Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

VARIABILIDADE DO CRESCIMENTO CORALÍNEO EM BÚZIOS (RJ): UMA COMPARAÇÃO COM ANOMALIAS ASSOCIADAS AO EL NIÑO–SOUTHERN OSCILLATION (ENSO)

CORAL GROWTH VARIABILITY IN BÚZIOS (RJ, BRAZIL): A COMPARISON WITH EL NIÑO–SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) ANOMALIES

Giulia Ferrazzano, Vinícius Ribau Mendes, Letícia Maria Cavole

Universidade de São Paulo, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Curso de Gestão Ambiental
E-mail para contato: g.ferrazzano@usp.br

RESUMO – Este estudo avaliou a variabilidade do crescimento coralíneo na região de Búzios (RJ) a partir de três testemunhos, comparando séries de extensão anual com anomalias do El Niño–Oscilação Sul (ENSO) e investigando a influência da ressurgência costeira. Os resultados indicaram elevada variabilidade interanual e tendência de maiores taxas de crescimento durante eventos de El Niño, embora essa relação não tenha sido uniforme ao longo da série. Aproximadamente 70% dos eventos de El Niño e 84% dos eventos fortes coincidiram com maior crescimento coralíneo. Os resultados sugerem a atuação conjunta de forçantes climáticas de grande escala e processos locais na modulação do crescimento dos corais.

Palavras-chave: paleoclimatologia; crescimento de corais; El Niño- Oscilação Sul (ENSO)

ABSTRACT – This study evaluated the variability of coral growth in the Búzios region (Rio de Janeiro, Brazil) using three coral cores, comparing annual extension series with El Niño–Southern Oscillation (ENSO) anomalies and investigating the influence of coastal upwelling. The results revealed high interannual variability and a tendency toward higher growth rates during El Niño events, although this relationship was not consistent throughout the record. Approximately 70% of El Niño events and 84% of strong events coincided with increased coral growth. The findings suggest the combined influence of large-scale climatic forcing and local processes in modulating coral growth.

Keywords: paleoclimatology; coral growth; El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

O oceano é o maior reservatório de calor do planeta tendo, por isso, um papel fundamental no sistema climático global. Nesse contexto, a temperatura da superfície do mar (TSM) é uma das principais variáveis de controle climático, associada à dinâmica de fenômenos de grande escala como o El Niño Southern Oscillation (ENSO).

Para compreender a variabilidade da temperatura dos oceanos e sua relação com esses fenômenos, torna-se necessário reconstituir as condições ambientais pretéritas por meio de registros paleoclimatológicos. A reconstituição dos padrões TSM pode ser realizada a partir da análise geoquímica e estrutural das bandas de crescimento de corais de águas rasas longevos (Corrège, 2006; DeCarlo et al., 2020). Isto porque corais escleractíneos maciços e longevos (i.e., > 100 anos) atuam como arquivos naturais do ambiente marinho, pois seu exoesqueleto carbonático registra, ao longo da deposição de bandas de alta e baixa densidade anuais, variações nas condições físico-químicas da água do mar. A incorporação de elementos-traço e razões isotópicas nesse exoesqueleto ocorre de acordo com sua concentração na água do mar e, através de controles fisiológicos, muitas vezes podem ser relacionados a parâmetros ambientais, permitindo a reconstrução de variáveis como temperatura, salinidade e composição da água do mar em diferentes escalas temporais (Evangelista et al., 2018).

No contexto do Atlântico Sul, a variabilidade da TSM é influenciada por uma combinação de processos de grande escala e mecanismos regionais, incluindo a atuação da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico, a migração da Zona de Convergência Intertropical e a variabilidade associada ao *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO). Além disso, processos oceanográficos locais, como a ressurgência costeira, desempenham papel fundamental na modulação das condições ambientais na margem continental sudeste do Brasil, especificamente na região de Cabo Frio, no Rio de Janeiro (RJ).

