

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

NATIELY PRISCILA PAIVA MONTEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO ESTRESSE TÉRMICO
SOBRE O BANCO DE ABROLHOS, ATLÂNTICO SUL.**

VITÓRIA
2021

NATIELY PRISCILA PAIVA MONTEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO ESTRESSE TÉRMICO
SOBRE O BANCO DE ABROLHOS, ATLÂNTICO SUL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre/Doutor em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Renato David Ghisolfi.

Coorientador: Dr. Guilherme Mill.

VITÓRIA

2021

NATIELY PRISCILA PAIVA MONTEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO ESTRESSE TÉRMICO
SOBRE O BANCO DE ABROLHOS, ATLÂNTICO SUL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo/UFES

Prof. Dr. Fabian Sá – Examinador Interno
Universidade Federal do Espírito Santo/UFES

Prof. Dr. Ruy Kengi Papa de Kikuchi –
Examinador Externo
Universidade Federal da Bahia/UFBA

À minha filha Luísa, meu amor infinito,
minha conexão divina.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu marido e a minha família por sempre me incentivarem e acreditarem em mim. Vocês foram essenciais nessa jornada e sempre me disseram que eu poderia sonhar e concretizar. À minha amada filha Luisa, por ser minha a razão de seguir sempre em frente, principalmente diante de tantas adversidades e obstáculos que enfrentamos em meio à pandemia. Te amo filha, feliz um ano!

Ao professor Ghisolfi que desde o início da minha jornada me deu o apoio necessário, acreditando em mim, mesmo eu vindo de outro estado, dando-me a oportunidade de evoluir e crescer. Obrigada pela confiança e pelos ensinamentos! Ao meu co-orientador Guilherme Mill por ser fonte de conhecimento e paciência para comigo.

Aos meus amigos de laboratório: Julia, Tayná, Fernandinha, Sabrina e Bruno. Obrigada pelos momentos de descontração, carinho e de ensinamentos também. Aos meus amigos mais próximos e mais que especiais: Cintia, Gê Salvador, Natacha, Rayme, Gabi, Nairana, Samantha, Nathi Bignotto, Nathi Betzel, Duda, Maitê, Branco, obrigada pelos desabafos, risadas, abraços e ajuda, vocês moram no meu coração!

Ao professor Alex Bastos e ao professor Rodrigo Moura por fornecerem os dados *in situ* para a realização deste trabalho.

À CAPES pelo incentivo da bolsa de estudos, principalmente diante da atual conjuntura de pandemia. Ao professor Fabian pelo encorajamento nos momentos tensos. Ao professor Agnaldo pelas aulas dinâmicas. A todos que ajudaram de alguma forma na minha evolução, muito obrigada!

RESUMO

O Estresse Térmico (ET) que está associado a alteração na temperatura que pode ser suficientemente severa para causar condições desfavoráveis ou mesmo letais aos organismos aquáticos, suas populações, estrutura de comunidade ou ecossistemas, também tem sido associado ao branqueamento dos corais. Neste sentido, é imprescindível o acompanhamento da variabilidade espaço-temporal da temperatura da água do mar, como por exemplo na região do Banco de Abrolhos. O *Coral Reef Watch* (CRW) disponibiliza medidas diárias *ex-situ* da temperatura da superfície do mar representativos para essa área. Apesar da TSM ser uma fonte importante de dados, principalmente na ausência de medidas *in situ*, é imprescindível que se avalie a representatividade espaço-temporal dessa medição comparando-a com aquelas realizadas em campo. Dessa forma, será possível se avaliar se o estresse térmico indicado pelo CRW é representativo, isto é, ele é semelhante aquele estimado a partir das medidas de temperatura da água do mar *in loco*.

O objetivo geral deste estudo é avaliar a representatividade espaço-temporal das medidas de temperatura e estimativas de estresse térmico obtidas *in situ* e *ex-situ* sobre o Banco de Abrolhos. Os resultados obtidos mostraram que padrão térmico observado em Abrolhos se caracteriza por um padrão aquecimento-resfriamento, sendo o pico da temperatura observado no final do verão início do outono. Quando se comparam os alertas gerados por uma série de temperatura pontual pelo CRW com medidas *in situ* obtidas em diferentes profundidades e locais viu-se que a extrapolação espacial não é válida. A comparação entre os dados *in situ* e do CRW mostrou que, tanto na duração quanto na intensidade do alerta, as diferenças entre a estimativa de temperatura *ex-situ* e a temperatura que realmente atua sobre os corais podem ser grandes. Essas diferenças refletem em parte a estratificação vertical sobre o Banco de Abrolhos nos meses críticos de fluxo líquido de calor em direção ao oceano (final do período chuvoso e início do período seco). As medições de temperatura dos corais profundos e do arco externo mostraram valores inferiores a Máxima Temperatura Média Mensal, impedindo o estresse térmico sobre os corais. Na estação seca ocorre a homogeneidade térmica da coluna de água. Finalmente, para os recifes costeiros e rasos (porém relativamente distantes da costa) os alertas de branqueamento se comparam entre si. No entanto, isso não significa que o branqueamento efetivamente ocorrerá no nível predito já que ele precisa ser avaliado pontualmente e individualmente, pois processos físico-químicos podem afetá-los distintamente em diferentes locais.

Palavras-chave: Estresse térmico, branqueamento, Abrolhos, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Thermal stress (ET), which is associated with a change in temperature that can be severe enough to cause unfavorable or even lethal conditions to aquatic organisms, populations, community structure, or ecosystems, has also been associated with coral bleaching. In this sense, it is essential to monitor the spatial-temporal variability of seawater temperature everywhere, including in the Abrolhos Bank region. Coral Reef Watch (CRW) provides *ex-situ* daily sea surface temperature measurements for this area. Although TSM is an essential source of data, especially in the absence of *in situ* measurements, it is necessary to evaluate this measurement's spatial-temporal representativeness compared to those taken in the field. Thus, it will be possible to assess whether the thermal stress indicated by CRW is representative, i.e., it is similar to that estimated from on-site seawater temperature measurements.

This study's general objective is to evaluate the space-time representativeness of the temperature measurements and thermal stress estimates obtained *in situ* and *ex-situ* on the Abrolhos Bank. The results obtained showed that the thermal pattern observed in Abrolhos is characterized by a heating-cooling cycle, with the peak temperature observed at the end of the summer beginning of autumn. When comparing the alerts generated by a single point temperature series by CRW with *in situ* measurements obtained at different depths and locations, it was seen that the spatial extrapolation is not valid. The comparison between *in situ* and CRW data showed that, both in the alert's duration and intensity, the differences between the *ex-situ* temperature estimate and the temperature that acts on the corals could be considerable. These differences partly reflect the vertical stratification on the Abrolhos Bank in the critical months of liquid heat flow towards the ocean (end of the rainy season and beginning of the dry season). Temperature measurements of the deep corals and the outer bow showed values below the Maximum Mean Monthly Temperature, preventing thermal stress on the corals. In the dry season, the thermal homogeneity of the water column occurs. Finally, for coastal and shallow reefs (but relatively distant from the coast), the bleaching alerts compare with each other. However, this does not mean that the whitening will effectively occur at the predicted level. It needs to be evaluated punctually and individually since physical-chemical processes can affect them distinctly in different locations.

Keywords: Thermal stress, bleaching, Abrolhos, remote sensing.

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Pontos, localização relativa e período de tempo amostrado.	19
Tabela 2: Os níveis de estresse térmico de branqueamento de coral do satélite CRW com a definição dos produtos de monitoramento Hot Spot e Grau de Calor Semanal com as possibilidades de impacto sobre o ecossistema recifal. (Modificado: Strong et al, 2011)	21
Tabela 3: Data observada da maior (vermelho) e menor (azul) temperatura da superfície do mar de acordo com os dados do Coral Reef Watch. Os valores máximos estão na faixa de 28 °C e os mínimos são menores que 25°C.	24
Tabela 4: Duração do intervalo quente ($T > \text{MMM}$ - vermelho) e frio ($T < \text{MMM}$ - frio) no período 2013 a 2018.....	24

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Mapa da região de Abrolhos com os pontos CRW (Coral Reef Watch), PL (Pedra de Leste), SG (Sebastião Gomes), PN (Portinho Norte), Farol, PAB2, PAB3, MC (Mesofótico Califórnia Parede e Topo), RR (Rodolito Raso), RB (Rodolito próximo à Buraca) e Buracas. Os polígonos na cor azul delimitam à área do Parque Marinho de Abrolhos. Os pontos dos dados amostrados se encontram na isóbata de 25 m.	15
Figura 2: Representação do trajeto das correntes marítimas no Atlântico Sul. Fonte: BBC News Brasil. Adaptado do site: (https://www.bbc.com/portuguese/brasil-50270579). Acesso em 31 de agosto de 2020.	16
Figura 3: Representação esquemática da distribuição de megahabitats na plataforma de Abrolhos. A partir da linha de costa são indicados os recifes costeiros rasos, a ilha de Santa Bárbara que faz parte do Arquipélago dos Abrolhos, os recifes costeiros externos, os recifes mesofóticos externos, o banco de rodolitos e buraca. Infográfico: Rede Abrolhos. Acesso em: 15 de outubro de 2020.	18
Figura 4: Componentes e o balanço líquido mensal de calor na interface oceano-atmosfera válido para a área de estudo. De acordo com a figura o máximo ganho líquido de calor ocorre em janeiro e a máxima perda em junho. Da mesma forma, entre os meses de abril a setembro o oceano perde calor para a atmosfera e ganha calor nos demais meses do ano. Grossoiramente, esses mesmos períodos marcam as condições meteorológicas secas e úmidas desta região. Reprodução de: (Ghisolfi et al., 2015).	22
Figura 5: Distribuição anual da Temperatura da Superfície do Mar para os anos de 2013 a 2018 de acordo com as medidas disponibilizadas pelo CRW. A linha preta tracejada delimita o valor de 26.952° C que marca a Máxima Temperatura Média Mensal (MMM) determinada pela metodologia do Coral Reef Watch sobre a qual são estimadas as anomalias térmicas.	22
Figura 6: Distribuição da TSM para o período 2013 a 2018. Os valores estão filtrados com uma janela de média móvel de 48 pontos. Os números são indicativos das datas indicadas na Tabela 3. As linhas tracejadas são indicativos da temperatura máxima, MMM e temperatura máxima, MMM e temperatura mínima.	23
Figura 7: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no recife Sebastião Gomes (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	26
Figura 8: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no recife Pedra de Leste (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes, apesar da ausência de dados in situ entre Abr/15 e Jul/16.	26
Figura 9: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no Farol (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	28
Figura 10: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no Portinho Norte (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	28
Figura 11: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no ponto PAB2 (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	29
Figura 12: Distribuição temporal da TSM (CRW – vermelho) e a temperatura medida in situ no ponto PAB3 (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	29
Figura 13: Distribuição temporal da TSM (CRW – azul) e a temperatura medida in situ no recife Califórnia - Topo (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	30

Figura 14: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no recife Califórnia – Parede (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	30
Figura 15: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ na Buraca (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	31
Figura 16: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no ponto Rodolito próximo à buraca (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	31
Figura 17: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida in situ no ponto Rodolito Raso (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.	32
Figura 18: Distribuição de temporal da temperatura e alertas para as medidas in situ (topo cor amarela) e Coral Reef Watch (inferior) para recife Sebastião Gomes no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. Apesar da temperatura in situ estar acima da MMM até Mai/17 não há alerta de branqueamento porque não houve acúmulo de estresse térmico conforme a metodologia desenvolvida pelo CRW. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	34
Figura 19: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o recife Pedra de Leste no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	35
Figura 20: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Farol no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	36
Figura 21: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Portinho Norte no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	36
Figura 22: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto PAB2 no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	37
Figura 23: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto PAB3 no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	37
Figura 24: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Califórnia Topo no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	38

Figura 25: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Califórnia Parede no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	38
Figura 26: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Buraca no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	39
Figura 27: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Rodolito próximo à buraca no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	39
Figura 28: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas in situ (topo) e Coral Reef Watch (inferior) para o ponto Rodolito Raso no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no plot superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.	40
Figura 29: Mapas de médias mensais climatológicas de TSM (°C) obtidas através do sensor AVHRR do programa NOAA <i>Pathfinder</i> para o mês de janeiro (superior) e julho (inferior). As linhas tracejadas representam as isóbatas de 100m, 200m e 500m, respectivamente. Fonte: Souza et al. (2007).	43
Figura 30: Gráfico com os valores de GCS plurianuais da CRW para 2013- 2018. Nota-se que o maior valor de GCS é no ano de 2016 entre os meses de março a julho. As linhas tracejadas em (vermelho) representam os valores de GCS de 4°C-semanas e 8°C- semanas. Valores maiores ou iguais a 8°C- semanas indicam um amplo branqueamento e mortalidade de ecossistemas recifais.	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	METODOLOGIA	14
2.1	Área de estudo.....	14
2.2	Dados	218
2.3	Método.....	22
3	RESULTADOS	21
4	DISCUSSÃO.....	40
5	CONCLUSÃO.....	49
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Pode-se definir o Estresse Térmico (ET) como “*um termo que descreve a alteração na temperatura que é suficientemente severa para causar condições desfavoráveis ou mesmo letais aos organismos aquáticos, suas populações, estrutura de comunidade ou ecossistemas*” (Agency of Natural Resources, 2020). A temperatura pode ser considerada como um fator estressante que mais influencia o meio aquático, uma vez que ela pode se manifestar tanto no âmbito físico (ex., reduzindo o teor de oxigênio dissolvido), quanto químico (ex., alterando a concentração de substâncias na água) e/ou biológico (ex., afetando o metabolismo da biota aquática).

