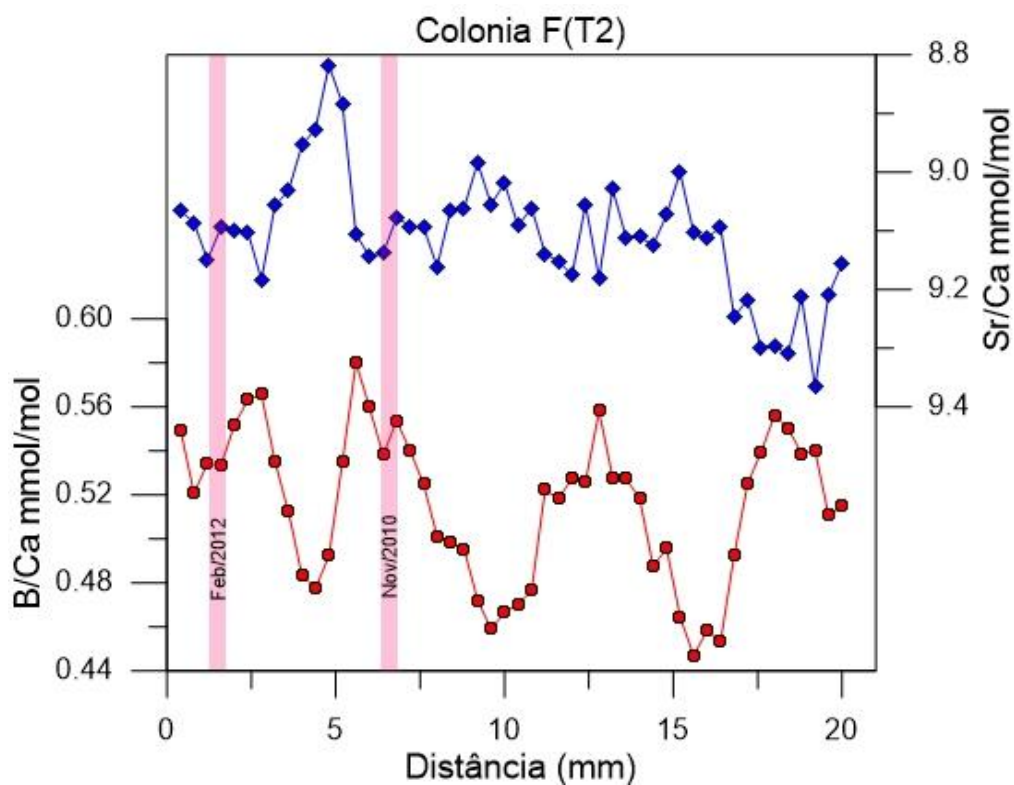


Figura 7. Registro do crescimento do coral Colonia FT2 B/Ca está representado em vermelho e Sr/Ca em azul. As faixas na vertical em rosa correspondem a alizarina do coral data em fevereiro de 2012 e novembro de 2010

A análise das Figuras 3 e 4 (que representam os 2 transectos geoquímicos do coral FT- Baía de Todos os Santos) revela que o crescimento dos corais apresentou variações entre os ciclos, com amplitudes entre 4,0 mm e 6,0 mm e média variando de $\pm 0,552$ mm/ano. A taxa média de crescimento anual foi calculada utilizando a média do comprimento dos ciclos completos, excluindo os ciclos incompletos.

4.1.2. Abrolhos

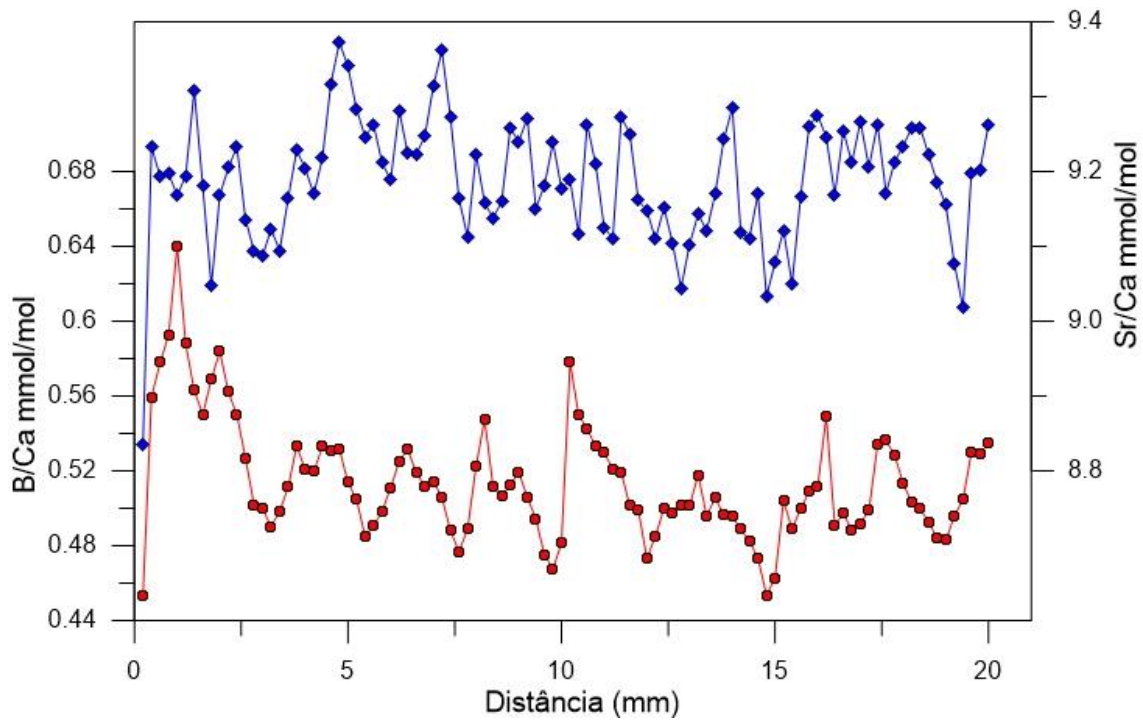


Figura 8. Registro do crescimento do coral Colônia SA onde o B/Ca está representado em vermelho e Sr/Ca em azul.

A análise da Figura 5 revela que o crescimento dos corais apresentou variações entre os ciclos, com amplitudes entre 2,0 mm e 3,0 mm e média variando de $\pm 0,512$ mm/ano. A taxa média de crescimento anual foi calculada utilizando a média do comprimento de todos os ciclos, pois todos os ciclos estão completos.

4.2. TSM

4.2.1. BTS

Ao examinar os dados entre os anos de 2008 e 2013, é evidente que a TSM atinge seus valores máximos no primeiro semestre de cada ano, tendo seu pico máximo durante os meses de março e abril ($T > 28,40^{\circ}\text{C}$), como mostram as figuras 6 e 7. Os Gráficos demonstram um comportamento que oscila constantemente ao longo dos anos estudados, mostrando temperaturas mínima de 25°C e máxima de até 29°C .

A partir de maio, ocorre um decréscimo gradual da TSM, chegando ao seu mínimo por volta de agosto e setembro, quando as temperaturas mais baixas foram registradas (T

< 25,05°C) com média de 26,75°C e um desvio padrão de $\pm 1,02$. No mês de outubro, é possível observar uma tendência gradual de aumento, dando início a um novo ciclo de sazonalidade.

4.2.2. Abrolhos

Os dados sobre TSM foram extraídos nos anos entre 2010 e 2021 tendo seus valores de máximo no primeiro semestre de cada ano, tendo seu pico máximo durante o mês março ($T > 27,5^\circ\text{C}$), como mostra a figura 8. O gráfico apresenta um comportamento que mostra a oscilação de forma constante com o decorrer dos anos, mostrando variação entre 23° a 28°C.

A partir de abril, ocorreu um decréscimo gradual da TSM, chegando ao seu valor mínimo por volta de agosto e setembro, quando foram registradas as temperaturas de ($T < 23,25^\circ\text{C}$) com média de 25,17°C e um desvio padrão de $\pm 1,34$. No mês de outubro, é possível observar uma tendência gradual de aumento, dando início a um novo ciclo de sazonalidade.