A região de Búzios (RJ), localizada na margem continental sudeste brasileira, insere-se nesse contexto dinâmico, sendo influenciada tanto por forçantes climáticas de grande escala, como El Niño, quanto por processos locais de ressurgência. Na região de Cabo Frio, adjacente à área de estudo, a ressurgência traz águas frias de profundidade à zona costeira e também influencia o sistema carbonato da água do mar, alterando parâmetros como pH, carbono

ISSN 2317-1316

inorgânico dissolvido e estados de saturação de carbonato, os quais são fundamentais para processos de biocalcificação nos corais. A intensidade desses processos pode ser modulada por eventos de El Niño e La Niña, evidenciando a interação entre a variabilidade climática de grande escala e a dinâmica oceanográfica local (Ramos e Silva et al., 2023).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade do crescimento coralíneo na região de Búzios a partir da análise de crescimento de três testemunhos de corais *Siderastrea spp.*, comparando as séries de extensão anual (cm ano^{-1}) com anomalias de temperatura associadas ao ENSO. Apesar dos avanços na compreensão desses processos, ainda há lacunas no entendimento de como a interação entre forçantes de grande escala e mecanismos locais controla o crescimento coralíneo no Atlântico Sul.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo consiste em uma pesquisa experimental baseada na análise de três testemunhos de corais do gênero *Siderastrea* spp. coletados na região de Búzios (RJ). As variáveis analisadas foram a taxa de extensão coralínea anual (cm ano^{-1}) e as anomalias associadas ao *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO), representadas pelo índice Niño 3.4.

Os testemunhos foram lavados e, quando necessário, colados para recomposição de fragmentos gerados durante a coleta. Em seguida, as amostras foram submetidas à tomografia computadorizada (CT scan), juntamente com padrões de densidade de *Porites* spp. utilizados para calibração. As imagens obtidas foram processadas no software CoralCT, permitindo a visualização da estrutura interna dos esqueletos e a identificação das bandas anuais de crescimento.

A idade dos testemunhos e as taxas de extensão coralínea foram determinadas por meio da leitura das bandas de alta e baixa densidade, considerando cada par de bandas como um ano de crescimento. As análises foram realizadas em ambiente tridimensional, permitindo a seleção dos planos mais adequados para a leitura.

Os dados foram analisados no software R. Para reduzir a variabilidade individual entre colônias e destacar o sinal comum registrado pelos corais, foi construída uma série composta

ISSN 2317-1316

de extensão coralínea a partir da média anual das colônias BZC3, BZC4 e BZC5. Posteriormente, aplicou-se uma média móvel centrada de cinco anos para evidenciar padrões de variabilidade de baixa frequência.

A série composta foi comparada ao índice Niño 3.4, amplamente utilizado como indicador da intensidade e fase do ENSO. Foram utilizadas as anomalias de temperatura da superfície do mar referentes ao trimestre dezembro–janeiro–fevereiro (DJF). Para possibilitar a comparação entre as séries, os dados foram padronizados por meio do cálculo do z-score. Os anos foram classificados como El Niño (≥ +0,5 °C), La Niña (≤ −0,5 °C) ou neutros, conforme os critérios da NOAA. Adicionalmente, foram avaliados separadamente os eventos de El Niño forte (≥ +1,0 °C), buscando identificar possíveis relações entre a intensidade do fenômeno e a variabilidade do crescimento coralíneo.

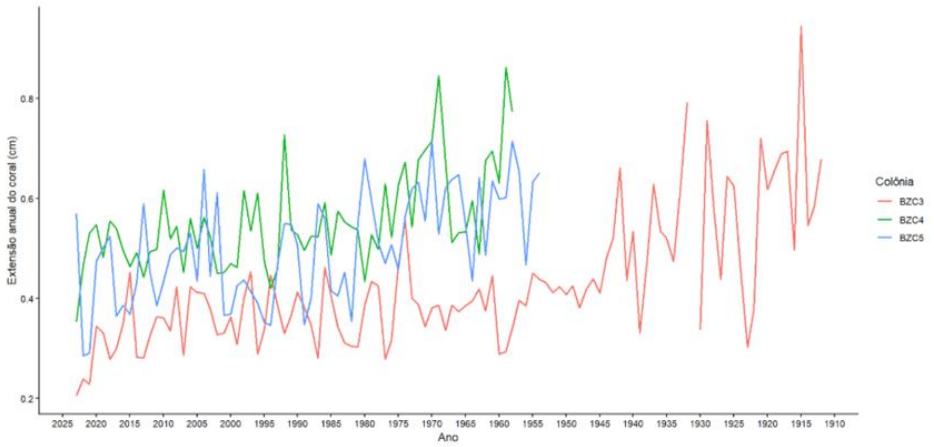
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram utilizadas três amostras de Búzios, identificadas pela abreviação de BZC3, a BZC4 e a BZC5, cujas estimativas de idade são 111 anos, 71 anos e 67 anos, respectivamente.