O ET é um dos principais estressores ambientais responsáveis por ocasionar o branqueamento dos corais (Lought *et al.*, 2018), isto é, a morte do coral resultado da expulsão das algas zooxantelas que vivem em simbiose dentro dos esqueletos dos corais (Jokel & Coles, 1977; Glynn, 1983; Gates *et al.*, 1992).

A nível mundial, relatos de branqueamento de corais se iniciaram no início do século XX (Verril, 1902), porém em 1982-1983 houveram relatos de branqueamento (Cortés *et al.*, 1984; Glynn, 1984; Robinson, 1985; Prah, 1986; Glynn *et al.*, 1988) em escalas globais e regionais (Hughes *et al.*, 2017), que descreveu sobre a significativa mortalidade de corais no Pacífico que tiveram um aquecimento prolongado da água do mar. Desde então, houve um aumento no número desses episódios que foram associados ao aquecimento global e aos fortes eventos do *El Niño* (exemplos, Glynn *et al.*, 1993; Oliver *et al.*, 2009). Nessa linha de raciocínio, os estudos de Hughes *et al.* (2018) relataram que houve um aumento de 1°C sobre a temperatura média da superfície da Terra a partir da década de 1980 enquanto que, os anos de 2015 e 2016 foram apontados como os anos com as temperaturas mais quentes globais da Terra. Em águas mais quentes do que um valor médio climatológico, os recifes de corais diminuíram em 50% nos últimos 30 a 50 anos (Hughes, 1994; Gardner *et al.*, 2003; Bruno & Selig, 2007; De'ath *et al.*, 2012).

Segundo o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC – 2014 *Intergovernmental Panel on Climate Change*) os oceanos estariam sofrendo mudanças irreversíveis com o aumento das emissões de gases à atmosfera responsáveis pelo efeito estufa. Esses gases absorvem o calor emitido pela superfície da Terra e o reemitem de volta resultando em um aumento da temperatura global. O calor em excesso na atmosfera

é também transferido para o oceano. Estimativas feitas no IPCC AR5 5.2.2.3 (IPCC, 2014) indicaram que no período de 1993 a 2003 o oceano foi a componente do sistema climático que absorveu mais de 90% do excesso de calor retido pelos gases do efeito estufa. Além do aumento da temperatura da água do mar, a absorção desse excesso de calor tem sido associada, por exemplo, à elevação dos níveis do mar (Kopp *et al.*, 2017), a intensificação da salinização das águas subterrâneas costeiras (Liu *et al.* 2010), à acidificação dos oceanos (Griffis *et al.*, 2018), além é claro da recorrência e, possivelmente, severidade de episódios de branqueamento dos corais à nível global que podem culminar com danos irreversíveis aos corais (WINTER, 2016).

Como mencionado anteriormente, eventos de branqueamento de corais estariam associados às anomalias de temperatura da água do mar (Glynn, 1983; Bruno *et al.*, 2001; Shuail *et al.*, 2016; Barkley *et al.*, 2018; Hughes *et al.*, 2018), isto é, as águas estariam em torno de 1°C a 2°C acima do nível tolerável pelo coral. Tão importante quanto à anomalia térmica é a sua duração, já que os corais são sensíveis a qualquer acúmulo de estresse térmico ao longo do tempo (Glynn & D' Croz, 1990). Assim, é esperado que quanto maior a anomalia e o tempo de duração, maior será o dano ao coral.

No entanto, nem sempre o estresse térmico levou ao seu clareamento (exemplos, Guest *et al.*, 2012; Pratchett *et al.*, 2013), fato esse que, poderia ser atribuído à aclimatação dos corais a essas condições (Gintert *et al.*, 2018). Por outro lado, Donner *et al.* (2017) e Oliver *et al.* (2009) chamam atenção para a limitação dos bancos de dados acerca das informações sobre o branqueamento, já que não se difeririam entre ausência de branqueamento e ausência de observações.

Em nível de Atlântico Sul, os recifes de corais do Banco de Abrolhos (BA) não ficaram imunes aos efeitos antropogênicos sobre esse ecossistema nas últimas décadas. E estudos pretéritos atrelaram o declínio dos ecossistemas recifais em Abrolhos a causas como a sedimentação terrígena e ressuspensão de sedimentos (Dutra *et al.*, 2006), ação de ondas e pelo tráfego de navios, que podem desenvolver uma pluma de sedimentos finos e chegar até os corais (Acevedo *et al.*, 1989), a descarga fluvial de esgoto através dos rios (Costa *et al.*, 2000; Leão *et al.*, 2005); a erosão costeira, ao desmatamento, e a ocupação humana nas regiões costeiras. As atividades de alto potencial de impacto ambiental também contribuem para a perda de ecossistemas coralíneos, tais como: a pesca, a mineração, a exploração de petróleo e gás, a dragagem e o turismo (Moura *et al.*, 2013).

Relatos de branqueamento de corais no Banco de Abrolhos iniciaram na década de 1990 (Castro & Pires, 1999, Dutra *et al.* 2000, Leão *et al.* 2003, 2008 & Kikuchi *et al.* 2004) e têm sido reportados desde então (Duarte *et al.* 2020). Em especial, os estudos que relacionaram o branqueamento ao aquecimento dos oceanos e, principalmente aos eventos como o *El Niño* os quais estariam afetando os ecossistemas tropicais, em especial os recifes de coral.

Comparado a outros sistemas recifes de corais ao redor do mundo, os recifes de Abrolhos branqueiam menos (Oliveira *et al.*, 2012). Considerando a forte correlação entre a anomalia térmica e o branqueamento dos corais Ghisolfi *et al.* (2015) sugeriu que a presença de uma água mais fria próximo ao fundo no banco, serviria como um *buffer* térmico para as espécies de corais mesofóticas. Concordante a essa hipótese, Chollett *et al.* (2010) e Morgan *et al.* (2017) afirmaram que a resistência ao branqueamento pode estar relacionada as condições locais como a ressurgência enquanto que, Woessik *et al.* (2012) afirmou que corais resilientes ou resistentes as anomalias térmicas estariam sob os chamados Refúgios de Mudanças Climáticas. Moura *et al.* (2016), Bastos *et al.* (2018) afirmaram que os recifes que habitam zonas turvas são tolerantes ao estresse térmico e tolerantes ao branqueamento. Teixeira *et al.*, (2019) relata que o aumento da turbidez favoreceria a redução da temperatura da água, ocasionando o impedimento da penetração da radiação de ondas curtas ao longo da coluna de água.

A climatologia sazonal verão e inverno da temperatura da superfície do mar (TSM) sobre o Banco de Abrolhos (Souza *et al.* 2007) mostrou que ela é espacialmente heterogênea, com menores temperaturas superficiais, principalmente no verão, na região do Parque Nacional Marinho de Abrolhos. Ao mesmo tempo, a estratificação térmica vertical também foi um resultado mostrado por Ghisolfi *et al.* (2015) reforçando a heterogenia térmica espaço-temporal dessa área.

Na ausência de dados contínuos *in situ* da temperatura da água do mar para acompanhar o estresse térmico ao qual os recifes estão sendo submetidos, dados *ex-situ* da TSM são usados pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) via o programa *Coral Reef Watch Satellite Monitoring and Modeled Outlooks* (<https://coralreefwatch.noaa.gov/>) para monitorar diariamente a anomalia e o estresse térmico da superfície do mar sobre áreas de recifes de coral. No caso do Banco de Abrolhos, esse resultado é baseado nas medidas remotas obtidas em um único ponto 5x5 km centrado em 17°22'50" S e 39°00'00" W.

Apesar da temperatura superficial estimada pelo satélite ser uma fonte importante de dados, principalmente na ausência de medidas *in situ*, é imprescindível que se avalie a representatividade espaço-temporal dessa medição comparando-a com aquelas realizadas em campo. Dessa forma, será possível se avaliar se o estresse térmico indicado pelo CRW é representativo, isto é, ele é semelhante aquele estimado a partir das medidas de temperatura da água do mar *in loco*. Isso se justifica tendo em vista as heterogeneidades térmicas espaço-temporais já relatadas (p.ex. Leão *et al.*, 2008, Ghisolfi *et al.*, 2015, Lisboa *et al.*, 2018). Assim, alguns questionamentos ainda permanecem e busca-se responde-los nesse estudo: 1) Uma vez que o índice CRW-NOAA é baseado na medida da temperatura superficial *ex-situ* estimada em um único ponto, essa medida é válida para todo o banco de Abrolhos?; 2) Identifica-se a presença de água fria próximo ao fundo do banco a partir das medidas da temperatura da água *in situ*?; 3) Como essas medidas se comparam sazonalmente?; 4) os eventos de alerta de branqueamento estimados pelo CRW se refletem nas estimativas derivadas das medidas *in loco*?

Portanto, o objetivo geral deste estudo é avaliar a representatividade espaço-temporal das medidas de temperatura e estimativas de estresse térmico obtidas *in situ* e *ex-situ* sobre o Banco de Abrolhos.

A fim de atingir os objetivos deste estudo foram analisadas as informações fornecidas pelo índice NOAA-CRW, e séries temporais de dados de temperatura *in situ* do Programa PELD de Abrolhos (Programa Ecológico de Longa Duração) em dez pontos de coleta no período de 2012 a 2018

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de enfoque deste estudo é o Banco de Abrolhos (16 °40 ' , 19 °40' S – 39 °10 ' , 37 °20 'W) (Figura 1), um alargamento da plataforma continental leste brasileira com aproximadamente 46.000 Km² (Bruce *et al.*, 2012; Amado-Filho *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2013) caracterizada por ser uma plataforma rasa e aberta (Leão, 1999).

Na plataforma interna do banco temos a ocorrência de sedimentos arenosos siliciclásticos (Leão & Gensburg, 1997), onde a sua maior porcentagem está situada no Arquipélago dos Abrolhos e no Parcel dos Abrolhos, formado por dois arcos que possuem uma concavidade voltada ao continente, um mais próximo à costa chamada de arco

interno, representando uma região de energia baixa e mais protegido, e o outro mais afastado da costa, chamado de arco externo com energia média. (IBAMA, 1991, p.20).