4.3. Dados geoquímicos coral BTS 1

4.3.1. Sr/Ca

Na figura 6, as análises revelaram que as amostras da colônia FT1 apresentaram valores mínimos de Sr/Ca de aproximadamente 8,95 mmol/mol e máximos de 9,29 mmol/mol, com uma média de 9,12 mmol/mol e um desvio padrão de $\pm 0,09$ mmol/mol. Esses resultados indicam que a razão Sr/Ca na colônia FT1 se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, com baixa variabilidade entre as amostras.

Um aspecto notável foi a identificação de quatro picos distintos de aumento na razão Sr/Ca, coincidindo com o mês de março de cada ano. Observou-se que esses picos apresentaram valores máximos em março e valores mínimos em setembro, sugerindo uma sazonalidade na variação da razão Sr/Ca.

4.3.2. B/Ca

As análises revelaram que a razão B/Ca nas amostras apresentaram valores mínimos de 0,48 mmol/mol e máximos de 0,60 mmol/mol, com uma média de 0,55

mmol/mol e um desvio padrão de $\pm 0,04$ mmol/mol, como mostra a figura 6. Estes resultados indicam que a razão B/Ca se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, com baixa variabilidade entre as amostras.

Observou-se um padrão sazonal na razão B/Ca, com quatro picos de aumento acentuado nos meses de agosto e setembro, atingindo valores próximos a 0,60 mmol/mol. Esses picos contrastam com os valores mínimos observados nos meses de março e abril, sugerindo uma influência sazonal na disponibilidade de B e Ca no coral.

4.3.3. Correlação dos dados geoquímicos

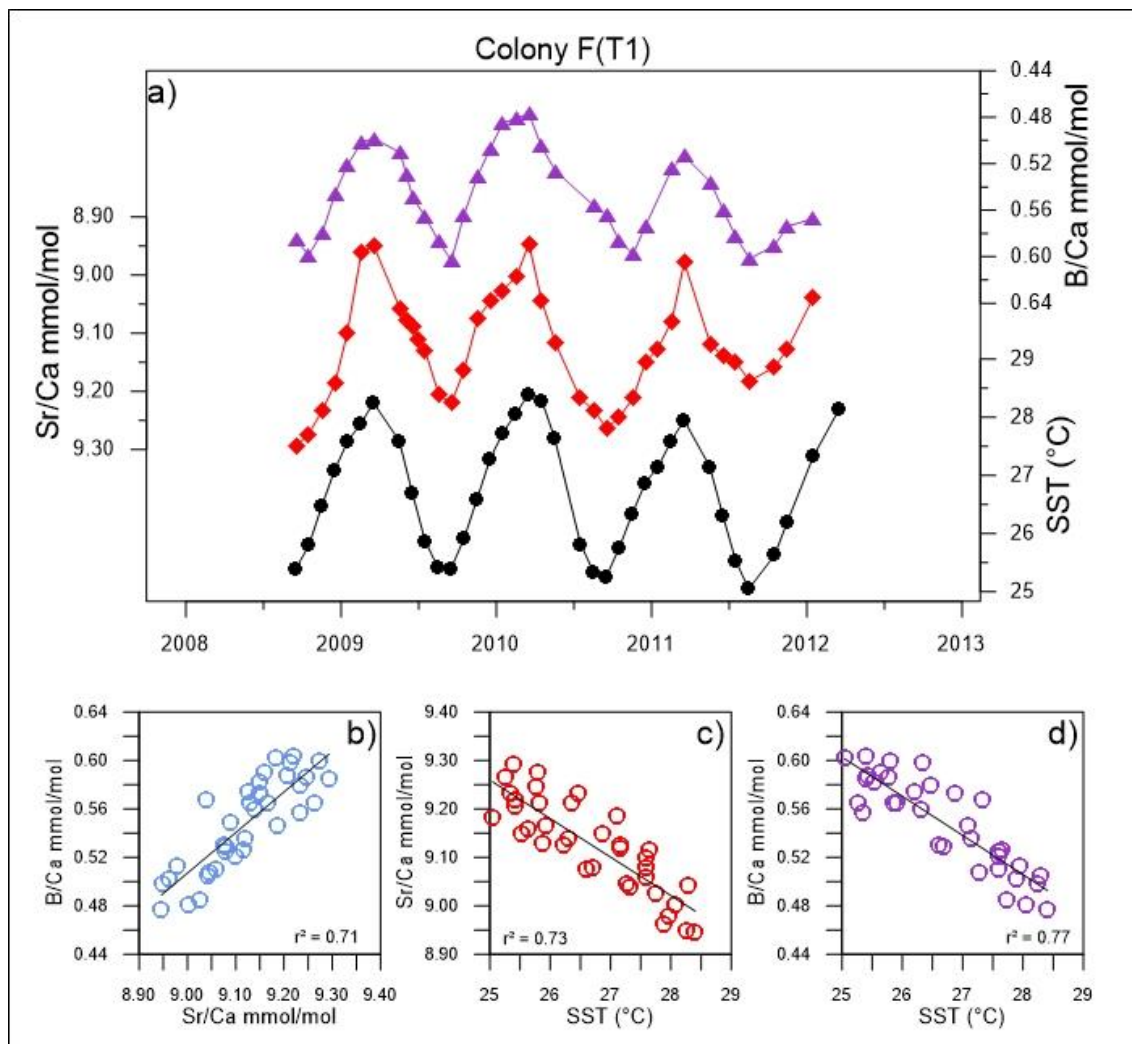


Figura 9. (a) Série temporal entre a razão de Sr/Ca, B/Ca e SST do coral FT1 coletado na Baía de todos os Santos. (b) Correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca (c) Correlação linear entre Sr/Ca e SST (d) Correlação linear entre B/Ca e SST

A análise de correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca resultou em um coeficiente de correlação linear (r) de 0,71, indicando uma correlação positiva entre os parâmetros. Isso sugere que, quando a razão B/Ca aumenta, a razão Sr/Ca também tende a aumentar, e vice-versa.

A relação entre Sr/Ca e SST apresentou um coeficiente de correlação linear (r) de -0,73, demonstrando uma correlação negativa entre os parâmetros. Isso significa que, quando a razão Sr/Ca aumenta, a SST diminui, e vice-versa.

Por fim, a análise de correlação entre B/Ca e SST revelou um coeficiente de correlação (r) de -0,77, indicando uma correlação negativa entre os parâmetros. Essa correlação sugere que existe uma relação linear robusta entre B/Ca e SST, com aumento em um parâmetro levando à diminuição no outro.

4.4. Dados geoquímicos coral BTS

4.4.1. Sr/Ca

Na figura 7, as análises revelaram que as amostras da colônia FT2 apresentaram valores mínimos de Sr/Ca de aproximadamente 8,82 mmol/mol e máximos de 9,31 mmol/mol, com uma média de 9,10 mmol/mol e um desvio padrão de $\pm 0,11$ mmol/mol. Estes resultados indicam que a razão Sr/Ca na colônia FT2 se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, com baixa variabilidade entre as amostras.

Um aspecto notável foi a identificação de quatro picos distintos de aumento na razão Sr/Ca, coincidindo com o mês de março de cada ano. Observou-se que esses picos apresentaram valores máximos em março e valores mínimos em setembro, sugerindo uma sazonalidade na variação da razão Sr/Ca.

4.4.2. B/Ca

As análises revelaram que a razão B/Ca nas amostras apresentou valores com uma variação compreendida entre o mínimo de 0,48 mmol/mol e o máximo de 0,57 mmol/mol. A média observada foi de 0,51 mmol/mol, com desvio padrão de $\pm 0,03$ mmol/mol. Estes resultados indicam que a razão B/Ca se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, com baixa variabilidade entre as amostras.

Ao contrário do observado para a razão Sr/Ca, não foi possível identificar picos sazonais na razão B/Ca. A distribuição dos valores ao longo do tempo não apresentou um padrão claro, sugerindo que a razão B/Ca não sofreu alterações significativas durante o período de estudo.