A Figura 1 apresenta as séries anuais de extensão coralínea obtidas a partir das três colônias analisadas (BZC3, BZC4 e BZC5), expressas em centímetros por ano ao longo de seus respectivos intervalos de crescimento. As séries foram construídas a partir da leitura das bandas anuais de crescimento em cada testemunho, permitindo a reconstrução da variação temporal da taxa de extensão linear para cada colônia individualmente.

ISSN 2317-1316

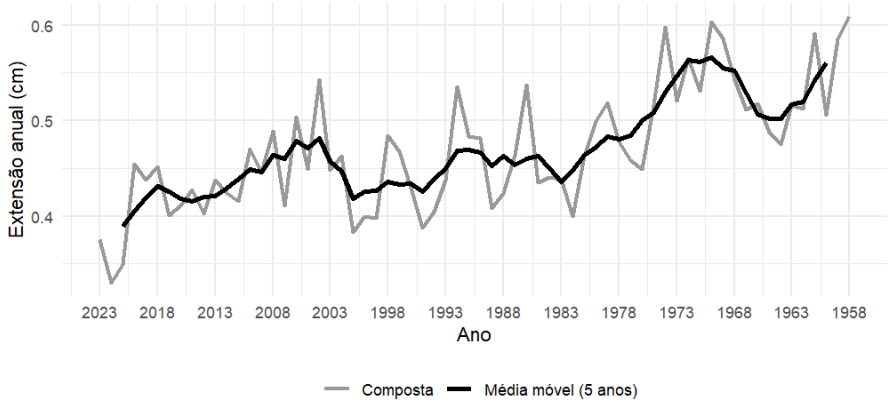
Figura 1: Séries anuais de extensão linear (cm ano⁻¹) das colônias de coral BZC3, BZC4 e BZC5 ao longo de seus respectivos períodos de crescimento



A colônia BZC3 apresentou uma taxa média anual de extensão de 0,359 cm/ano, com desvio padrão de 0,064 cm/ano. A colônia BZC4 apresentou média de 0,554 cm/ano e desvio padrão de 0,098 cm/ano, enquanto a colônia BZC5 apresentou média de 0,498 cm/ano e desvio padrão de 0,105 cm/ano.

Na Figura 2, apresenta-se a série composta de extensão coralínea para os três testemunhos analisados, juntamente com a aplicação de uma média móvel de 5 anos, com o objetivo de destacar padrões de variabilidade de baixa frequência. A série original (linha cinza) evidencia a variabilidade interanual do crescimento, enquanto a média móvel (linha preta) suaviza essas oscilações de curto prazo, permitindo uma melhor visualização das tendências ao longo do tempo, bem como possíveis padrões decadais no crescimento.

Figura 2: Composta e média móvel das extensões anuais dos corais

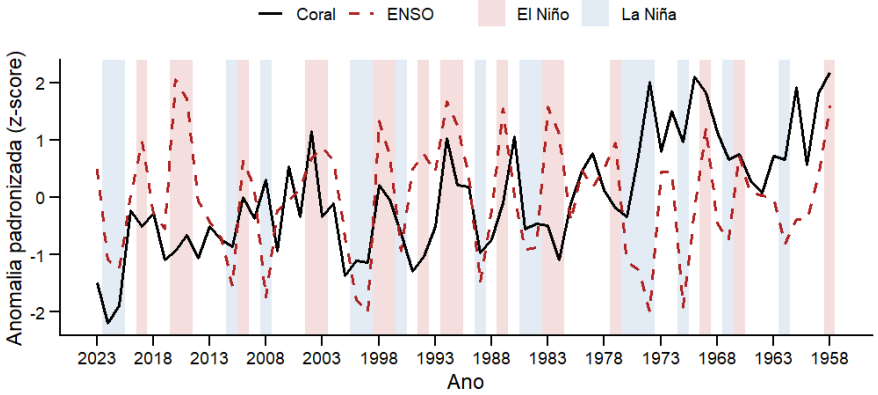


ISSN 2317-1316

A série composta de extensão coralínea apresenta elevada variabilidade interanual ao longo de todo o período analisado. A aplicação de uma média móvel de 5 anos permite evidenciar padrões de variabilidade de baixa frequência, indicando que os maiores valores de crescimento se concentram nas décadas mais antigas do registro, especialmente entre as décadas de 1960 e 1970. Em contraste, observa-se uma tendência de valores relativamente mais baixos nas décadas mais recentes, sugerindo uma possível redução na taxa média de extensão coralínea em direção ao presente.