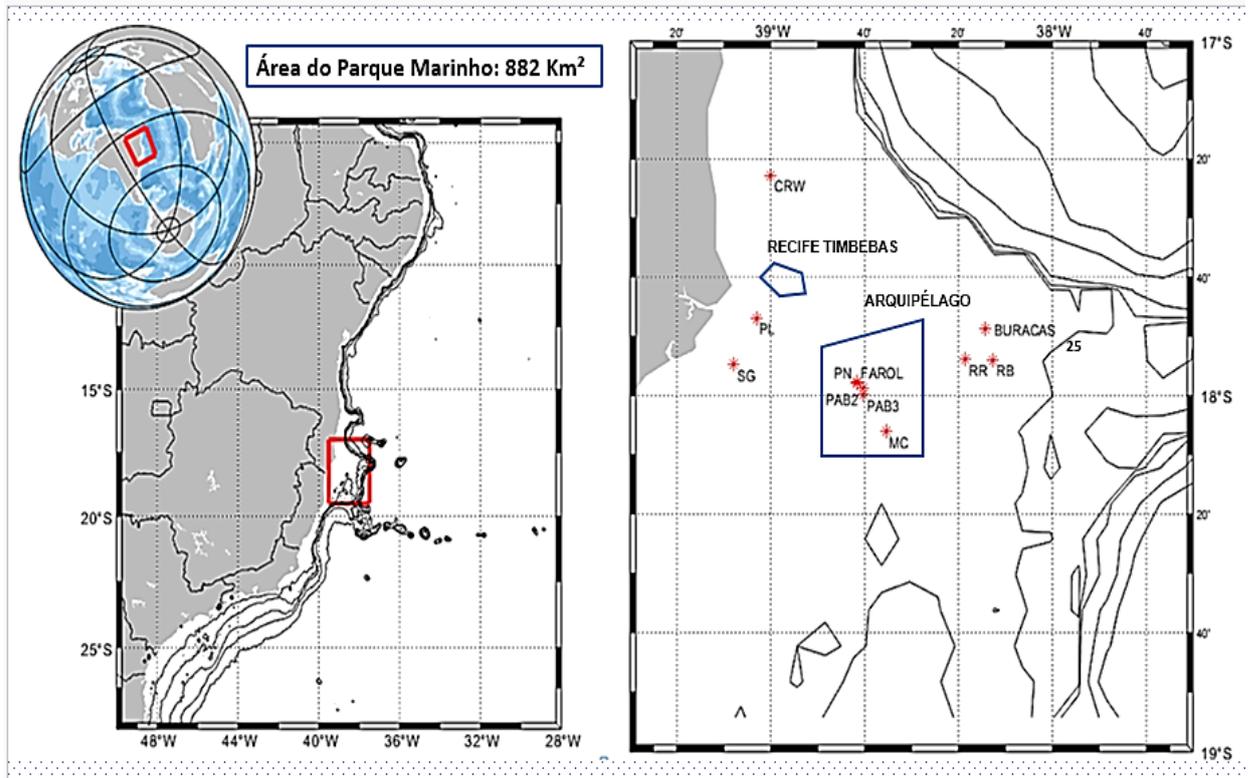


Figura 1: Mapa da região de Abrolhos com os pontos CRW (*Coral Reef Watch*), PL (Pedra de Leste), SG (Sebastião Gomes), PN (Portinho Norte), Farol, PAB2, PAB3, MC (Mesofótico Califórnia Parede e Topo), RR (Rodolito Raso), RB (Rodolito próximo à Buraca) e Buracas. Os polígonos na cor azul delimitam a área do Parque Marinho de Abrolhos. Os pontos dos dados amostrados se encontram na isóbata de 25 m.

O clima da costa oriental brasileira é tropical úmido (Kelmo *et al.*, 2003) com precipitação de 1.300 mm/ano e temperatura média do ar variando no inverno em torno de 23° C e no verão de 28° C (Nimer, 1987, Leão *et al.*, 2010). Os ventos norte e nordeste são predominantes de outubro a fevereiro, e os ventos sul e sudeste são dominantes de maio a agosto (DHN, 1993). Segundo estudos oceanográficos recentes (exemplo, Ghisolfi *et al.*, 2015) ventos sul com baixa intensidade estiveram associados a uma camada de mistura mais profunda, e ventos mais intensos norte e nordeste permaneceram com uma camada de mistura mais rasa com estratificação vertical de temperatura.

A principal corrente que flui ao longo da quebra de plataforma brasileira é a Corrente do Brasil (CB) (Figura 2) (Stramma & England, 1999) que é a corrente de

contorno oeste que fecha o giro subtropical formado também pela Corrente do Atlântico Sul (CAS), no limite sul do giro, pela Corrente de Benguela (CBe), que deriva em direção ao Equador ao longo da costa africana, e pela porção sul da Corrente Sul Equatorial (CSE), fluindo em direção à costa brasileira no limite norte do giro. Há uma concordância entre autores de que o trajeto da CB sobre o Banco dirige-se no sentido sul, onde percorre através da plataforma, transportando a Água Tropical (Emilson, 1961), caracteristicamente quente e salina ($T > 22^{\circ}\text{C}$, e salinidade $S > 36$) na camada superficial do oceano (Stramma & England, 1999).

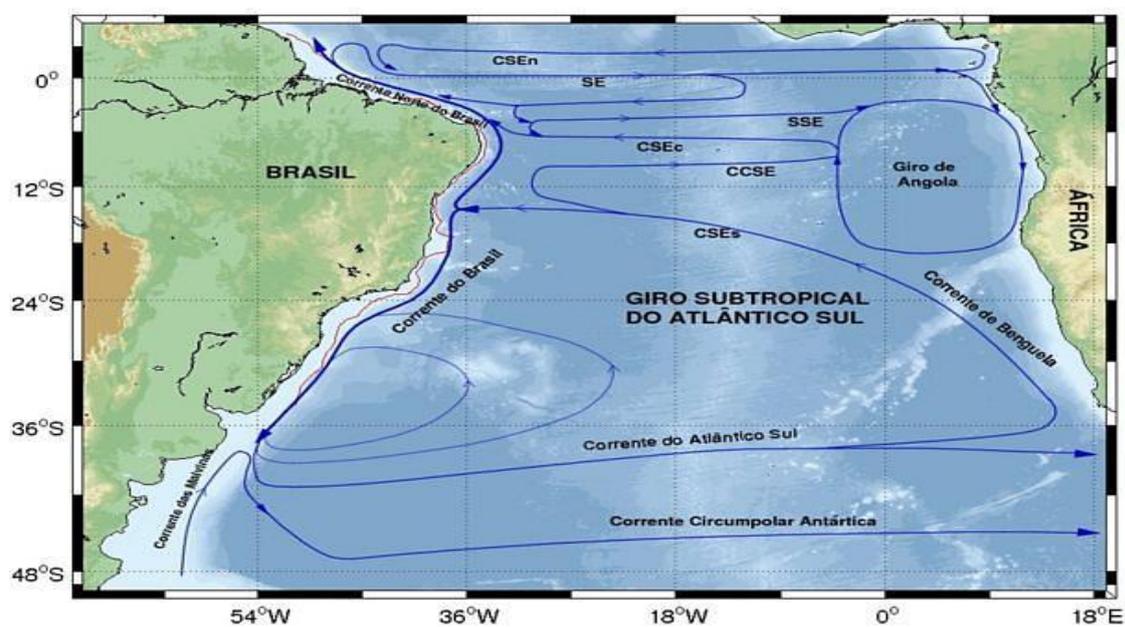


Figura 2: Representação do trajeto das correntes marítimas no Atlântico Sul. Fonte: BBC News Brasil. Adaptado do site: (<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-50270579>). Acesso em 31 de agosto de 2020.

Sobre o banco de Abrolhos temos ecossistemas endêmicos representados por recifes rasos, pelos maiores leitos de rodólitos do mundo (Amado-Filho *et al.*, 2012), por recifes mesofóticos (Francini-Filho *et al.*, 2019), por pináculos coralinos em forma de cogumelos (Leão & Kikuchi, 2005), e por trinta e seis estruturas conhecidas como Buracas (Bastos *et al.*, 2013), que são depressões circulares no fundo marinho que variam entre 25m a 60m de profundidade (Leão, 1999). Essa geodiversidade está presente sobre o banco tanto na plataforma central quanto na plataforma externa (Moura *et al.*, 2013).

O BA possui uma grande importância ecológica por abrigar espécies endêmicas de corais e hidrocorais, onde seis das vinte espécies existentes são endêmicas do Brasil:

Mussismilia braziliensis, *Mussismilia hispida*, *Mussismilia harttii*, *Siderastrea stellata*, *Favia gravida*, *Favia leptophylla*, *Millepora braziliensis* e *Millepora nitida* (Leão *et al.*, 2003).

Na maior parte dos recifes de coral encontrados pelo mundo, observa-se uma grande diversidade de espécies de corais em profundidades entre 15 e 20 metros. Os ecossistemas coralinos caracterizam-se por serem extensões de ecossistemas rasos (Hindestein *et al.*, 2010). No Brasil, os recifes de corais são os únicos ecossistemas recifais do Atlântico Sul onde a máxima diversidade ocorre nos primeiros cinco metros. Todavia, em recifes de profundidades intermediárias podem ocorrer estressores de origem física que impedem a permanência de muitas espécies (VILAÇA, 2002).

Ao longo da costa brasileira podem ser encontradas espécies de corais desde o estado do Maranhão até o norte do estado de São Paulo. Contudo, Moura *et al.* (2016) descreveu a existência de recifes mesofóticos com grande diversidade de espécies na foz do Rio Amazonas, entre as fronteiras Brasil-Guiana Francesa e o estado do Maranhão. Estruturas semelhantes aos corais chamados de rodolitos se distribuem do Maranhão até Santa Catarina (Horta *et al.*, 2016). Os rodolitos são ecossistemas bentônicos compostos por algas incrustantes coralíneas ou por núcleo de material não cristalino como conchas, partes de corais mortos ou seixos presentes em regiões mesofóticas entre 30 e 150 m de profundidade (Amado-Filho *et al.*, 2012 e Pereira-Filho *et al.*, 2012). As pesquisas de Horta *et al.*, (2016) mostraram a distribuição de rodolitos no estado da Bahia entre 5 a 25 metros. Estruturas conhecidas como Buracas estão presentes sobre o Banco e são consideradas verdadeiros *Hot Spots* de produção primária (Land *et al.*, 1995, Cavalcanti *et al.*, 2013), estão localizadas de 105 a 144 Km da costa (Bastos *et al.*, 2016).

No Banco de Abrolhos o complexo recifal é raso (Figura 3), com profundidade de 30 metros, formado por dois arcos de recifes emersos e submersos (Leão & Ginsburg, 1997). Ele configura a existência de uma associação entre recifes rasos e mesofóticos, e extensos bancos de rodolitos (Leão, 1999; Leão *et al.*, 2003; Amado-filho *et al.*, 2012). Vale ressaltar, que os leitos de rodolitos no banco de Abrolhos cobrem áreas inter-recifais e abriga o maior e mais contínuo leito de rodolitos do mundo (Amado-Filho *et al.*, 2012).

Segundo Vale *et al.* (2018) no BA existem três tipos de recifes rasos: o primeiro, formado por recifes isolados e de formas variadas em profundidades de 3 a 20 m (arco interno do recife); o segundo em recifes de orla rasa com menos de 10 m de profundidade e localizados próximo as ilhas do Arquipélago de Abrolhos (arco externo do recife); e o terceiro e último, os recifes em forma de cogumelos também conhecidos como os

chapeirões que formam o Parcel dos Abrolhos (PAB) (arco externo do recife); (Moura *et al.*, 2013).

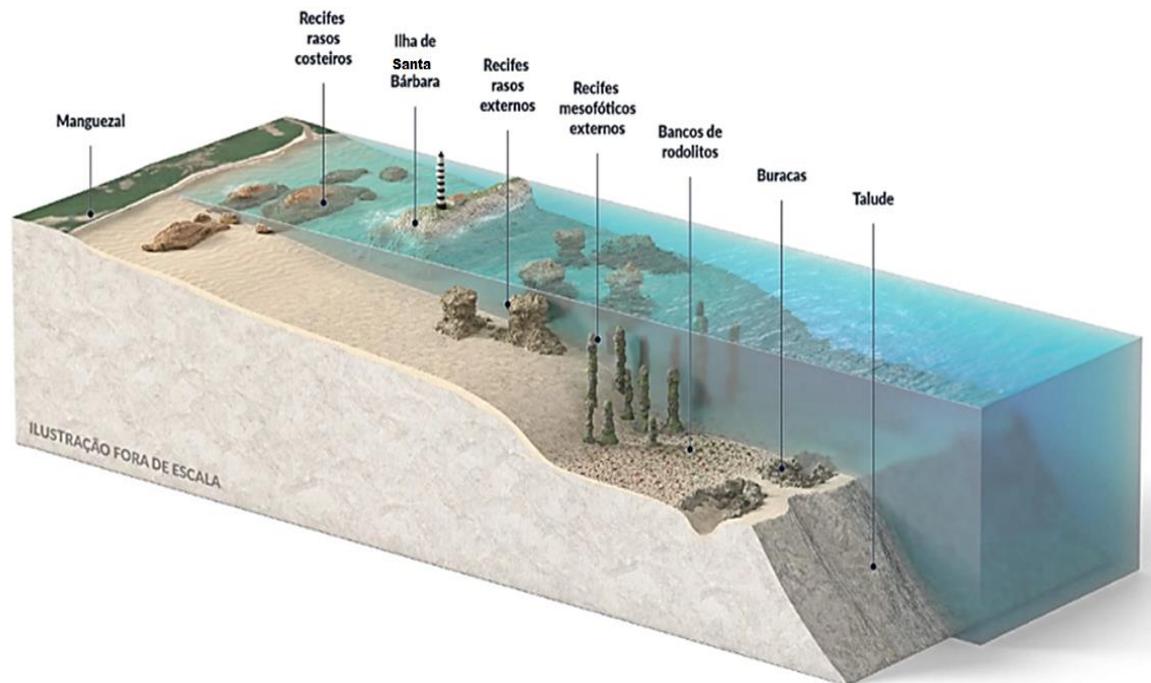


Figura 3: Representação esquemática da distribuição de megahabitats na plataforma de Abrolhos. A partir da linha de costa são indicados os recifes costeiros rasos, a ilha de Santa Bárbara que faz parte do Arquipélago dos Abrolhos, os recifes costeiros externos, os recifes mesofóticos externos, o banco de rodólitos e buraca. Infográfico: Rede Abrolhos. Acesso em: 15 de outubro de 2020.