4.4.3. Correlação dos dados geoquímicos

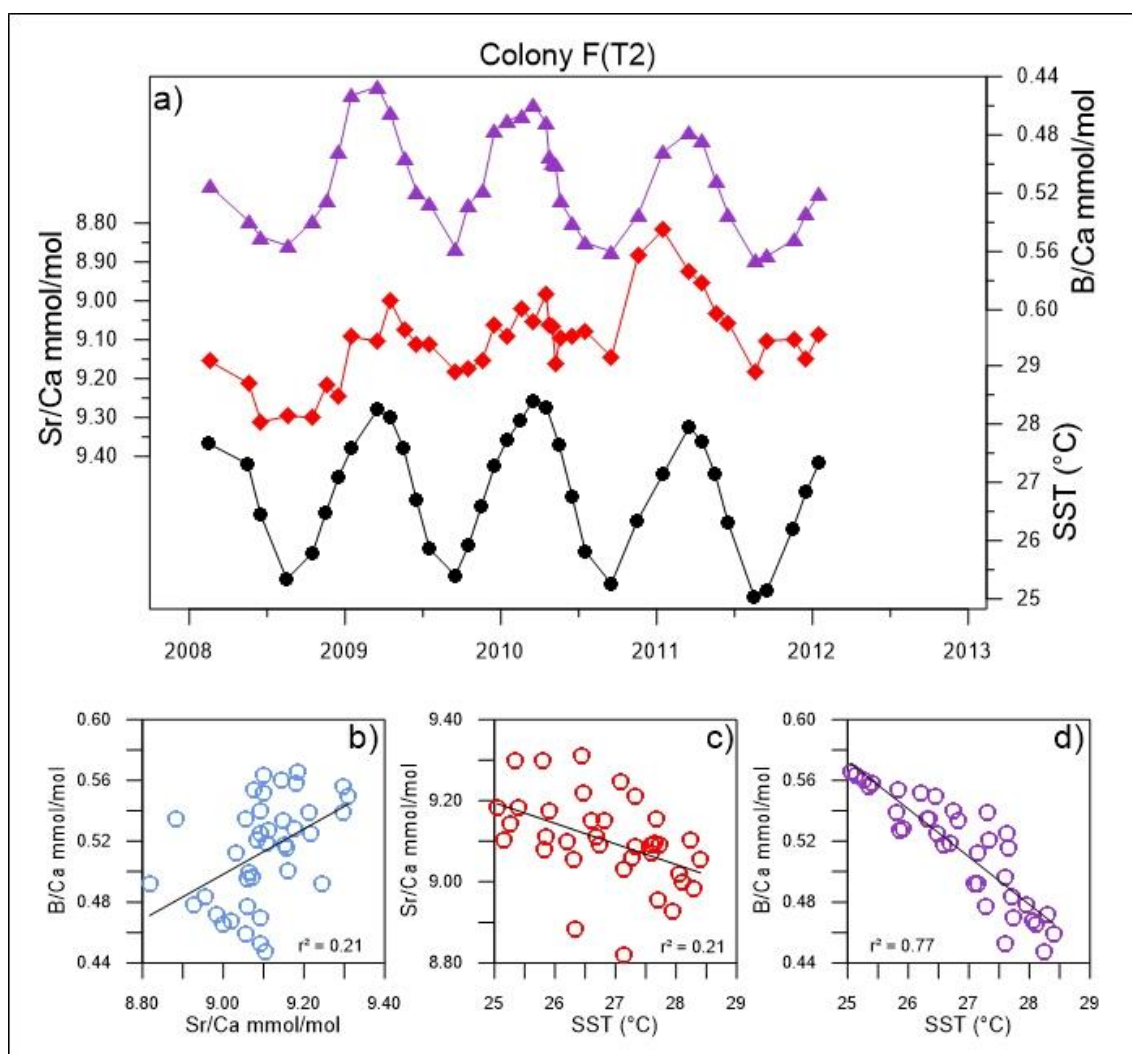


Figura 10. (a) Série temporal do Sr/Ca, B/Ca e SST do coral FT2 coletado na Baía de todos os Santos. (b) Correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca (c) Correlação linear entre Sr/Ca e SST (d) Correlação linear entre B/Ca e SST

A análise de correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca resultou em um coeficiente de correlação linear (r) de 0,21, indicando uma correlação linear fraca entre os parâmetros. Isso sugere que, embora exista uma certa relação entre B/Ca e Sr/Ca, a força da associação linear é relativamente baixa.

A relação entre Sr/Ca e SST apresentou um coeficiente de correlação linear (r) de -0,21, demonstrando uma correlação linear fraca entre os parâmetros. Similarmente ao observado entre B/Ca e Sr/Ca, essa correlação indica que a relação entre Sr/Ca e SST existe, mas não é forte.

Por fim, a análise de correlação entre B/Ca e SST revelou um coeficiente de correlação linear (r) de -0,77, indicando uma correlação linear forte entre os parâmetros. Essa forte correlação sugere que existe uma relação linear robusta entre B/Ca e SST, com aumento em um parâmetro levando a uma diminuição significativa no outro.

4.5. Dados geoquímicos coral Abrolhos

4.5.1. Sr/Ca

As análises revelaram que as amostras de corais da colônia de Abrolhos apresentaram valores mínimos de Sr/Ca de aproximadamente 8,84 mmol/mol e máximos de 9,37 mmol/mol, com uma média de 9,19 mmol/mol e um desvio padrão de $\pm 0,08$ mmol/mol. Estes resultados indicam que a razão Sr/Ca na colônia de Abrolhos se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, com baixa variabilidade entre as amostras.

Ao contrário do observado para a razão B/Ca, não foi possível identificar picos sazonais na razão Sr/Ca. A distribuição dos valores ao longo do tempo não apresentou um padrão claro, sugerindo que a razão Sr/Ca não sofreu alterações significativas durante o período de estudo.

4.5.2. B/Ca

As análises revelaram que a razão B/Ca nas amostras de corais da colônia de Abrolhos apresentou valores com uma variação compreendida entre o mínimo de 0,45 mmol/mol e o máximo de 0,59 mmol/mol. A média observada foi de 0,51 mmol/mol, com desvio padrão de $\pm 0,03$ mmol/mol. Estes resultados indicam que a razão B/Ca se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, com baixa variabilidade entre as amostras.

Ao contrário do observado para a razão Sr/Ca, foi possível identificar picos sazonais na razão B/Ca. A distribuição dos valores ao longo do tempo apresentou um padrão mais definido, sugerindo que a razão B/Ca sofreu alterações cíclicas durante o período de estudo.