Com o objetivo de investigar possíveis relações entre a variabilidade observada na extensão coralínea e forçantes climáticas de grande escala, a série composta foi comparada com as anomalias sazonais de TSM associadas ao El Niño–Southern Oscillation (ENSO). A Figura 3 apresenta a série composta padronizada de extensão coralínea em conjunto com o índice ENSO para o mesmo período, bem como a identificação dos eventos de El Niño e La Niña.

Figura 3: Comparação entre anomalias ENSO e série composta da extensão coralínea



A comparação entre a série composta e o ENSO indica que, em diversos períodos, eventos de El Niño coincidem com anos de maior extensão coralínea, enquanto eventos de La Niña tendem a ocorrer durante fases de menor crescimento.

Além disso, foram construídos gráficos destacando especificamente os períodos classificados como El Niño. A Figura 4 apresenta a série composta de extensão coralínea em conjunto com o índice ENSO, com ênfase em todos os eventos de El Niño (anomalias $\geqslant$ 0,5 $^{\circ}$ C), enquanto a Figura 5 destaca exclusivamente os eventos de El Niño forte (anomalias $\geqslant$ 1,0 $^{\circ}$ C). Essa abordagem permite avaliar se a resposta do crescimento coralíneo ocorre de

ISSN 2317-1316

maneira generalizada durante episódios de El Niño ou se se intensifica em eventos de maior magnitude.

Figura 4: Comparação entre eventos El Niño (anomalias ≥ 0,5 °C) e série composta da extensão coralínea

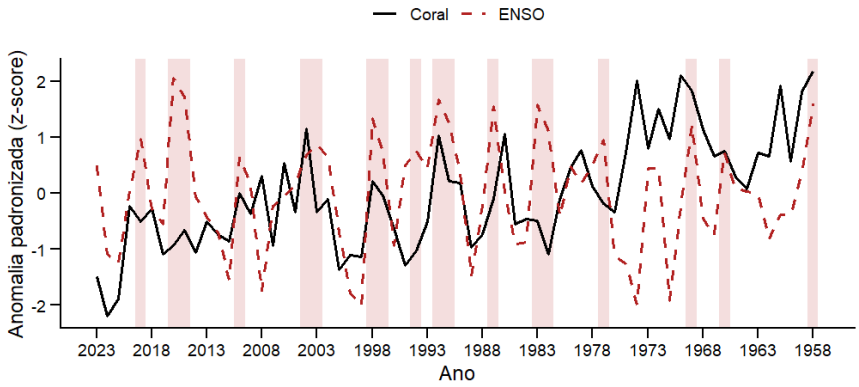
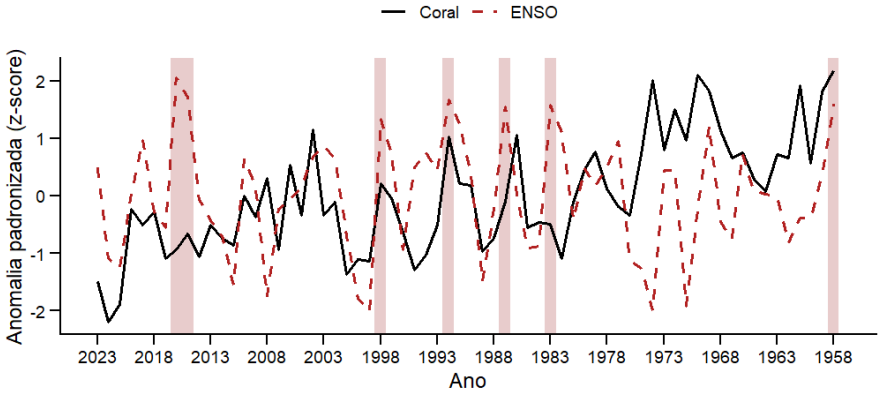


Figura 5: Comparação entre eventos El Niño forte (anomalias ≥ 1,0 °C) e série composta da extensão coralínea



Considerando todos os eventos de El Niño identificados no período, independentemente de sua intensidade, verificou-se que em nove dos treze episódios (aproximadamente 70%) o crescimento coralíneo apresentou valores mais elevados. Quando analisados apenas os eventos classificados como El Niño forte, observou-se que, entre os seis episódios registrados, cinco coincidiram com anos de maior crescimento do coral, correspondendo a cerca de 84% dos casos.