2.2 Dados

Dois conjuntos de dados foram usados no desenvolvimento deste estudo: 1) dados *in situ* e 2) dados *ex-situ*. O primeiro é composto de medidas de temperatura realizadas em pontos selecionados no Banco de Abrolhos e foram disponibilizados pelo grupo de pesquisadores do PELD-Abrolhos (Programa de Estudos de Longa Duração – Abrolhos). Esse conjunto de dados não é contínuo para nenhum dos pontos selecionados, embora, em grupo, ele abrange o período de 2012 a 2018. Um total de 10 pontos foi selecionado e a sua localização é mostrada na Figura 1, enquanto que o período de abrangência dos dados em cada um deles é indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Pontos, localização relativa e período de tempo amostrado.

Pontos	Localização Relativa	Período dos dados
<i>Pedra de Leste</i>	17°47'01" S/ 39°03'05" W	2013-2018
<i>Sebastião Gomes</i>	17°54'49" S/ 39°07'9" W	2017-2018
<i>Farol</i>	17°96'55" S/ 38°69'39" W	2016-2018
<i>Portinho Norte</i>	17°96'33" S/ 38°69'61" W	2016-2018
<i>PAB2</i>	17°58'54" S/ 38°40'23" W	2013-2015
<i>PAB3</i>	17°59'53" S/ 38°40'18" W	2015-2018
<i>Califórnia (Topo, Parede)</i>	18°06'07" S/ 38°35'26" W	2016-2017 (<i>Topo</i>) 2017-2018 (<i>Parede</i>)
<i>Rodolito Raso</i>	17°53'55" S/ 38°18'34" W	2017-2018
<i>Rodolito (próximo à Buraca)</i>	17°54'03" S/ 38°12'39" W	2016
<i>Buracas</i>	17°81'33" S/ 38°23'74" W	2012-2013
<i>CRW</i>	17°22'50" S/ 39°00'00" W	2013-2018

Abrolhos faz parte do primeiro Parque Nacional Marinho do Brasil que se divide em dois polígonos: o polígono dos Recifes de Timbebas, e o polígono que abrange o Arquipélago dos Abrolhos, o Parcel dos Abrolhos (PAB), e os recifes mesofóticos. Os recifes que integram o Arco Recifal Interno do banco e que são de interesse para esse estudo são os recifes Pedra de Leste (PL) e os recifes Sebastião Gomes (SG), ambos localizados a cerca de 10 a 20 km da costa (Leão, 1999). Os recifes do Arco Recifal Externo (*offshore*) do banco posicionam-se a leste do Arquipélago dos Abrolhos 17° 57'45" S, 38 ° 41'43" W a cerca de 70 km da costa (Leão, 2016), em profundidades acima de 25 m e com formação de pináculos gigantes denominado de chapeirões (Leão *et al.*, 2003). Integram o Arquipélago dos Abrolhos os pontos Farol e Portinho Norte (PN); o Parcel dos Abrolhos está representado pelos pontos PAB2 e PAB3 e o recife Mesofótico Califórnia. Já os pontos referentes ao Rodolito Raso, Rodolito Próximo à Buraca e Buraca estão mais afastados do Arquipélago. Quando disponível, as séries temporais foram separadas em *topo* e *parede*. O topo recifal segundo Leão (1999), trata-se da parte superior dos chapeirões (Hartt, 1870), e dos bancos recifais. Na maré baixa, o topo horizontal fica exposto. A parede recifal compreende como sendo a projeção lateral do topo recifal. Detalhes da localização são indicados nas Figuras 1 e 2 e na Tabela 1.

Séries temporais foram construídas com base nos dados fornecidos pelos pesquisadores do Projeto Rede de Abrolhos que é um sítio PELD (Programa Ecológico

de Longa Duração). O sítio está disponível na página (<https://dipeq.jbrj.gov.br/projetos/rede-abrolhos/>). O intervalo de amostragem entre medidas não foi único para todos os pontos e nem constante ao longo do tempo. O procedimento de padronização dessas séries é apresentado na seção 2.3.

Outputs (Temperatura da Superfície do Mar – TSM, Anomalia da TSM – SST *Anomaly*, alertas de *Hot Spot* de branqueamento – *Hot spot* e o *DHW* – *Degree Heat Week* (Grau de Calor Semanal - GCS, um *proxy* do estresse térmico) do modelo de escala global disponível no site do *Coral Reef Watch* (Strong *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005) foram obtidos para a estação virtual do Banco de Abrolhos para o período de 2012 a 2018. Os produtos de sensoriamento remoto são essenciais no monitoramento de recifes de corais, já que oferecem visualizações sinópticas dos oceanos em tempo real (Liu *et al.*, 2014).

2.3 Método

Na primeira etapa de processamento dos dados *in situ* foram selecionadas e construídas dez séries temporais representativas da área amostral. Assim, séries temporais duplicadas, isto é, de pontos muito próximos foram descartadas. Uma vez obtidas às séries, o intervalo entre os dados subsequentes foi padronizado e estabelecido em 2 horas. Séries ou intervalos de séries temporais com resolução temporal maior foram subamostradas e aquelas com resolução menor foram interpoladas linearmente. A escolha em 2 horas foi considerada adequada para representar os fenômenos a serem discutidos. Quando necessário, de forma a facilitar a visualização, as séries temporais foram alisadas com um filtro de média móvel com agrupamentos de 48 dados.

A fim de comparar as estimativas (GCS) derivadas das medidas *ex-situ* com aquelas *in situ* o Grau de Aquecimento Semanal foi estimado de acordo com a metodologia usada para determinar a mesma estimativa com os dados *ex-situ*. O GCS tem por base o algoritmo desenvolvido para se obter o aquecimento diário *Hot Spot* (Goreau & Hayes, 1994), e, por conseguinte, o acúmulo desse aquecimento em semanas. O GCS acumula *qualquer Hot Spot* igual ou acima de 1°C ao longo de uma janela de 12 semanas (três meses).

Com base no *Hot Spot*, o GCS é estimado de acordo com a Equação 1:

$$GCS = 0,5 * \sum_{n=1}^{n=24} HotSpot \quad \text{Equação 1}$$

Na Equação 1, o somatório é feito pelo acúmulo dos 24 valores de *Hot Spot* (dois valores semanais) anteriores a data atual.

Tabela 2: Os níveis de estresse térmico de branqueamento de coral do satélite CRW com a definição dos produtos de monitoramento *Hot Spot* e Grau de Calor Semanal com as possibilidades de impacto sobre o ecossistema recifal. (Modificado: Strong *et al*, 2011)

Níveis de estresse	Definição	Impacto ao ecossistema
Sem estresse	$Hot Spot \leq 0$	- - - -
Atenção de branqueamento	$0 < Hot Spot < 1$	- - - -
Aviso de branqueamento	$1 \leq Hot Spot$ e $0 < GCS < 4$	Possibilidade de branqueamento
Alerta Nível 1	$1 \leq Hot Spot$ e $4 \leq GCS < 8$	Provável branqueamento
Alerta Nível 2	$1 \leq Hot Spot$ e $8 \leq GCS$	Provável mortalidade

3 RESULTADOS

Apesar da advecção do calor pelas correntes oceânicas, o padrão térmico superficial de uma determinada área é controlado, principalmente, pelas trocas de calor que ocorrem na interface oceano-atmosfera. Climatologicamente, o padrão anual de variação das componentes e do balanço líquido de calor válido para a região de estudo é apresentado na Figura 4.

O padrão mostrado na Figura 4 é reproduzido nos dados de TSM obtidos de forma remota (Figura 5). Enquanto o ciclo sazonal aquecimento-resfriamento é identificado em ambas as figuras, ficam evidentes algumas diferenças marcantes. O padrão térmico superficial do oceano é defasado em relação da TSM em, aproximadamente, dois a três meses, isto é, máximos e mínimos de fluxos líquidos de calor ocorrem previamente aos máximos e mínimos de TSM.

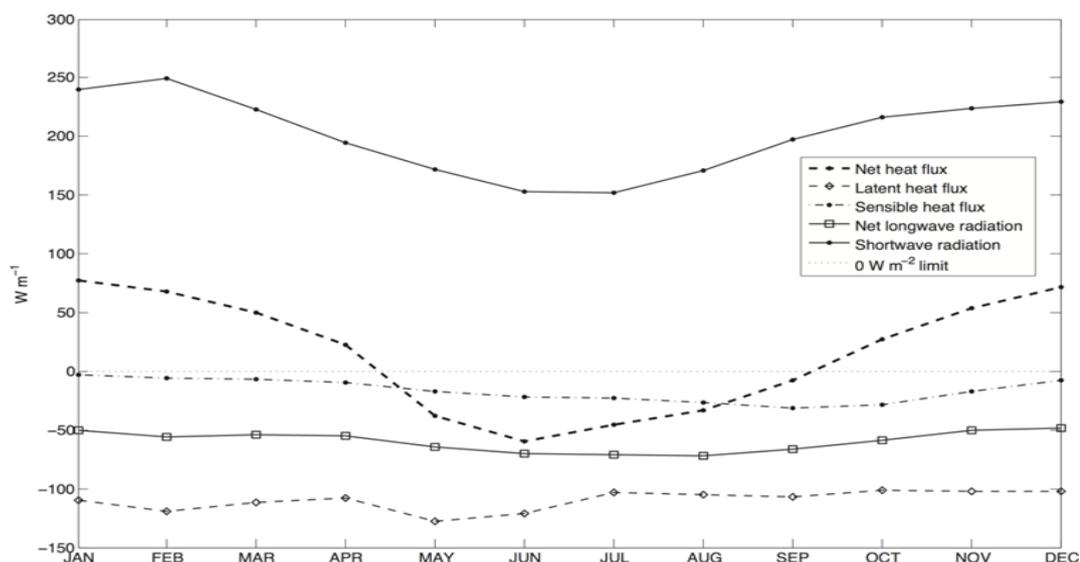


Figura 4: Componentes e o balanço líquido mensal de calor na interface oceano-atmosfera válido para a área de estudo. De acordo com a figura o máximo ganho líquido de calor ocorre em janeiro e a máxima perda em junho. Da mesma forma, entre os meses de abril a setembro o oceano perde calor para a atmosfera e ganha calor nos demais meses do ano. Grosseiramente, esses mesmos períodos marcam as condições meteorológicas secas e úmidas desta região. Reprodução de: (Ghisolfi *et al.*, 2015).

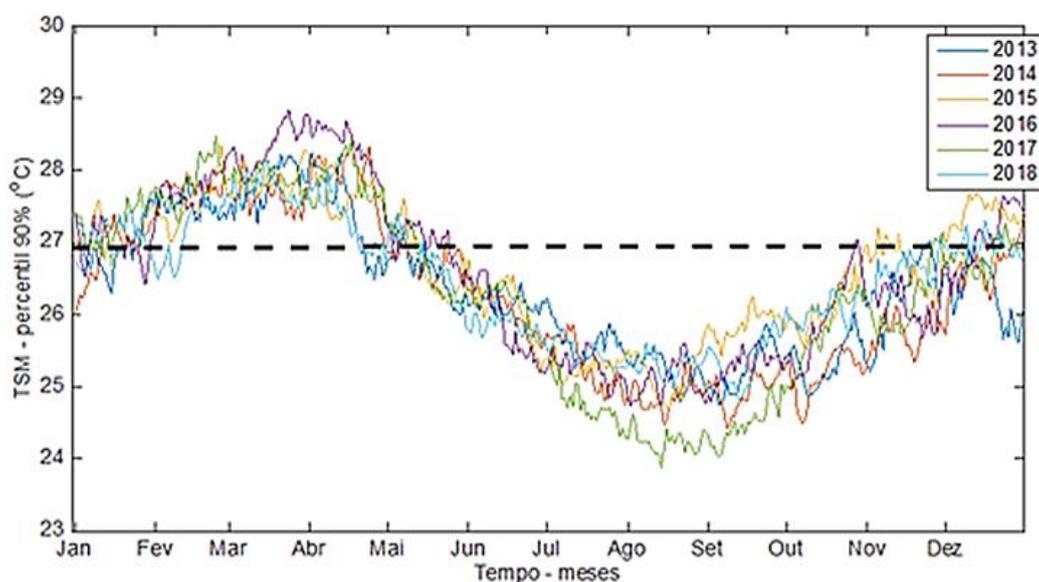


Figura 5: Distribuição anual da Temperatura da Superfície do Mar para os anos de 2013 a 2018 de acordo com as medidas disponibilizadas pelo CRW. A linha preta tracejada delimita o valor de $26.952^{\circ}C$ que marca a Máxima Temperatura Média Mensal (MMM) determinada pela metodologia do *Coral Reef Watch* sobre a qual são estimadas as anomalias térmicas.