4.5.3. Correlação dados geoquímicos

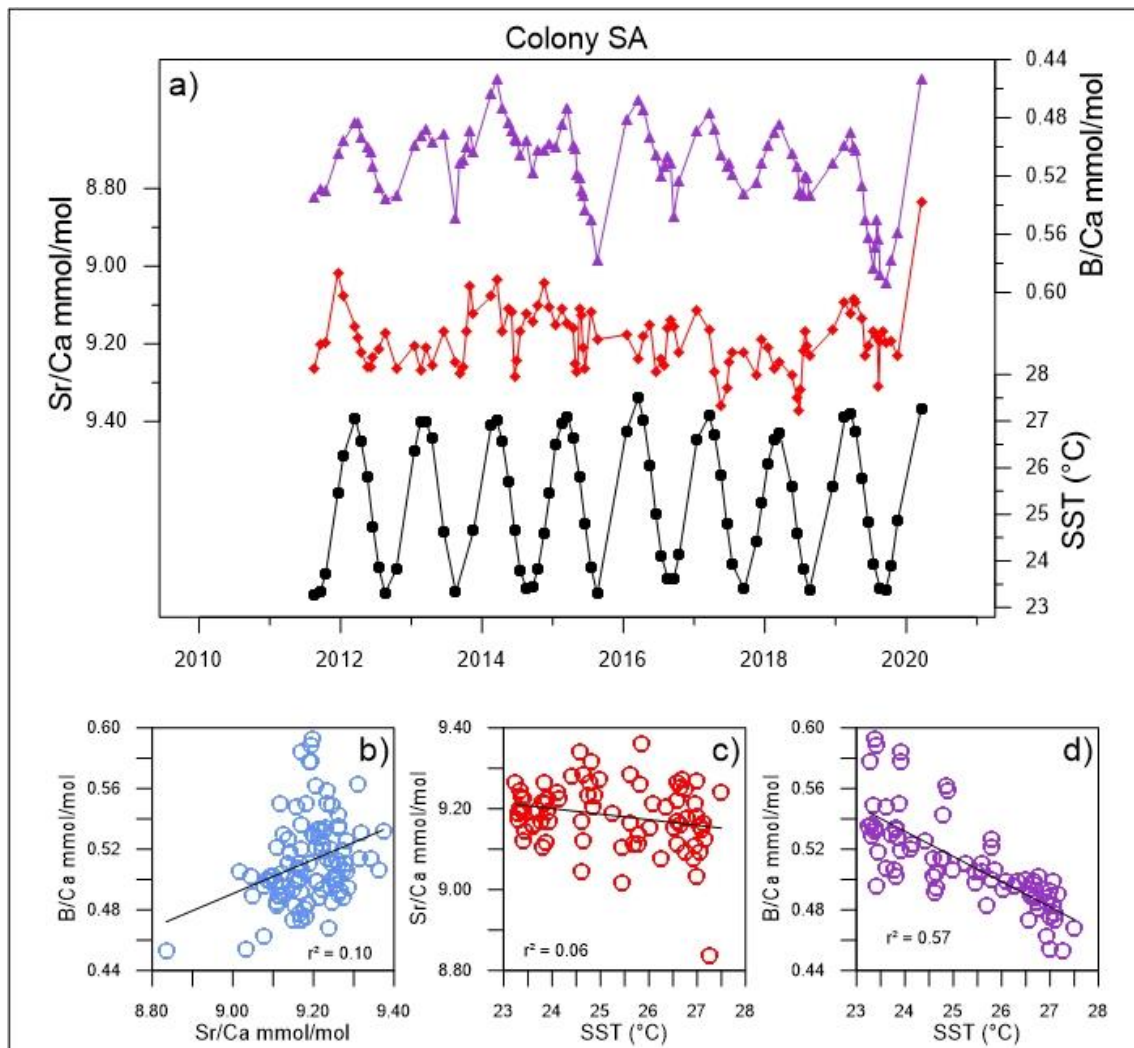


Figura 11.(a) Série temporal do Sr/Ca, B/Ca e SST do coral SA coletado em Abrolhos. (b) Correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca (c) Correlação linear entre Sr/Ca e SST (d) Correlação linear entre B/Ca e SST

A análise de correlação linear entre B/Ca e Sr/Ca em 99 amostras de corais resultou em um coeficiente de correlação linear (r) de 0,10, indicando uma correlação linear fraca entre os parâmetros. Isso sugere que, embora exista uma certa relação entre B/Ca e Sr/Ca nos corais, a força da associação linear é relativamente baixa.

A relação entre Sr/Ca e SST apresentou um coeficiente de correlação linear (r) de -0,06, demonstrando uma correlação linear ainda mais fraca entre os parâmetros. Similarmente ao observado entre B/Ca e Sr/Ca, essa correlação indica que a relação entre Sr/Ca e SST nos corais existe, mas é extremamente fraca.

No entanto, a análise de correlação entre B/Ca e SST revelou um coeficiente de correlação linear (r) de -0,57, indicando uma correlação linear moderada entre os parâmetros. Essa correlação moderada sugere que existe uma relação linear entre B/Ca e SST nos corais, com o aumento em um parâmetro levando a diminuição moderado no outro.

5. Discussões

A busca por novos paleotermômetros confiáveis e precisos é crucial para a reconstrução de climas passados, especialmente em ambientes marinhos. O B/Ca (razão boro/cálcio) em corais tem sido proposto como um promissor paleotermômetro, com potencial para fornecer informações detalhadas sobre as mudanças na temperatura da superfície do mar (SST) ao longo do tempo. No entanto, a validação do B/Ca como paleotermômetro exige comparação rigorosa com proxies já estabelecidas e reconhecidas pela comunidade científica.

A razão de estrôncio e cálcio em corais é um paleotermômetro bem estabelecido e amplamente utilizado, com uma forte relação entre a razão Sr/Ca e a SST. Estudos anteriores como Smith et al., 1979 e Gaetani & Cohen, 2006 demonstraram que o Sr/Ca em corais é influenciado principalmente pela temperatura da água do mar, com valores mais baixos de Sr/Ca em temperaturas mais elevadas. Para validar o B/Ca como paleotermômetro, este estudo comparou os valores de B/Ca com os valores de Sr/Ca em amostras de corais da mesma colônia e período de tempo. A análise de correlação entre B/Ca e Sr/Ca revelou uma relação moderada entre os dois proxies, com um coeficiente de correlação linear (r) de 0,57.

Essa correlação moderada indica que o B/Ca apresenta uma tendência de aumentar com o aumento do Sr/Ca, sugerindo que ambos os proxies respondem de forma similar às mudanças na SST. A validação do B/Ca como paleotermômetro, através da

comparação com Sr/Ca, abre novas possibilidades para a reconstrução de climas passados. O B/Ca oferece algumas vantagens em relação ao Sr/Ca, como maior sensibilidade às mudanças na SST.

Estudos anteriores relataram que B/Ca, Sr/Ca e outros elementos em corais podem fazer o registro na temperatura superficial do mar (Sinclair, 2005). Como mostram as figuras 7 e 8, as relações proporcionais de elementos versus TSM os coeficientes de correlação linear (r) variam entre -0,77 e -0,57 para B/Ca e entre -0,06 e -0,73 para Sr/Ca. Em termos de sensibilidade à temperatura, a variabilidade de B/Ca é maior que Sr/Ca potencialmente um proxy confiável para TSM na região em estudo.

Estudos como o de Wu et al., 2021, demonstram que o B/Ca pode ser um paleotermômetro confiável e preciso em corais. A comparação com Sr/Ca, um proxy já estabelecido, fornece evidências robustas para a validação do B/Ca. A utilização do B/Ca em conjunto com outros proxies pode contribuir para uma reconstrução mais completa e detalhada das mudanças climáticas passadas, especialmente em ambientes marinhos.

5.1. Variabilidade da relação elementar com a temperatura

5.1.1. Sr/Ca

Até o momento, a relação Sr/Ca tem sido amplamente reconhecida como o paleotermômetro mais confiável para a análise de corais tropicais (Beck et al., 1992; Corrège, 2006; Gagan et al., 2012; McCulloch et al., 1994; Pfeiffer et al., 2009; Quinn e Sansão, 2002; Schrag, 1999, Pereira et al., 2023). Isso se deve ao fato de que o íon Sr^{2+} possui propriedades químicas semelhantes ao íon Ca^{2+} e, portanto, pode ser incorporado à estrutura dos corais em substituição ao cálcio.

Estudos anteriores sugeriram que a partição de Sr entre a aragonita, um mineral de carbonato de cálcio encontrado nos esqueletos de coral e a água do mar está negativamente correlacionada com a temperatura da superfície do mar (TSM). Isso significa que, à medida que a temperatura da água do mar aumenta, a quantidade relativa de Sr incorporada na aragonita em relação ao Ca diminui (Alibert e McCulloch, 1997; Corrège, 2006; Gaetani e Cohen, 2006). Com base na literatura, a relação de Sr/Ca na aragonita dos corais é fortemente influenciada pela temperatura e pela razão de Sr/Ca

na água do mar (Alibert e McCulloch, 1997; Beck et al., 1992, 1994; Devilliers et al., 1994; McCulloch et al., 1994). Considerando uma constância da relação da razão Sr/Ca na água do mar nesta localidade (Alibert e McCulloch, 1997), o sinal sazonal é observado nessa razão e atribuído principalmente, à variação da temperatura da superfície do mar (TSM).

Na figura 6, o coeficiente de correlação linear (r) de -0,73 indica uma correlação forte entre Sr/Ca e SST. Essa correlação sugere que, em geral, um aumento na SST está associado à diminuição na razão Sr/Ca, e vice-versa. No entanto, é fundamental lembrar que correlação não implica causalidade, e outros fatores podem estar contribuindo para essa relação.