A determinação de idade a partir de estruturas calcificadas envolve, inerentemente, um componente de subjetividade, associado tanto à preparação das amostras quanto à interpretação das feições periódicas de crescimento, podendo resultar em erros de natureza aleatória e sistemática (Boehlert, 1985; Campana & Moksness, 1991). Nesse contexto, pequenas

ISSN 2317-1316

imprecisões cronológicas, da ordem de aproximadamente 1 ano, são relativamente comuns em registros baseados em bandas de crescimento, podendo ocorrer tanto pela não identificação de uma banda anual quanto pela interpretação de bandas sub-anuais como anuais (Comboul et al., 2014). Dessa forma, a análise das séries temporais deve considerar essa incerteza, sendo fundamental a avaliação visual dos padrões de variabilidade, permitindo reconhecer correspondências entre picos e vales de crescimento mesmo quando estes se encontram ligeiramente desalinhados no tempo. Nesse sentido, as análises feitas não se tratam de análises que se pautam na estatística, mas sim, análises visuais de comparação entre picos e vales das séries temporais de crescimento obtidas, bem como da nitidez observada nas bandas de densidade.

No período de sobreposição entre as colônias, observa-se uma coerência geral nos padrões de variação, sugerindo a presença de um sinal ambiental comum controlando o crescimento coralíneo. De fato, todas as colônias apresentaram uma tendência de diminuição na taxa de extensão ao longo do tempo. As colônias BZC4 e BZC5 apresentam, em média, taxas de extensão superiores às de BZC3, o que pode refletir diferenças biológicas intrínsecas e/ou condições micro ambientais distintas.

A construção da série composta permite minimizar a variabilidade individual e evidenciar de forma mais robusta o sinal ambiental regional. A análise dessa série indica elevada variabilidade interanual ao longo de todo o período, ao mesmo tempo em que sugere uma tendência de valores mais elevados nas porções mais antigas do registro e uma possível redução da taxa média de extensão coralínea em direção ao presente.

A comparação entre a série composta de extensão coralínea e as anomalias associadas ao El Niño–Southern Oscillation (ENSO) revela padrões sugestivos de interação entre a variabilidade climática de grande escala e o crescimento coralíneo. Embora o índice Niño 3.4 represente uma região remota no Pacífico equatorial, sua relação com o crescimento coralíneo em Búzios pode ser compreendida a partir de mecanismos de teleconexão atmosférica e relações oceano-atmosfera. Durante eventos de El Niño, alterações na circulação atmosférica promovem mudanças nos padrões de vento e na troca de calor entre oceano e atmosfera, cujos efeitos se propagam para o Atlântico Sul. Essas mudanças podem influenciar a TSM, a

ISSN 2317-1316

estratificação da coluna d'água, a intensidade da mistura vertical e a disponibilidade de nutrientes, fatores diretamente relacionados ao crescimento coralíneo. Nesse contexto, o índice Niño 3.4 deve ser interpretado como um indicador integrado da forçante climática global, capaz de modular, ainda que indiretamente, as condições ambientais regionais que controlam o crescimento dos corais.

Os padrões observados indicam que, em alguns períodos, eventos de El Niño coincidem com aumentos na extensão coralínea, enquanto eventos de La Niña estão, em certos casos, associados a valores mais baixos de crescimento. Por exemplo, no início da década de 1970, observa-se um período de crescimento relativamente elevado associado a anomalias positivas do El Niño–Southern Oscillation, sugerindo condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento coralíneo. De forma semelhante, em determinados eventos nas décadas de 1990 e 2000, picos de crescimento também ocorrem em associação com fases positivas do ENSO. No entanto, essa correspondência não se mantém de forma consistente ao longo de toda a série (ainda que em aproximadamente 70% dos casos de El Niño, e 84% de El Niño forte), sendo observados episódios em que eventos de El Niño não resultam em aumentos significativos na extensão coralínea, assim como períodos de La Niña que não estão associados a reduções expressivas no crescimento. Esse comportamento reforça a interpretação de que a resposta coralínea ao ENSO não é direta, mas modulada por outros fatores ambientais e processos oceanográficos regionais.

A influência de processos locais é, portanto, fundamental para a interpretação desses padrões. A região de Búzios é influenciada por processos de ressurgência costeira, associados à atuação de ventos e à dinâmica da circulação da margem oeste do Atlântico Sul, que promovem o afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), caracterizada por temperaturas mais baixas e maior concentração de nutrientes. A ACAS constitui uma massa de água subsuperficial relevante na dinâmica da margem continental sudeste do Brasil (SILVEIRA et al., 2000) e está associada aos eventos de ressurgência que modulam as condições ambientais na região.