A fim de avaliar o padrão térmico superficial, os dados de TSM oriundos das medidas do *Coral Reef Watch* foram analisados sob a perspectiva relativa da MMM, isto é, determinou-se o período no qual a TSM estava acima e abaixo da MMM. Essa estimativa é importante porque temperaturas acima da MMM estariam associadas com um possível estresse térmico. A Figura 6 mostra a distribuição da TSM no período 2013 a 2018 sobre a qual foram determinadas as datas notáveis (cruzamento com a MMM - Tabela 2) e estimadas a duração dos períodos quentes (TSM > MMM) e frios (TSM < MMM) (Tabela 3).

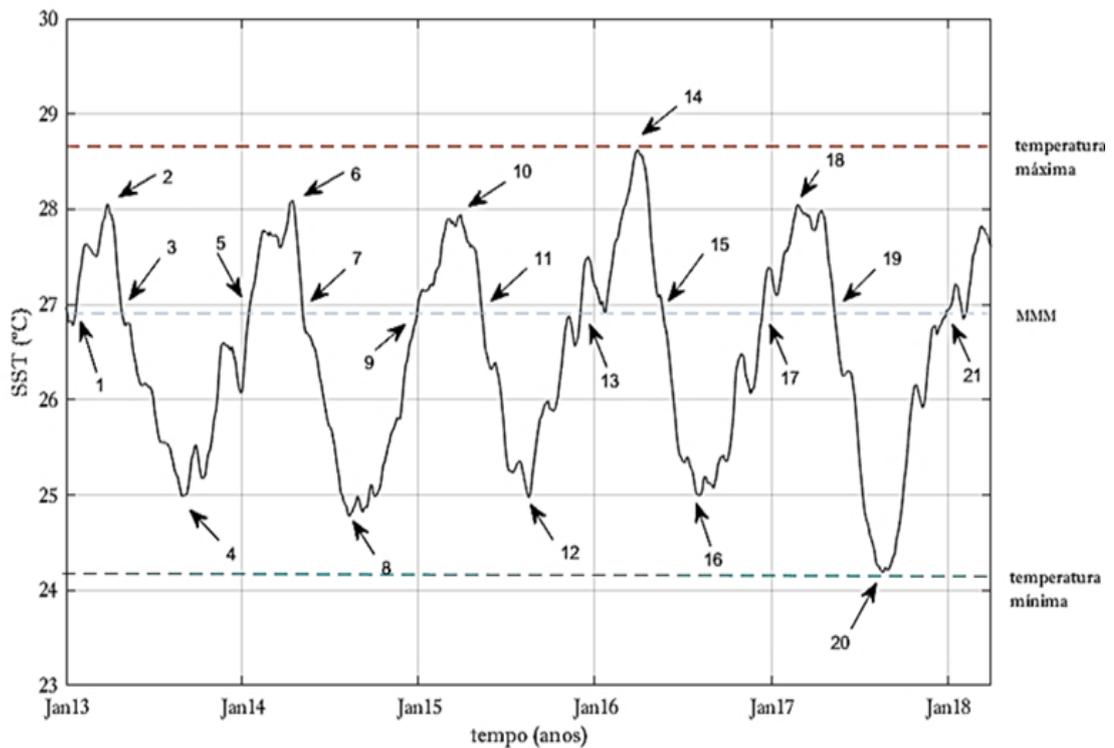


Figura 6: Distribuição da TSM para o período 2013 a 2018. Os valores estão filtrados com uma janela de média móvel de 48 pontos. Os números são indicativos das datas indicadas na Tabela 3. As linhas tracejadas são indicativas da temperatura máxima, MMM e temperatura mínima.

Tabela 3: Data observada da maior (vermelho) e menor (azul) temperatura da superfície do mar de acordo com os dados do *Coral Reef Watch*. Os valores máximos estão na faixa de 28 °C e os mínimos são menores que 25°C.

Nº das setas	Data	Temperatura - °C
2	28/03/2013	28.05
4	01/09/2013	24.99
6	14/04/2014	28.08
8	08/08/2014	24.80
10	01/04/2015	27.94
12	18/08/2015	24.98
14	30/03/2016	28.62
16	04/08/2016	24.99
18	01/03/2017	28.01
20	20/08/2017	24.18

Tabela 4: Duração do intervalo quente ($T > \text{MMM}$ - vermelho) e frio ($T < \text{MMM}$ - frio) no período 2013 a 2018.

Nº das setas	Data	Tempo aproximado (meses)
1	17/01/2013	3,3
3	27/04/2013	T>MMM
3	27/04/2013	9,6
5	15/01/2014	T<MMM
5	15/01/2014	3,6
7	07/05/2014	T>MMM
7	07/05/2014	7,6
9	29/12/2014	T<MMM
9	29/12/2014	4,3
11	12/05/2015	T>MMM
11	12/05/2015	6,7
13	02/12/2015	T<MMM
13	02/12/2015	5,7
15	21/05/2016	T>MMM

15	21/05/2016	6,6
17	13/12/2016	T<MMM
17	13/12/2016	5
19	11/05/2017	T>MMM
19	11/05/2017	7,6
21	28/12/2017	T<MMM

Os resultados tabelados previamente mostram que o máximo valor da TSM ocorreu nos meses de março/abril na faixa dos 28 °C, enquanto as mínimas foram medidas basicamente em agosto e foram sempre menores que 25 °C. Já os valores mostrados na Tabela 3 indicam que a duração do intervalo quente foi sempre menor que o do intervalo frio. O intervalo de tempo mais crítico foi observado entre Dez/15 a Mai/17 quando o intervalo quente foi o maior ($\approx 5,7$ meses) e o frio menor ($\approx 6,6$ meses).

De posse das características da TSM oriunda dos dados do CRW foi realizada a comparação dessas medidas com aquelas obtidas *in situ* em pontos selecionados mostradas na Figura 1.

As séries plotadas foram divididas de acordo com a localização dos pontos de coletas, isto é, aquelas localizadas no Arco Costeiro Interno e aquelas no Arco Costeiro Externo.

Medidas no Arco Costeiro Interno

As medidas realizadas nos registros dos dados no Arco Costeiro Interno foram àquelas realizadas para o Sebastião Gomes (Figura 7) e Pedra de Leste (Figura 8).

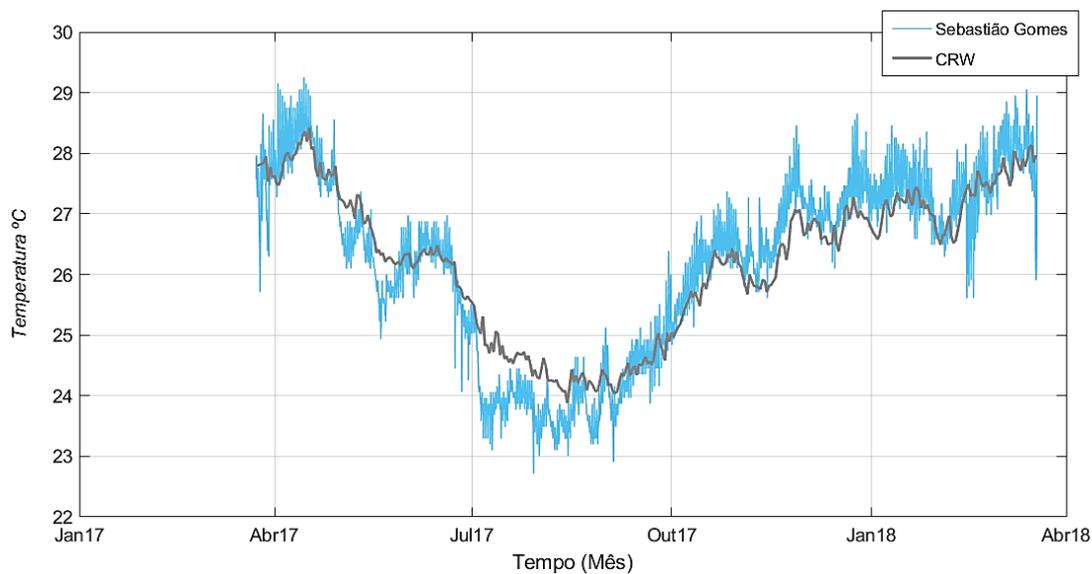


Figura 7: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no Recife Sebastião Gomes (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

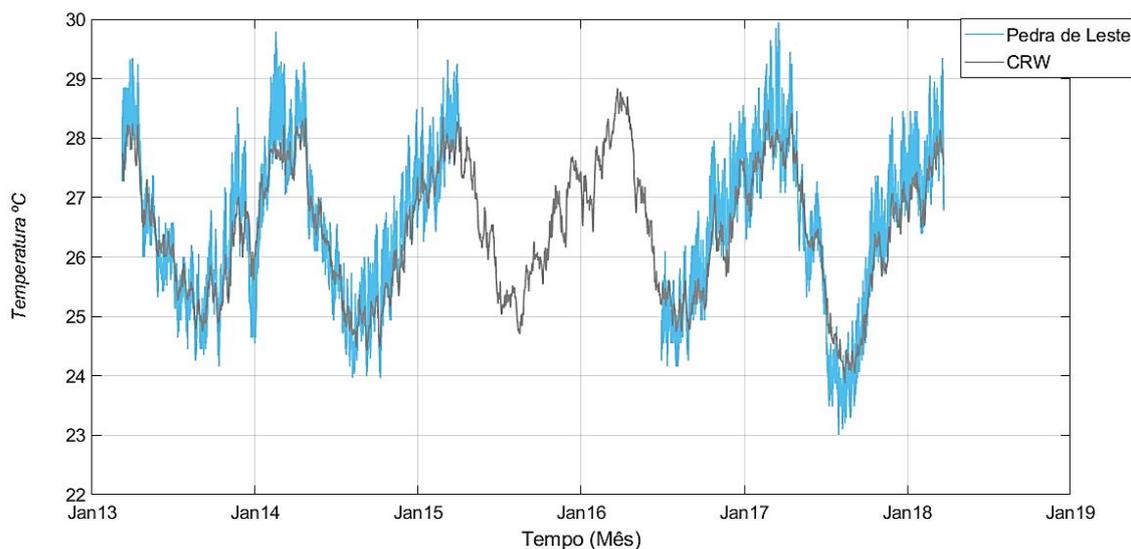


Figura 8: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no Recife Pedra de Leste (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes, apesar da ausência de dados *in situ* entre Abr/15 e Jul/16.

O padrão mostrado nas figuras destaca a similaridade de ambas as medidas de temperaturas. No entanto, com exceção do período de Mai/17 a Jun/17 e Jul/17 a Set/17 (Figura 7) as medidas *in situ* foram maiores do que aquelas obtidas por satélite. Esse

padrão também acompanha o recife Pedra de Leste (Figura 8), com temperaturas mais elevadas do que aquelas registradas pelo satélite da série NOAA.

Para se analisar esse padrão é preciso, primeiramente, considerar o processo de obtenção da medida da temperatura. No caso da medida *ex-situ*, ela deriva da radiação emitida pela camada milimétrica superficial e a temperatura é a temperatura de pele (Souza *et al.*, 2007). A TSM é estimada por uma equação matemática. Claramente, a medida *in situ* não é feita na mesma posição, isto é, na camada milimétrica superficial e, dependendo da profundidade onde o sensor é colocado na coluna de água ele pode medir a temperatura da camada de mistura, a termoclina ou mesmo a camada abaixo da dela. Além disso, sobre o BA a amplitude de maré é amplificada (Castro *et al.*, 2013) o que modifica a altura da coluna de água sobre o sensor. Apesar de interferir na medida da temperatura, a análise deste efeito suprainercial está fora do escopo desse estudo. Tendo isso em mente, uma provável explicação para essa diferença esteja condicionada pela localização desses recifes (10 – 15 km da costa) e profundidade local (de até 15 m). Apesar de serem recifes costeiros, isto é sujeito a maior turbidez da água, os resultados sugerem que o efeito da profundidade é mais significativo no aumento da temperatura local. Por outro lado, as temperaturas *in situ* no período de resfriamento do ciclo sazonal parecem menores que a do CRW. Isso fica claro no período de Jul a Ago de 2017 (Figura 7) quando outros processos oceânicos estariam influenciando.