Já na figura 7, o coeficiente de correlação linear (r) de -0,21 indica uma correlação fraca, porém ligeiramente mais forte se comparada à da figura 8. Nesse caso, a variação na SST sugere que a temperatura pode ter um papel mais relevante na incorporação de estrôncio, mas ainda não é o fator determinante. É importante ressaltar que outros fatores, como os mencionados anteriormente, continuam a exercer influência significativa na razão Sr/Ca. Na figura 8, o coeficiente de correlação linear (r) de -0,06 sugere uma correlação extremamente fraca entre Sr/Ca e SST, se comparada as outras relações das figuras anteriores. Isso indica que outros fatores, além da temperatura, influenciam significativamente a incorporação de estrôncio no esqueleto do coral. Essa fraca correlação pode ser atribuída a diversos fatores, como a influência da salinidade, pH, taxa de crescimento do coral e até mesmo a espécie de coral em questão (Santedicola, 2014)

Para Cohen et al. (2002), os valores divergentes de Sr/Ca no coral *Astrangia poculata* foram influenciados pela presença de zooxantelas em comparação com a mesma espécie sem estes simbioss. Dessa forma, é possível afirmar que atividade zooxantela deve ser levada em consideração ao usar Sr/Ca de coral aragonita para reconstruir SST pela sua influência.

Pereira et al (2017) concluíram que o seu conjunto de dados Sr/Ca para paleotermometria é limitado pela precisão de instrumentos e não foram considerados para calibração de SST. Todavia, eles consideraram que embora o Sr/Ca não fosse adequado para determinar equações de calibração de TSM, era possível detectar uma boa

sazonalidade durante a maior parte do registro, não descartando novas possibilidades de estudos.

No contexto deste estudo, os valores da correlação entre Sr/Ca e TSM variaram de -0,73 em Colony FT1, a -0,21 em Colony FT2 e Colony SA a -0,06. Esses valores são mais baixos em comparação com muitas das relações encontradas na literatura, como os estudos de Chen et al., 2019, e D'Olivo et al., 2018. Essas variações podem indicar diferenças locais ou específicas nas relações entre Sr e Ca nos corais examinados.

Pereira et al, (2023) observaram que, para a espécie *M. Cavernosa*, a variabilidade das razões Sr/Ca nas estruturas sobrecarrega a sazonalidade anual das razões Sr/Ca na parede tecal e a diferença nas razões Sr/Ca observada a partir de estruturas esqueléticas distintas pode estar relacionada a efeitos biológicos ou vitais que influenciam a absorção de Sr em diferentes estruturas corais.

A aplicação do Sr/Ca como um indicador de temperatura da superfície do mar em estudos paleoclimáticos é de grande importância para entender as mudanças climáticas passadas e as condições oceânicas que as influenciaram.

O deslocamento de diferentes curvas de calibração indica que o mesmo valor da razão Sr/Ca em corais pode gerar resultados calibrados de SST divergentes, impossibilitando uma calibração universal de SST baseada apenas na razão Sr/Ca. Essa variação na incorporação de Sr em diferentes locais é atribuída a diversos fatores, como pH variável da água do mar, gerando a disponibilidade de íons de Sr⁺ para incorporação nos esqueletos de coral.

Eventos ambientais estressantes, como temperatura elevada, poluição ou eventos de branqueamento, podem alterar a fisiologia do coral e, conseqüentemente, a incorporação de Sr, impactando a razão Sr/Ca. Em resumo, a diversidade nas curvas de calibração impede a universalização da calibração de SST em corais apenas pela razão Sr/Ca. A influência de diversos fatores na incorporação de Sr exige a consideração de parâmetros adicionais para uma calibração precisa e robusta (Devilliers et al., 1994; Ferrier-Pages et al., 2002; Fowell et al., 2016).

5.1.2. B/Ca

O boro é um elemento com elevado tempo de residência na água do mar (Lee et

al., 2010). Uma clara sazonalidade B/Ca associada a variações de TSM foi encontrada em alguns locais (Fallon et al., 1999, 2003). Correlacionamentos moderados na Colônia FT1 ($r = -0,77, p < 0,01$, Figura 6) entre B/Ca e TSM foram encontrados neste estudo.

Vários estudos mostraram que o B se incorpora à aragonita coral como um ânion, com a forma primária sugerida para ser $B(OH)_4^-$ (Hemming e Hanson, 1992; Hemming et al., 1995; Holcomb et al., 2016; Mavromatis et al., 2015). A relação de B/Ca na aragonita não é afetada apenas pela temperatura, mas também por outros fatores, como a química do carbonato e a taxa de crescimento. (Holcomb et al., 2016; Mavromatis et al., 2015; Sinclair et al., 1998). Nos casos analisados durante a pesquisa, o coeficiente de correlação linear (r) entre B/Ca e SST na figura 6 foi de $-0,77$, indicando uma relação entre essas razões forte. Isso demonstra uma relação inversamente proporcional entre elas.

As proporções Coral B/Ca por si só têm uma relação grande com a temperatura da água do mar (por exemplo, Hathorne et al., 2013; DeCarlo et al., 2018). B/Ca são influenciados de forma semelhante pelos processos de calcificação e seu coeficiente de partição (K_d) são todos $\ll 1$ (Montagna et al., 2014; Holcomb et al., 2016).

A literatura científica aborda a relação entre boro (B) e cálcio (Ca) em corais de forma para elucidar processos como a calcificação e a resposta dos corais a fatores ambientais. Estudos indicam que a relação B/Ca em corais pode ser um indicador importante da química do fluido calcificante e da sensibilidade dos corais às mudanças ambientais, como a acidificação dos oceanos (McCulloch et al., 2017; DeCarlo et al., 2018).

A utilização de técnicas como espectrometria de massa tem sido fundamental para determinar os isótopos de B e Ca em corais, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos processos de calcificação e das condições ambientais passadas (Aggarwal & You, 2016; DeCarlo et al., 2018).

Entretanto, em um dos casos apresentados, a correlação linear entre B/Ca e SST foi moderada, um pouco abaixo se comparada às figuras 6 e 7. Na Figura 8, o coeficiente de correlação linear (r) foi de $-0,57$. Apesar de que ainda assim indique uma relação linear, ainda que mais fraca em comparação às demais, há fatores que surgem além de temperatura, podendo, assim, influenciar a incorporação do Boro no esqueleto do coral.

Essa variação em relação à força de correlação pode ser também atribuída ao local de coleta e à fisiologia dos corais. Um ponto também a ser destacado é o certo padrão de sazonalidade claro na razão B/Ca nas amostras analisadas, como demonstradas nas Figuras 6, 7 e 8.

Em síntese, os resultados das análises de correlação entre B/Ca e SST indicam que a razão B/Ca pode ser um proxy útil para reconstrução de temperatura da superfície da água do mar. Contudo, a correlação linear e influências externas podem fazer com que os padrões sazonais possam variar a depender da espécie do coral e suas condições ambientais.

6. Conclusões

Os corais oferecem um registro promissor para reconstruções em alta resolução das mudanças climáticas no oceano ao longo dos últimos anos. Isto deve ao fato de que seus esqueletos contêm informações em relação à temperatura da água do mar, salinidade, pH e outros parâmetros ambientais em seus compostos geoquímicos. Um dos proxies geoquímicos mais utilizados para reconstruir a temperatura da água do mar é a razão Sr/Ca. No entanto, a aplicação do Sr/Ca apresenta desafios devido à influência de "efeitos vitais". Estes efeitos, relacionados à fisiologia do coral, podem mascarar a relação real entre Sr/Ca e temperatura, levando a imprecisões nas reconstruções.

Apresentamos a termometria B/Ca, um novo método que utiliza a razão B/Ca para explicar a influência dos efeitos vitais nas relações Sr/Ca-temperatura. Ao combinar as informações de Sr/Ca e B/Ca, esta abordagem oferece uma estimativa mais precisa da temperatura do oceano a partir dos esqueletos de coral. Calibramos a termometria Sr-B utilizando um conjunto de dados de relações Sr/Ca e B/Ca medidos em 3 corais coletados no Oceano Atlântico Sul. A temperatura da superfície do mar em estudo apresentaram uma faixa de média anual de temperatura entre 25°C a 30°C.

A termometria B/Ca abre novas perspectivas para a paleoclimatologia dos corais. Com sua maior precisão e aplicabilidade, este método pode contribuir significativamente para a compreensão das mudanças climáticas no oceano ao longo do tempo.