Estudos realizados na região de Cabo Frio indicam que a ressurgência costeira promove mudanças nas condições físico-químicas da água do mar, incluindo variações nos parâmetros

ISSN 2317-1316

do sistema carbonato, que são parcialmente controladas pela variabilidade do El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Essas alterações podem impactar diretamente organismos calcificado-res, como os corais, ao modificar as condições de calcificação (Ramos e Silva et al., 2023). Esse mecanismo fornece uma possível explicação para os padrões observados neste estudo, nos quais eventos de El Niño tendem a coincidir com maiores taxas de crescimento coralíneo, possivelmente associados à redução da ressurgência e ao aumento da TSM, que serão investigados em estudos futuros.

4 CONCLUSÃO

Em síntese, os resultados deste estudo indicam que o crescimento coralíneo na região de Búzios é controlado por uma interação entre forçantes de diferentes escalas, na qual a variabilidade climática associada ao El Niño–Southern Oscillation (ENSO) possivelmente atua em conjunto com processos oceanográficos locais, como a ressurgência costeira. De modo geral, observa-se uma tendência de associação entre eventos de ENSO e maiores taxas de crescimento, possivelmente relacionadas a temperaturas mais elevadas. Adicionalmente, este estudo apresenta limitações que abrem perspectivas importantes para investigações futuras. A ausência de séries temporais locais de temperatura da superfície do mar (TSM) impediu a avaliação direta da influência da ressurgência sobre o crescimento coralíneo, sendo essa interpretação baseada em inferências indiretas. Nesse sentido, a incorporação de dados de TSM representa um passo fundamental para o refinamento das análises, permitindo testar de forma mais robusta o papel dos processos oceanográficos locais na modulação do crescimento dos corais. Por fim, agradece-se à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de Iniciação Científica (Processo nº 2025/05223-5).

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Declaração de Uso de IA: Durante a elaboração deste trabalho, utilizou-se a ferramenta ChatGPT para revisar ortografia e coesão textual e como auxílio na revisão dos códigos para geração dos gráficos no R. O conteúdo gerado foi revisado, editado e validado pelos autores,

ISSN 2317-1316

que assumem total responsabilidade pelo texto final.

6 REFERÊNCIAS

Boehlert, G. W. (1985). Using objective criteria and multiple regression models for age determination in fishes. Fishery Bulletin, 83, 103–11

Campana, S. E., & Moksness, E. (1991). Accuracy and precision of age and hatch date estimates of larval fish. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 48(5), 902–910.

Chaves, R. R., & Nobre, P. (2004). Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. Geophysical Research Letters, 31(3). https://doi.org/10.1029/2003GL018647

Comboul, C., et al. (2014). A probabilistic model of chronological errors in coral climate records. Paleoceanography, 29, 687–710.

Corrège, T. (2006). Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 232(2–4), 408–428. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.014

DeCarlo, T. M., Gajdzik, L., Ellis, J., Coker, D. J., Roberts, M. B., Hammerman, N. M., Pandolfi, J. M., Monroe, A. A., & Berumen, M. L. (2020). Nutrient-supplying ocean currents modulate coral bleaching susceptibility. Science Advances, 6(34), eabc5493. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc5493

Evangelista, H., Sifeddine, A., Corrège, T., Servain, J., Dassie, E. P., Logato, R., Cordeiro, R. C., Shen, C.-C., Le Cornec, F., Nogueira, J., Segal, B., Castagna, A., & Turcq, B. (2018). Climatic constraints on growth rate and geochemistry (Sr/Ca and U/Ca) of the coral Siderastrea stellata in the southwest equatorial Atlantic (Rocas Atoll, Brazil). Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(3), 772–786. https://doi.org/10.1002/2017GC007365

Ramos e Silva, C. A., Fernandes, L. V. G., Souza, F. E. S., Marotta, H., Fernandes, F. C., Mello, T. M. S., Monteiro, N. S. C., Rocha, A. A., Coutinho, R., Fernandes, L. D. A., Damasceno, R. N., & Santos, L. C. (2023). *Carbonate system in the Cabo Frio upwelling*. Scientific Reports, 13, Article 5273. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31479-x

ISSN 2317-1316

Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(12), 2771–2777.