Medidas no Arco costeiro Externo (Offshore)

A comparação entre as medidas obtidas pelo satélite e aquelas *in situ* são mostradas nas Figuras 9 a 17, assim distribuídas: Farol (Figura 9); Portinho Norte (Figura 10); PAB2 (Figura 11); PAB3 (Figura 12); Califórnia Parede (Figura 13); Califórnia Topo (Figura 14); Buracas (Figura 15); Rodolito próximo à Buraca (Figura 16) e Rodolito Raso (Figura 17).

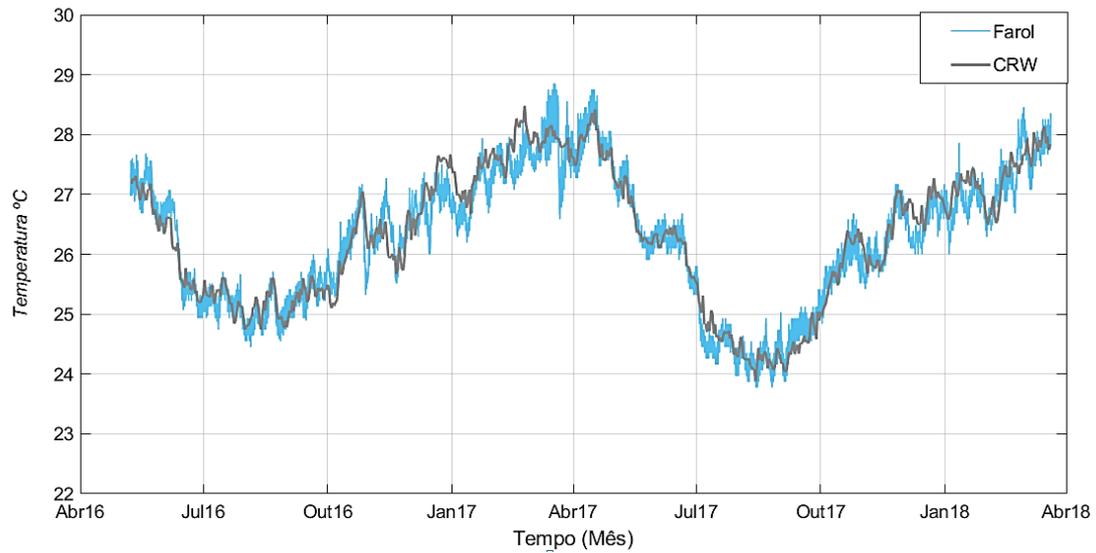


Figura 9: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no Farol (azul). O período mostrado corresponde a aquele na qual as medidas são concomitantes.

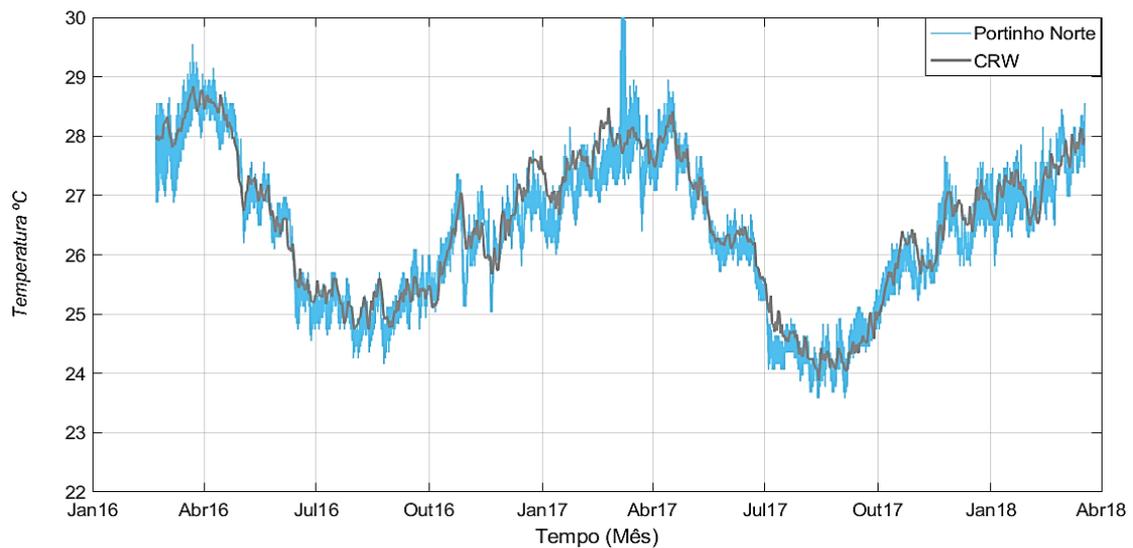


Figura 10: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no Portinho Norte (azul). O período mostrado corresponde a aquele na qual as medidas são concomitantes.

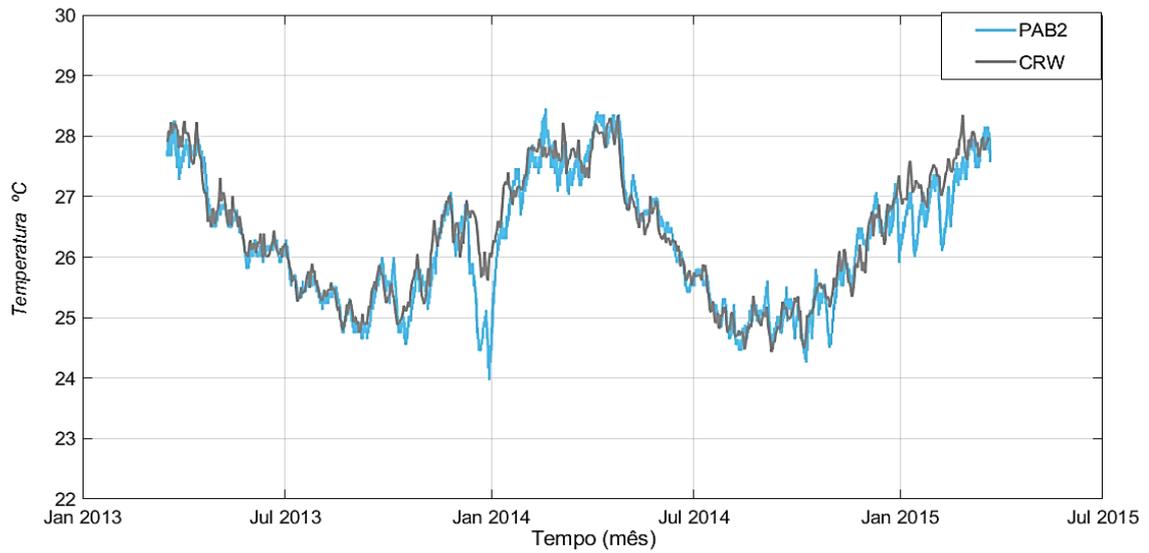


Figura 11: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no ponto PAB2 (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

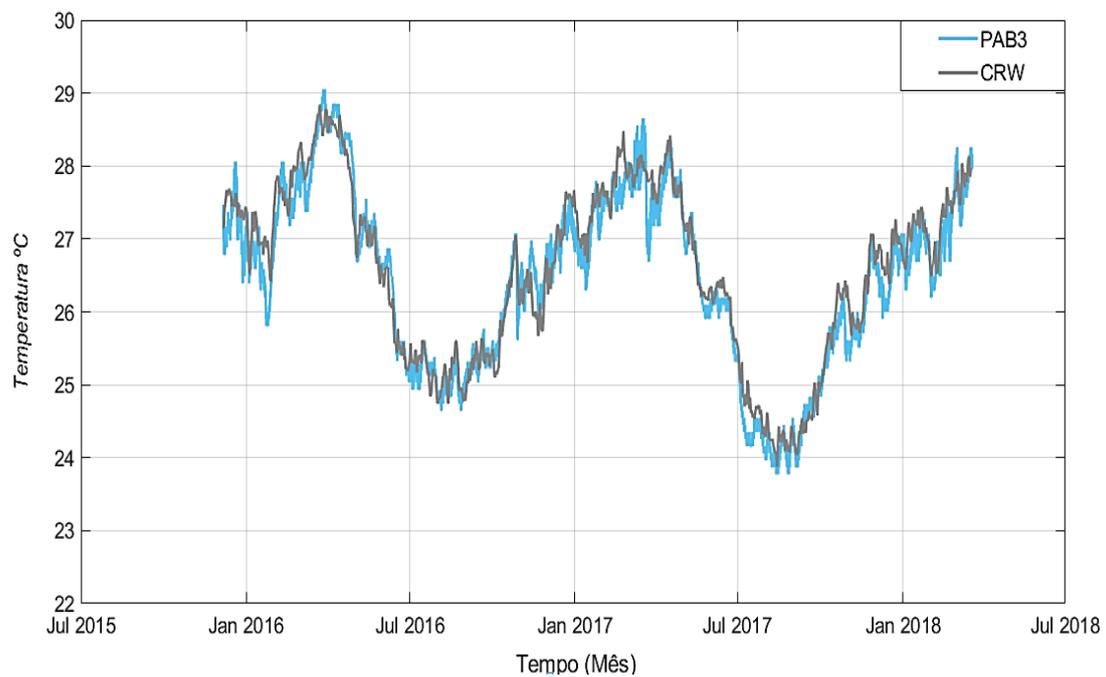


Figura 12: Distribuição temporal da TSM (CRW – vermelho) e a temperatura medida *in situ* no ponto PAB3 (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

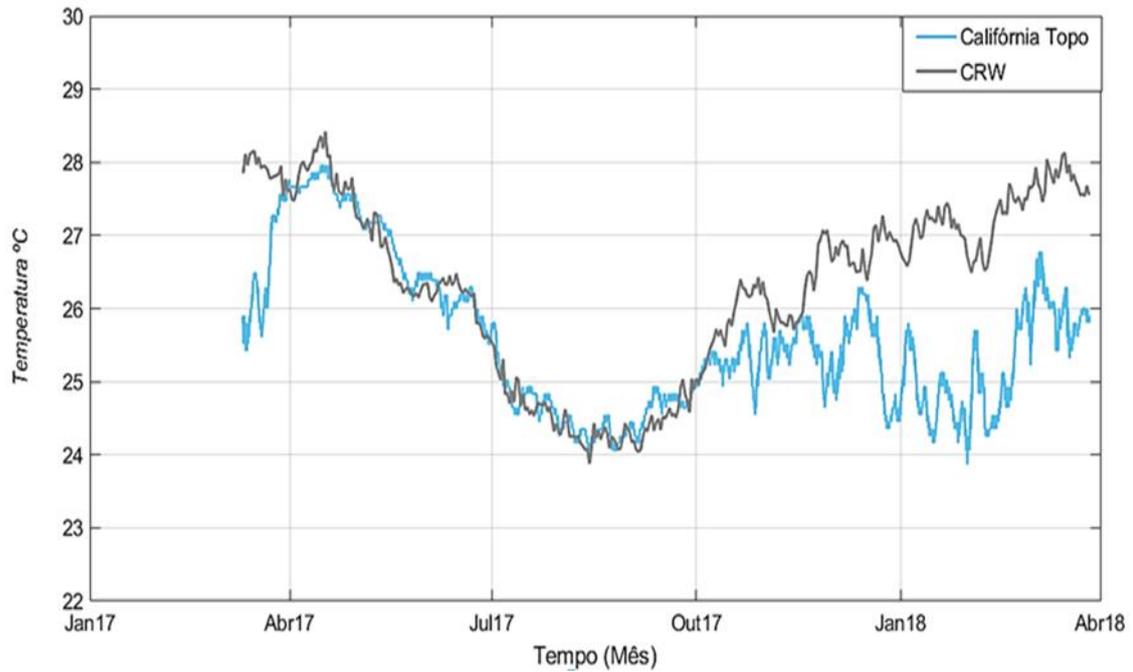


Figura 13: Distribuição temporal da TSM (CRW – azul) e a temperatura medida *in situ* no recife Califórnia - Topo (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.