O grau de semelhança entre B e Sr é um pouco surpreendente, mesmo os seus mecanismos de incorporação no coral sendo bastante diferentes (Gaillardet e Alle`gre, 1995; Hemming e Hanson, 1992). Isto sugeriria que o microambiente precipitante no coral é relativamente estável: na ausência de variabilidade fisiológica significativa no pH do fluido calcificante, ou no transporte de oligoelementos, o controle primário na incorporação de B na aragonita coralina parece ser a temperatura.

Usar a relação B/Ca, além de Sr/Ca, pode fornecer informações adicionais sobre eventos durante a vida dos corais. Por exemplo, como discutido acima, B/Ca continuou a acompanhar a temperatura da água, assim como Sr/Ca. No geral, o uso de múltiplos proxies de TSM deve continuar valioso para os estudos de corais, aumentando o valor da informação recebida.

7. Bibliografias

Aggarwal, S. and You, C. (2016). A review on the determination of isotope ratios of boron with mass spectrometry. *Mass Spectrometry Reviews*, 36(4), 499-519. <https://doi.org/10.1002/mas.21490>

Allen, K.A., Honisch, B., Eggins, S.M., Rosenthal, Y., 2012. Environmental controls on B/Ca in calcite tests of the tropical planktic foraminifer species *Globigerinoides ruber* and *Globigerinoides sacculifer*. *Earth Planet. Sci. Lett.* 351–352, 270–280.

Alibert, C., McCulloch, M.T., 1997. Strontium/calcium ratios in modern *Porites* corals from the Great Barrier Reef as a proxy for sea surface temperature: calibration of the thermometer and monitoring of ENSO. *Paleoceanography* 12 (3), 345–363.

ALLISON, Nicola. Reconstructing coral calcification fluid dissolved inorganic carbon chemistry from skeletal boron: An exploration of potential controls on coral aragonite B/Ca. *Heliyon*, v. 3, n. 8, 2017.

Allison, N., Cohen, I., Finch, A.A., Erez, J., Tudhope, A.W., 2014. Corals concentrate dissolved inorganic carbon to facilitate calcification. *Nat. Commun.* 5, 5741.

Allison, N., Finch, A.A., EIMF, 2010. $\delta^{11}\text{B}$, Sr, Mg and B in a modern Porites coral: the relationship between calcification site pH and skeletal chemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 1790–1800.

ALMEIDA, Isabela Miguel de. AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS EFEITOS EM COMUNIDADES DE PEIXES AMAZÔNICOS. 2021. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://www.uezo.rj.gov.br/tcc/cb/Isabela-Miguel-de-Almeida.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

Balan, E., Pietrucci, F., Gervais, C., Blanchard, M., Schott, J., Gaillardet, J., 2016. First-principles study of boron speciation in calcite and aragonite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 193.

Barradas, JI, Amaral, FD, Hernández, MIM, Montes, MDJF, & Steiner, AQ (2011). Distribuição espacial de macroorganismos bentônicos em bancos de recifes na Praia de Porto de Galinhas (nordeste do Brasil), com foco especial em corais e hidróides calcificados doi: 10.5007/2175-7925.2010v23n2p61.

Beck, J.W., et al., 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium calcium ratios. *Science* 257 (5070), 644–647.

BRANDLEY, R.S., EDDY, J.A. Record of past global changes. In: BRANDLEY, R.S. (Ed.). *Global changes of the past*. UCAR/OIES. Global Change Institute, p. 5-9. 1989.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000 Publicada no DOU no 18, de 25 de janeiro de 2001, Seção 1, páginas 70-71. Brasília, 2001. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-CONAMA-n%C2%BA-274-de-29-de-novembro-de-2000.pdf> . Acesso em: 18 ago. 2023.

BURD, A. B. et al. Assessing the apparent imbalance between geochemical and biochemical indicators of meso- and bathypelagic biological activity: What the @\$#! is wrong with present calculations of carbon budgets? *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 57, n. 16, p. 1557–1571, 15 ago. 2010.

Caldeira, K., Wickett, M.E., 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425, 365.

CARRICART-GANIVET, J.P; LOUGH, J.M; BARNES, D.J. Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive Porites from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, v. 351, n. 1-2, p.27-36, 2007.

CARLOS, S. DE M.; CUNHA, D. A. DA; PIRES, M. V. Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 57, n. 3, p. 455–471, set. 2019.

CAXITO, F.A. & SILVA, A.V. Isótopos Estáveis: Fundamentos E Técnicas Aplicadas À Caracterização E Proveniência Geográfica De Produtos Alimentícios. *Geonomos*, v. 23, p. 10- 17, 2015.

Chen, X., Deng, W., Kang, H., Zeng, T., Zhang, L., Zhao, J., ... & Wei, G. (2021). A replication study on coral $\delta^{11}\text{B}$ and b/ca and their variation in modern and fossil porites: implications for coral calcifying fluid chemistry and seawater ph changes over the last millennium. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36(10). <https://doi.org/10.1029/2021pa004319>

CHENG, L. J.; ABRAHAM, J.; TRENBERTH, K.E; et al. 2018 continues record global ocean warming. *Advances in Atmospheric Sciences* v. 36, p. 249–252, 2019.

CHENG, L.; ABRAHAM, J.; ZHU, J.; et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 37, n.2, p.137–142, 2020.

Cirano & Lessa, 2007. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, *Rev. Bras. Geof.* 25, 363-387.

CROSS, T.S.; CROSS, B.W. U, Sr, and Mg in Holocene and Pleistocene corals *A. palmata* and *M. annularis*. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.53, n.2, p. 587–594. 1983.

Cohen, A.L., Owen, K.E., Layne, G.D. and Shimizu, N. (2002). The effect of algal symbionts on the accuracy of Sr/Ca paleotemperatures from coral. *Science*, 296: 331–333.

Correge, T., 2006. Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 232 (2–4), 408–428.

DeCarlo, T., Holcomb, M., & McCulloch, M. (2018). Reviews and syntheses: revisiting the boron systematics of aragonite and their application to coral calcification. *Biogeosciences*, 15(9), 2819-2834. <https://doi.org/10.5194/bg-15-2819-2018>

DeCarlo, TM, GA Gaetani, M. Holcomb e AL Cohen (2015a), Determinação experimental de fatores que controlam U/Ca de aragonita precipitada da água do mar: Implicações para a interpretação do esqueleto de coral, *Geochim. Cosmoquim. Acta*, 162, 151-165, doi : [10.1016/j.gca.2015.04.016](https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.016).

DeLong, K.L., Quinn, T.M., Taylor, F.W., Shen, C.C., Lin, K., 2013. Improving coral-base paleoclimate reconstructions by replicating 350 years of coral Sr/Ca variations. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 373, 6–24

DEUTSCHE WELLE. Protocolo de Kyoto foi marco na proteção climática, mas insuficiente. G1, 16 fev. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2020/02/16/protocolo-de-kyoto-foi-marco-na-protexao-climatica-mas-insuficiente.ghtml> Acesso em: 15 de dezembro de 2023

Devilliers, S., Shen, G.T., Nelson, B.K., 1994. The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite - influence of variability in (Sr/Ca)seawater and skeletal growth parameters. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58 (1), 197–208.

EÇA, G. F., Mendonça Filho, C. V. S., Hatje, V., & Santos, W. P. C.. (2012). Corais como organismos biomonitores: aplicação, pré-tratamento e determinação de elementos majoritários e minoritários. *Química Nova*, 35(3), 581–592. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000300026>

ESCOBAR, H. **IPCC: se nada for feito, colapso climático é iminente.** Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/ipcc-se-nada-for-feito-colapso-climatico-e-iminente/>. Acesso em: 20 dezembro. 2023.

Fallon, S.J., McCulloch, M.T., Van Woesik, R., Sinclair, D.J., 1999. Corals at their latitudinal limits: laser ablation trace element systematics in *Porites* from Shirigai Bay, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.* 172, 221–238.

Ferrier-Pages, C., Boisson, F., Allemand, D., Tambutte, E., 2002. Kinetics of strontium uptake in the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*

245, 93–100.