Figura 14: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no recife Califórnia – Parede (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

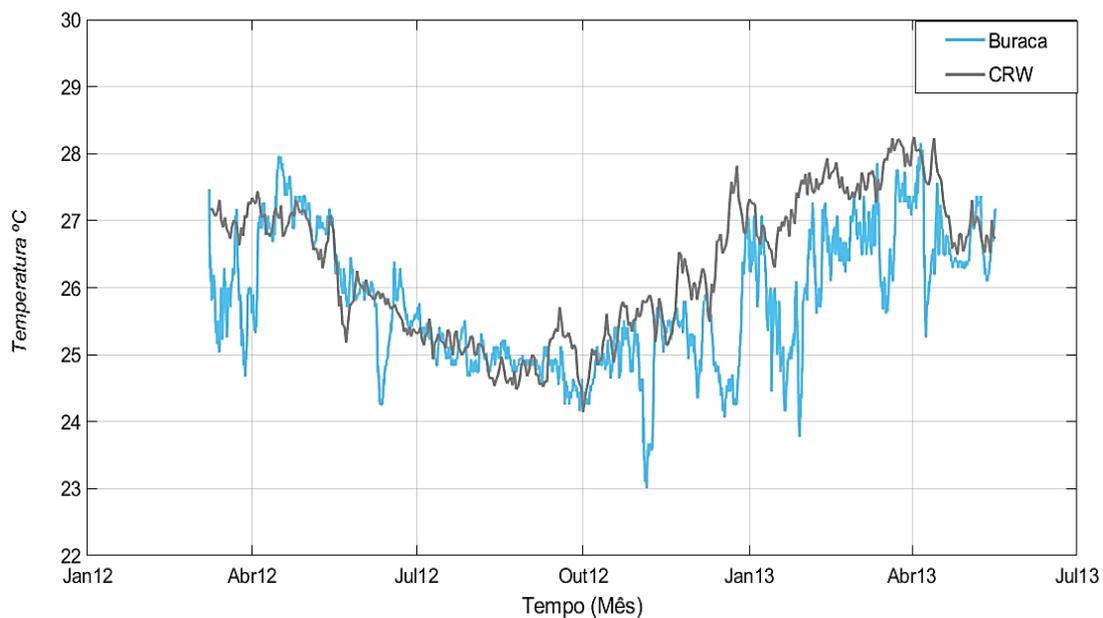


Figura 15: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* na Buraca (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

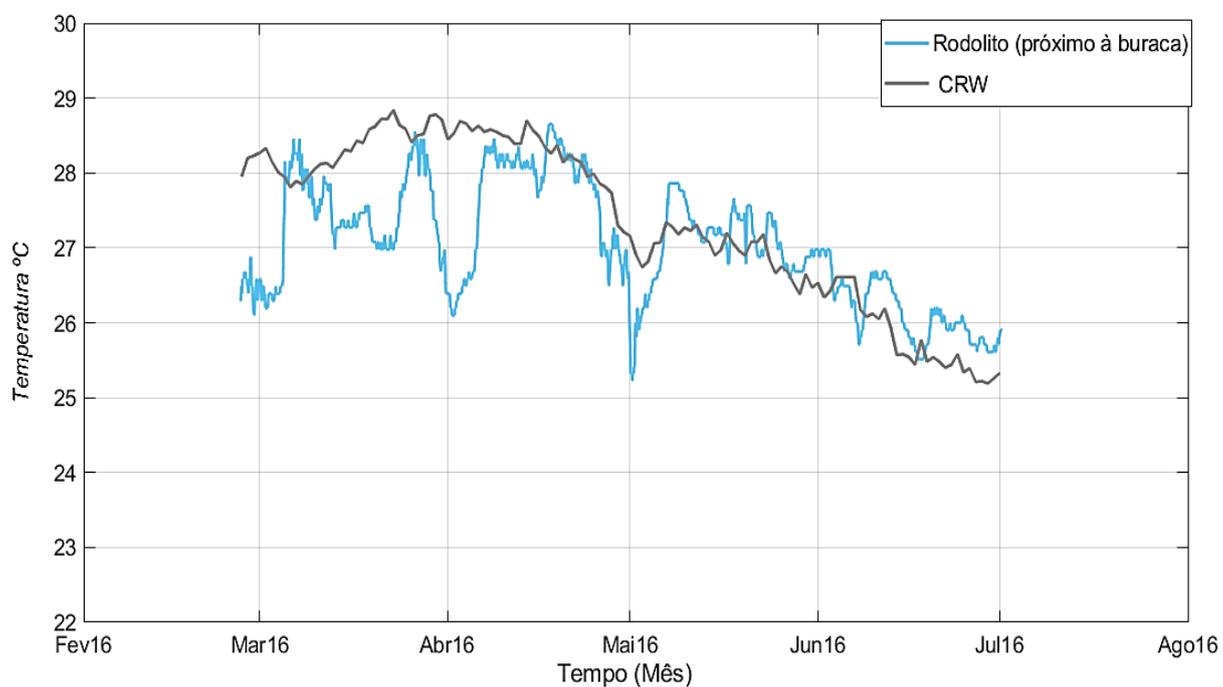


Figura 16: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no ponto Rodolito próximo à buraca (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

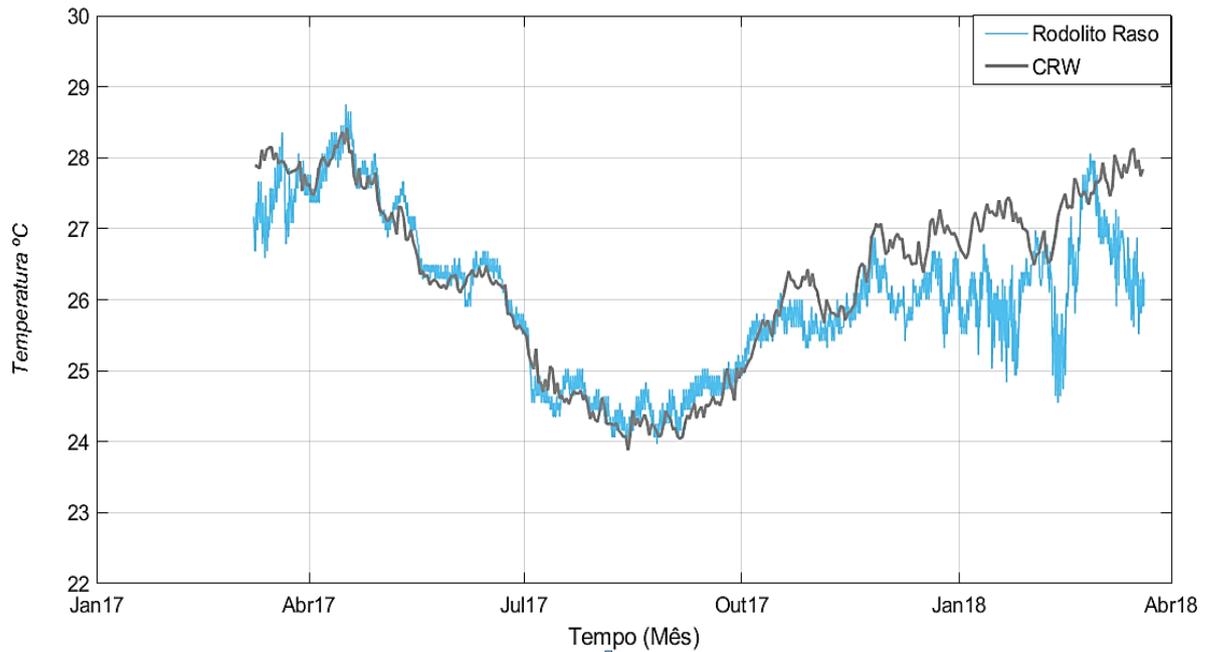


Figura 17: Distribuição temporal da TSM (CRW – cinza) e a temperatura medida *in situ* no ponto Rodolito Raso (azul). O período mostrado corresponde aquele na qual as medidas são concomitantes.

As comparações associadas ao Arco Externo podem ser divididas em dois grupos. O primeiro agrupa os pontos Farol, Portinho Norte, PAB2 e PAB3 (Figuras 9 a 12) e o segundo, Califórnia (Topo e Parede), Buracas, Rodolito próximo à Buraca e Rodolito Raso (Figuras 13 a 17). No primeiro grupo as duas medidas de temperatura são praticamente idênticas, enquanto que no segundo a similaridade ocorre no intervalo frio (Tabela 3). No intervalo quente, ou melhor, no período quando o oceano ganha calor (Figura 3) a temperatura *in situ* é significativamente distinta daquela oriunda de estimativas radiométricas. Pontualmente, as diferenças variaram de menos de 0,5 °C a até quase 4 °C (Fev/13 – Figura 15).

O Parcel dos Abrolhos que é constituído pelos recifes PAB2 (Figura11) e PAB3 (Figura 12), referidos como o segundo grupo, é formado por estruturas chamadas de chapeirões que se encontram isoladas e em áreas superiores a 25 metros de profundidade. Com isso, temos uma região mais rasa e heterogênea no verão austral que apresenta uma água relativamente mais fresca no fundo. A similaridade com o padrão térmico no inverno austral decorre em razão da perda do fluxo de calor líquido pelo o oceano, ocasionando em uma homogeneidade da coluna d'água.

A heterogeneidade na coluna d'água pertencente aos dados *in situ* se encontra mais evidente aos dados *ex-situ* do CRW em decorrência da morfologia e o do habitat em

que eles se encontram. Os recifes mesofóticos são formados por chapeirões que se dividem em zonas recifais como topo e parede; onde o topo recifal, de acordo com Leão *et al.* (1999) pode atingir o nível do mar, acumulando poças e espaços vazios que podem se tornar suscetíveis a receber águas circundantes, bem como podem se aquecer rapidamente por estarem próximas a superfície.

Diante dessas informações, o padrão térmico é caracterizado por um período onde a ganho de calor por parte do oceano, e em decorrência de uma possível entrada de água mais fria no fundo pode servir para os recifes como um refúgio térmico. Um exemplo disso estaria demonstrado na Figura 13 (período de Out/17 a Abr/18) e, na Figura 14 (período de Out/16 a Abr/17).

Também concentrados em regiões mesofóticas, os recifes mais profundos como Rodolito Raso, Rodolito próximo à Buraca e Buraca, por estarem em porções mais profundas não apresentaram similaridade com o padrão térmico referente ao verão, amostrado pelo satélite do CRW, exceto no período que compreende o inverno, cujo padrão térmico é homogêneo.

A partir dos resultados mostrados, a seguir são mostradas as comparações de alertas de branqueamento estimadas de acordo com a metodologia apresentada no item 2.3 para os dados de TSM derivadas das medidas de satélite e aquelas medidas *in situ*. É importante destacar aqui que os alertas correspondentes ao CRW não foram recalculados, mas são graficadas os valores retirados do sítio do *Coral Reef Watch*. Novamente, os pontos são apresentados separadamente em Arco Costeiro Interno e Externo.

Arco Costeiro Interno

A Figura 18 mostra a comparação para as estimativas no recife Sebastião Gomes e a Figura 19 para Pedra de Leste.