Fowell, S.E., et al., 2016. Intrareef variations in Li/Mg and Sr/Ca sea surface temperature proxies in the Caribbean reef-building coral *Siderastrea siderea*. *Paleoceanography* 31 (10), 1315–1329.

Gaetani, G.A., Cohen, A.L., 2006. Element partitioning during precipitation of aragonite from seawater: a framework for understanding paleoproxies. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70 (18), 4617–4634.

Gaillardet, J., and C. J. Alle`gre, Boron isotopic composition of corals: Seawater or diagenesis record ?, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 136, 665 – 676, 1995.

Gagan, M.K., Dunbar, G.B., Suzuki, A., 2012. The effect of skeletal mass accumulation in *Porites* on coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ paleothermometry. *Paleoceanography* 27 (1).

GONÇALVES, Priscila Marti S. (2010). A influência da Temperatura e da Calcificação na variação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ e Sr/Ca no esqueleto do coral *Mussismilia braziliensis* (Verrill 1868). Dissertação (Mestrado em [nome do programa, se aplicável]) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/21484/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Priscila_Gon%C3%A7alves_2010.pdf. Acesso em: 15 de dezembro de 2023

GRANDELLE, R. **Temperatura média da Terra cresceu 1,02 grau Celsius desde século XIX**. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/sustentabilidade/temperatura-media-da-terra-cresceu-102-grau-celsius-desde-seculo-xix-18002272>>. Acesso em: 20 dezembro. 2023.

GROTZINGER, J., JORDAM, T. *Para Entender a Terra*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GUIARRARA, Paloma. "Protocolo de Kyoto"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/protocolo-kyoto.htm>. Acesso em 20 de dezembro de 2023.

Hemming, N.G., Hanson, G.N., 1992. Boron isotopic composition and concentration in modern marine carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 537–543.

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A., Hatziolos, M.E., 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

HOEGH-GULDBERG, Ove. Coral reefs in a century of rapid environmental change. *Symbiosis*, v. 37, n. 1-3, p. 1-31, 2004.

Holcomb, M., DeCarlo, T.M., Gaetani, G.A., McCulloch, M., 2016. Factors affecting B/Ca ratios in synthetic aragonite. *Chem. Geol.* 437, 67–76.

HORTA - PUGA, Guillermo; CARRIGUIRY José D., Coral Ba/Ca molar ratios as a proxy of precipitation in the northern Yucatan Peninsula, Mexico, *Applied Geochemistry*, Volume 27, Issue 8, 2012, Pages 1579-1586, ISSN 0883-2927, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.05.008>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292712001266>)

Kelly A. Hereid, Terrence M. Quinn, Frederick W. Taylor, Chuan-Chou Shen, R. Lawrence Edwards, Hai Cheng; Coral record of reduced El Niño activity in the early 15th to middle 17th centuries. *Geology* 2013;; 41 (1): 51–54. doi: <https://doi.org/10.1130/G33510.1>

Kinsman, D. J. J. and Holland, H. D., “The co-precipitation of cations with CaCO₃ - IV. The co-precipitation of Sr²⁺ with aragonite between 16° and 96°C”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 33, no. 1, pp. 1–17, 1969. doi:10.1016/0016-7037(69)90089-1.

KNUTSON, D.W.; BUDDEMEIER, R.W.; SMITH, S.V. Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. *Science*, v. 177, p. 270-272, 1972

Krishnan, R. *et al.* (2020). Introdução às mudanças climáticas na região indiana. In: Krishnan, R., Sanjay, J., Gnanaseelan, C., Mujumdar, M., Kulkarni, A., Chakraborty, S. (eds) *Avaliação das Mudanças Climáticas na Região Indiana*. Springer, Singapura. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4327-2_1

KUHNERT, H.; PÄTZOLD, J.; HATCHER, B.; et al. A 200-year coral stable

isotope record from a high-latitude reef off Western Australia. *Coral Reefs*, v. 18, p. 1-12, 1999.

LANGA, Vasco Salomão. Análise da capacidade de adaptação da comunidade de Gimo em Boane em resposta aos impactos das mudanças climáticas na agricultura. 2021. 42 f. Monografia (Especialização) - Curso de Licenciatura em Educação Ambiental, Faculdade de Educação da Universidade Eduardo Mondlane, 2021, 2021. Disponível em: <http://monografias.uem.mz/bitstream/123456789/1847/1/2021%20-%20Langa%2C%20Vasco%20Salom%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2023.

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, Ruy Kenji Papa de; OLIVEIRA, MdDMd. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. *Biota Neotropica*, v. 8, n. 3, p. 69-82, 2008.

LEÃO, Zelinda MAN et al. Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 64, n. SPE2, p. 97-116, 2016.

Lee, K., et al., 2010. The universal ratio of boron to chlorinity for the North Pacific and North Atlantic oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74 (6), 1801–1811.

LEITE, Iali Karine Fernandes. Riqueza de espécies e facilitação influenciando o aporte de serrapilheira em uma área restaurada da Caatinga. 2022. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/50936/1/_AporteSerrapil_Caating_07dez2022_iali.docx.pdf. Acesso em: 18 ago. 2023.

Lessa, GC; Dominguez, JML; Bittencourt, ACSP, et al., 2001. The tides and tidal circulation of Todos os Santos Bay, northeast Brazil: a general characterization. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 73, 245-261.

LIMA, I. C. C. S. Branqueamento de corais e mudanças ambientais: estudo de caso de 3 anos no Atlântico Equatorial. 2015. 40 f. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/34351/1/2015_tcc_iccslima.pdf. Acesso em: 18 ago. 2023.

Marcott, S. A., Shakun, J. D., Clark, P. U., & Mix, A. C. (2013). A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science*, 339(6124), 1198-1201.

MATIAS, Tális Pereira; COSTA, Vívian Ariane de Oliveira; BOTEZELLI, Luciana; IMPERADOR, Adriana Maria. impactos das mudanças climáticas na biodiversidade marinha: anomalias de temperatura e efeitos adversos nos ecossistemas. 18º Congresso Nacional de Meio Ambiente. Justiça Climática no Antropoceno. 2021. Disponível em: https://www.meioambientepocos.com.br/ANAIS%202021/197_impactos-das-mudanas-climticas-na-biodiversidade-marinha-anomalias-de-temperatura-e-efeitos-adversos-nos-ecossistemas.pdf. Acesso em: 18 ago. 2023.

Mavromatis, V., Montouillout, V., Noireaux, J., Gaillardet, J., Schott, J., 2015. Characterization of boron incorporation and speciation in calcite and aragonite from coprecipitation experiments under controlled pH, temperature and precipitation rate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 150, 299–313.

MAYAL, E.M.; SIAL, A. N.; FERREIRA, V. P.; FISNER, M.; PINHEIRO, B. R. Thermal stress assessment using carbon and oxygen isotopes from *Scleractinia*, Rocas Atoll, northeastern Brazil. *International Geology Review*, v. 51, n. 2, p. 166–188, 2009.

McCulloch, M., D’Olivo, J., Falter, J., Holcomb, M., & Trotter, J. (2017). Coral calcification in a changing world and the interactive dynamics of pH and DIC upregulation. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms15686>

McCulloch, M.T., Gagan, M.K., Mortimer, G.E., Chivas, A.R., Isdale, P.J., 1994. A high-resolution Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982–1983 El Niño. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58 (12), 2747–2754.

Mitsuguchi, T., Matsumoto, E., and Uchida, T. (2003). Mg/Ca and Sr/Ca Ratios of *Porites* Coral Skeleton: Evaluation of the Effect of Skeletal Growth Rate. *Coral Reefs* 22, 381–388. doi: 10.1007/s00338-003-0326-1

MOURA, Andreza Campos de. Uma visão dos estudantes de Vitória de Santo Antão-PE sobre os impactos da poluição dos rios nos recifes costeiros. 2018. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Pernambuco,

Vitória de Santo Antão, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/26260/1/MOURA%2C%20Andreza%20Campos%20de.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2023.

N.S. Pereira, A.N. Sial, K.H. Kilbourne, S.-C. Liu, C.-C. Shen, C.V. Ullmann, R. Frei, C. Korte, R.K.P. Kikuchi, V.P. Ferreira, B.L.S.S. Braga, Carbon stable isotope record in the coral species *Siderastrea stellata*: A link to the Suess Effect in the tropical South Atlantic Ocean, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 497, 2018, Pages 82-90, ISSN 0031-0182, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.02.007>.

N.S. Pereira, L.J. Clarke, C.M. Chiessi, K.H. Kilbourne, S. Crivellari, F.W. Cruz, J.L.P.S. Campos, T.-L. Yu, C.-C. Shen, R.K.P. Kikuchi, B.R. Pinheiro, G.O. Longo, A.N. Sial, T. Felis, Mid to late 20th century freshening of the western tropical South Atlantic triggered by southward migration of the Intertropical Convergence Zone, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 597, 2022, 111013, ISSN 0031-0182, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111013>.

N.S. Pereira, K.H. Kilbourne, R.K.P. Kikuchi, C.M. Chiessi, B.R. Pinheiro, M.M. Gregório, M.P. dos Santos, A.N. Sial, Sr/Ca-temperature calibration for the coral *Montastraea cavernosa*, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 129, 2023, 104524, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104524>.

N.S. Pereira, A.N. Sial, R. Frei, C.V. Ullmann, C. Korte, R.K.P. Kikuchi, V.P. Ferreira, K.H. Kilbourne, The potential of the coral species *Porites astreoides* as a paleoclimate archive for the Tropical South Atlantic Ocean, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 77, 2017, Pages 276-285, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.05.008>.

OLIVEIRA, Andre Melo de. Os principais problemas ambientais que ameaçam a preservação do meio rural do povoado Maritá em Paripiranga (BA). 2022. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Geografia, Centro Universitário Ages, Paripiranga, 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/31762/1/TCC%20ANDR E%20MELO%20DE%20OLIVEIRA.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2023.

Pereira, N. S., Sial, A. N., Kikuchi, R. K. P., Ferreira, V. P., Ullmann, C. V., Frei, R., & Cunha, A. M. C.. (2015). Coral-based climate records from tropical South Atlantic:

2009/2010 ENSO event in C and O isotopes from Porites corals (Rocas Atoll, Brazil). *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*, 87(4), 1939–1957. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520150072>

Pereira, NS, Voegelin, AR, Paulukat, C., Sial, AN, Ferreira, VP e Frei, R. (2016), Assinaturas de isótopos de cromo em corais escleractinianos do Atol das Rocas, Atlântico Sul Tropical. *Geobiologia*, 14: 54-67. <https://doi.org/10.1111/gbi.12155>

PILSON M. 1998. *An Introduction of the Chemistry of the Sea*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.

Pfeiffer, M., Dullo, W.C., Zinke, J., Garbe-Schönberg, D., 2009. Three monthly coral Sr/Ca records from the Chagos Archipelago covering the period of 1950–1995 AD: reproducibility and implications for quantitative reconstructions of sea surface temperature variations. *Inter. J. Earth Sci.* 98 (1), 53–66.

Quinn, T.M., Sampson, D.E., 2002. A multiproxy approach to reconstructing sea surface conditions using coral skeleton geochemistry. *Paleoceanography* 17 (4).

SANTEDICOLA, Maria Cristina Rabello. (Data não disponível). VALIDAÇÃO DAS RAZÕES Sr/Ca, Mg/Ca E Ba/Ca ENCONTRADAS NO ESQUELETO DE *Mussismilia braziliensis* VERRILL 1868 COMO INDICADORES DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR NA COSTA DA BAHIA, BRASIL. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/16223/1/MARIA%20CRISTINA%20RABELLO%20SANTEDICOLA.pdf>.

Schrag, D.P., 1999. Rapid analysis of high-precision Sr/Ca ratios in corals and other marine carbonates. *Paleoceanography* 14 (2), 97–102.

SCHRAG, D. P.; LINSLEY, B. K. (2002). Corals, Chemistry, and Climate. *Science*, v. 296, p. 277– 278, 2002.

Sen, S., Stebbins, J.F., Hemming, N.G., Ghosh, B., 1994. Coordination environments of B-impurities in calcite and aragonite polymorphs – a B-11 mas NMR-study. *Am. Miner.* 79, 819–825.

Sinclair D. J. (2005). Correlated trace element “vital effects” in tropical corals: A new geochemical tool for probing biomineralization. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69,

3265–3284. doi: 10.1016/j.gca.2005.02.030

Sinclair, D.J., Kinsley, L.P.J., McCulloch, M.T., 1998. High resolution analysis of trace elements in corals by laser ablation ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1889-1901.

SILVA, Daniela Machado. As mudanças climáticas e um comparativo entre o protocolo de Quioto e o Acordo de Paris. 2019. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Relações Internacionais, Universidade do Sul de Santa Catarina C, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/10715/4/TCC%20-%20Daniela%20Machado%20Silva.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2023.

SMITH J.M., Quinn T.M., Kevin P.H. & Hally R.B. 2006. Reproducibility of geochemical and climate signals in the Atlantic coral *Montastraea faveolata*, *Paleoceanography*, Vol.21, PA1010, doi:10.1029/2005PA001187

SMITH, S.V., Buddemeier R.W., Redalje R.C. & Houck J.E. 1979. Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. *Science*, 204:404-407.

SOUZA, Maria Cristina Oliveira; CORAZZA, Rosana Icassatti. Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 42, p.52-80, 2017.

SOUZA, Carlos M.; SHIMBO, Julia Z.; ROSA, Marcos R.; PARENTE, Leandro L.; ALENCAR, Ane A.; RUDORFF, Bernardo F. T.; HASENACK, Heinrich; MATSUMOTO, Marcelo; FERREIRA, Laerte G.; SOUZA-FILHO, Pedro W. M.. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, [S.L.], v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172735>.

Steiner, AQ, Amaral, FMD, Amaral, JR de BC do, Sassi, R., & Barradas, JI (2015). Zona de recifes emersos da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais, Nordeste do Brasil. *Iheringia. Série Zoologia*, 105(2), 184–192. doi:10.1590/1678-476620151052184192

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Meehl GA, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). *Climate Change 2013:*

The Physical Science Basis. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NI, EUA.

Thomas Felis , Atsushi Suzuki , Henning Kuhnert , Mihai Dima , Gerrit Lohmann , Hodaka Kawahata; Os corais subtropicais revelam uma renovação abrupta do início do século XX no oeste do Oceano Pacífico Norte. *Geologia* 2009;; 37 (6): 527–530. faça: <https://doi.org/10.1130/G25581A.1>

Tierney, J. E., N. J. Abram, K. J. Anchukaitis, M. N. Evans, C. Giry, K. H. Kilbourne, C. P. Saenger, H. C. Wu, and J. Zinke (2015), Tropical sea surface temperatures for the past four centuries reconstructed from coral archives, *Paleoceanography*, 30, 226–252, doi:[10.1002/2014PA002717](https://doi.org/10.1002/2014PA002717).

Trotter, J., Montagna, P., McCulloch, M., Silenzi, S., Reynaud, S., Mortimer, G., ... & Rodolfo-Metalpa, R. (2011). Quantifying the ph ‘vital effect’ in the temperate zooxanthellate coral *Cladocora caespitosa*: validation of the boron seawater ph proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3-4), 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.01.030>

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2021). *Becoming #GenerationRestoration: Ecosystem restoration for people, nature and climate*. Nairobi

Vengosh, A., K. G. Heumann, S. Juraske, and R. Kashner, Boron isotope application for tracing the sources of contamination in groundwater, *Environ. Sci. Technol.*, 28, 1968 – 1974, 1994.

Vengosh, A., S. Barth, K. G. Heumann, and S. Eisenhut, Boron isotopic composition of freshwater lakes from central Europe and possible contamination sources, *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 27, 416 – 421, 1999.

WEBER J.N. 1973. Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 37:2173-2190.

Wu, Y., Fallon, S. J., Cantin, N. E., & Lough, J. M. (2021). Assessing multiproxy approaches (Sr/Ca, U/Ca, Li/Mg, and B/Mg) to reconstruct sea surface temperature from coral skeletons throughout the Great Barrier Reef. *The Science of the Total Environment*, 786(147393), 147393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147393>

ZHANG, Yong Yu et al. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China. *Science China Earth Sciences*, v. 60, n. 12, p. 2097– 2107, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9148-7>