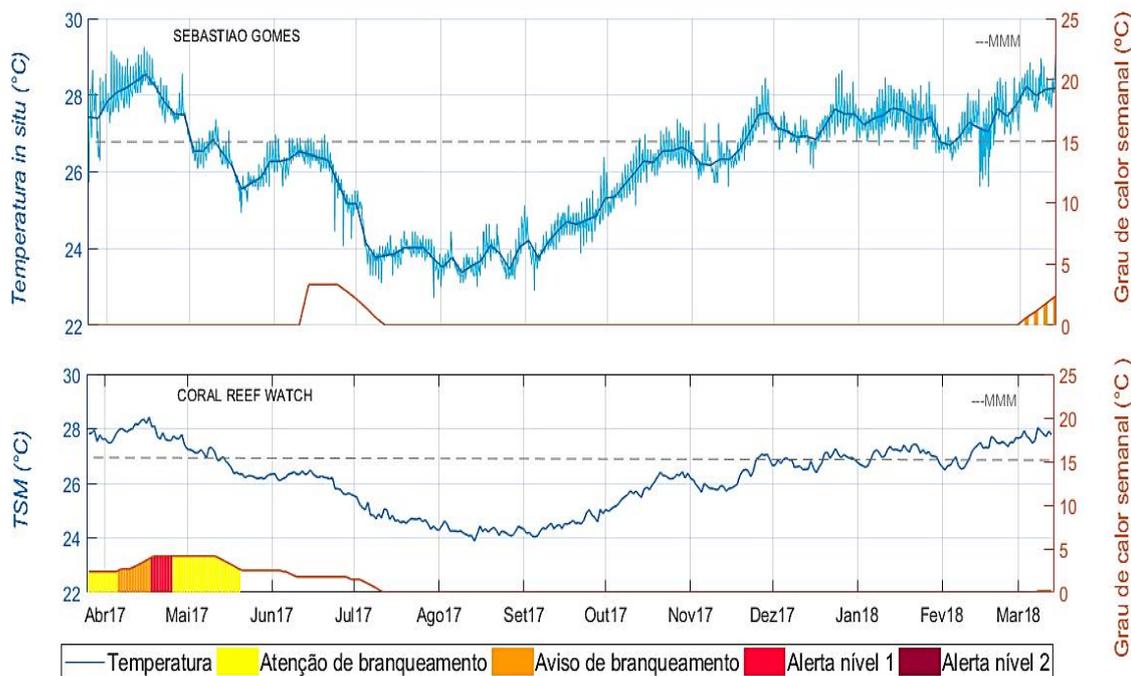


Figura 18: Distribuição de temporal da temperatura e alertas para as medidas *in situ* (topo cor amarela) e *Coral Reef Watch* (inferior) para recife Sebastião Gomes no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. Apesar da temperatura *in situ* estar acima da MMM até Mai/17 não há alerta de branqueamento porque não houve acúmulo de estresse térmico conforme a metodologia desenvolvida pelo CRW. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

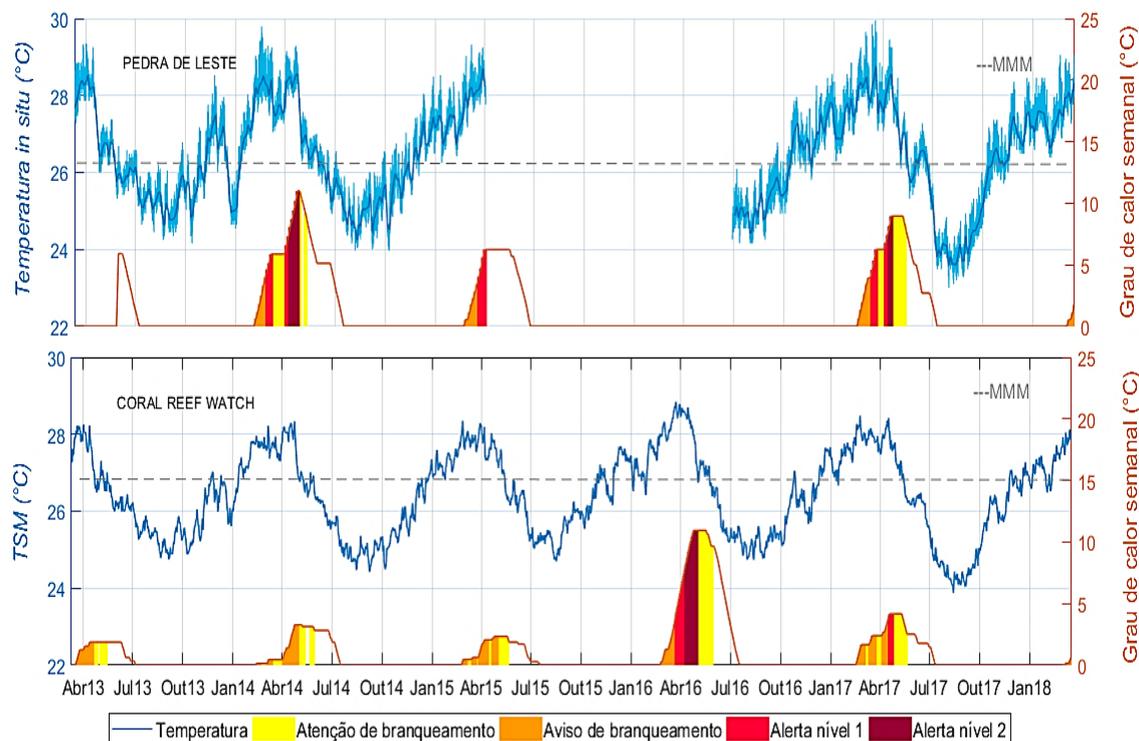


Figura 19: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o recife Pedra de Leste no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

Apesar da série temporal de temperatura medida no recife em Sebastião Gomes (Figura 18) ser menor do que aquela medida em Pedra de Leste (Figura 19), esses dois recifes são costeiros, relativamente próximos e, pelos dados medidos, devem apresentar o mesmo padrão. Portanto, a temperatura medida *in situ* mostrou que os corais desses recifes estiveram sujeitos a alertas mais intensos do que aqueles estimados pelas estimativas do CRW. Nesse sentido, o evento de Abril 2014 (Figura 19) é particularmente significativo, isto é, quando o Grau de Calor Semanal foi duas vezes superior aquele estimado pelo CRW. Menos significativo, mas também relevante, é o alerta em Março 2018 (Figura 18) que não aparece nas estimativas derivados pelo CRW.

Arco Costeiro *Offshore*

A sequência das Figuras 20 a 28 mostra as comparações para os seguintes pontos: Farol (Figura 20); Portinho Norte (Figura 21); PAB2 (Figura 22); PAB3 (Figura 23); Califórnia Topo (Figura 24); Califórnia Parede (Figura 25); Buraca (Figura 26); Rodolito próximo à Buraca (Figura 27) e Rodolito Raso (Figura 28).

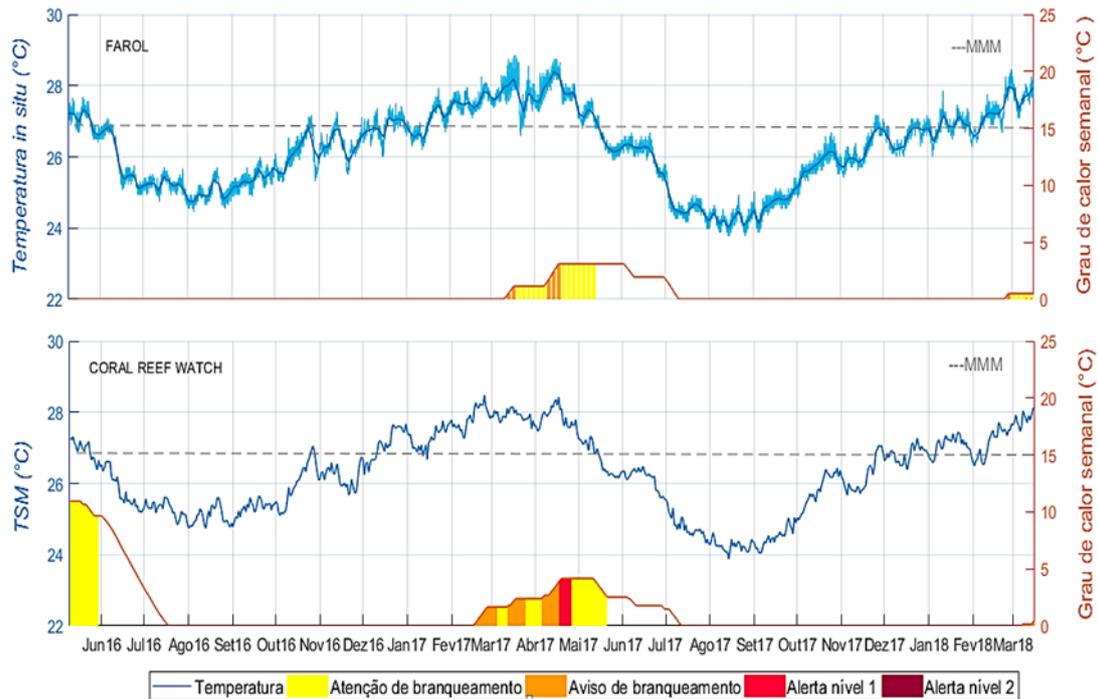


Figura 20: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Farol no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

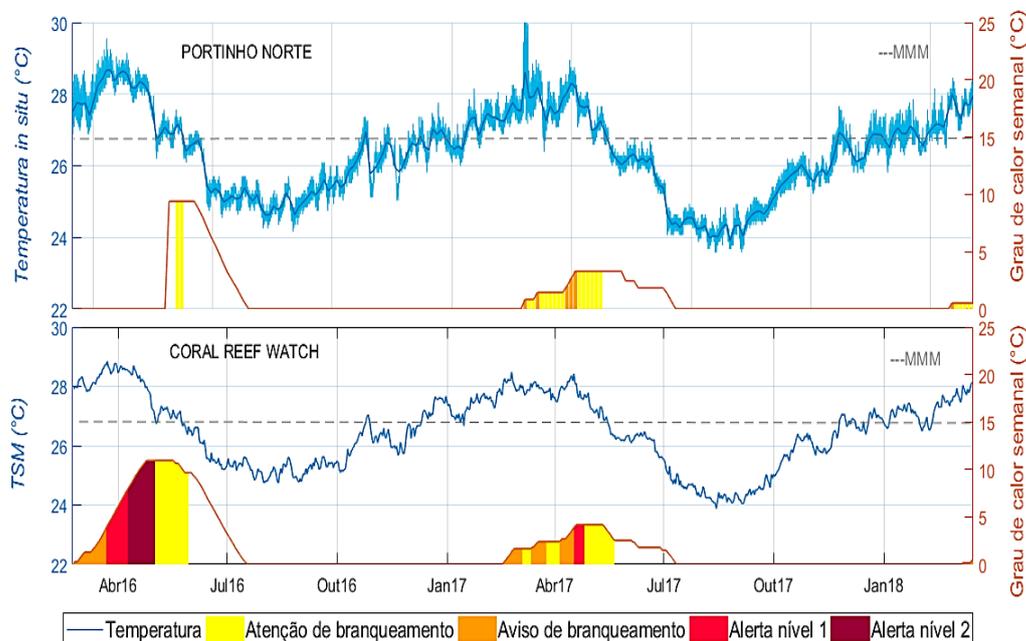


Figura 21: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Portinho Norte no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

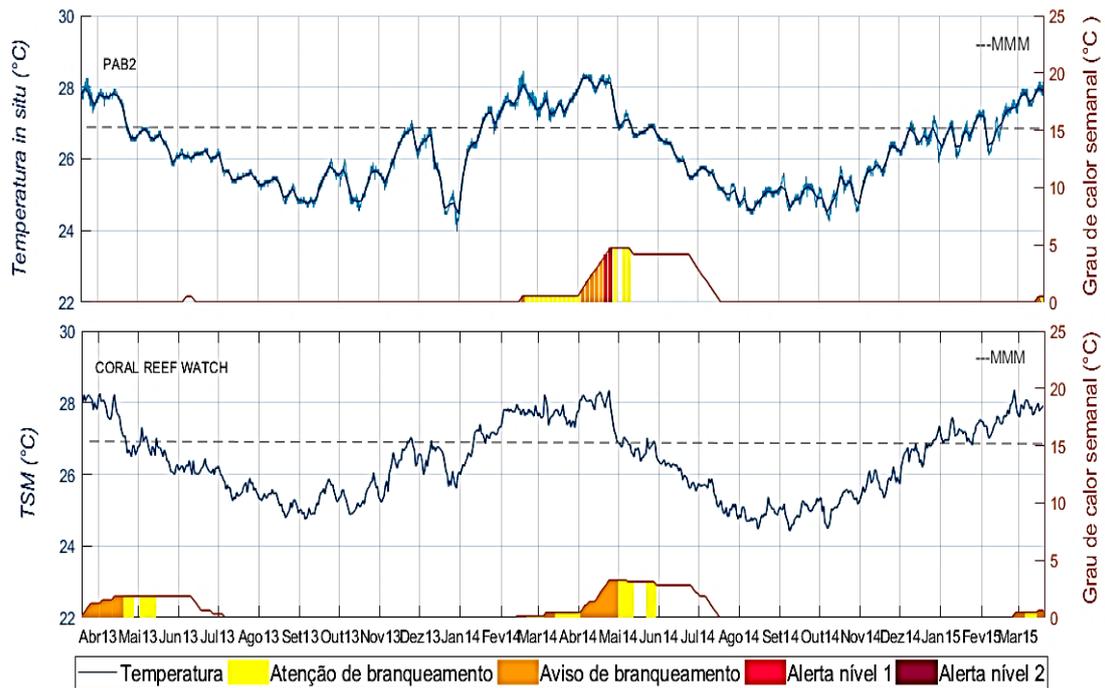


Figura 22: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto PAB2 no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.



Figura 23: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto PAB3 no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.



Figura 24: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Califórnia Topo no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.



Figura 25: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Califórnia Parede no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

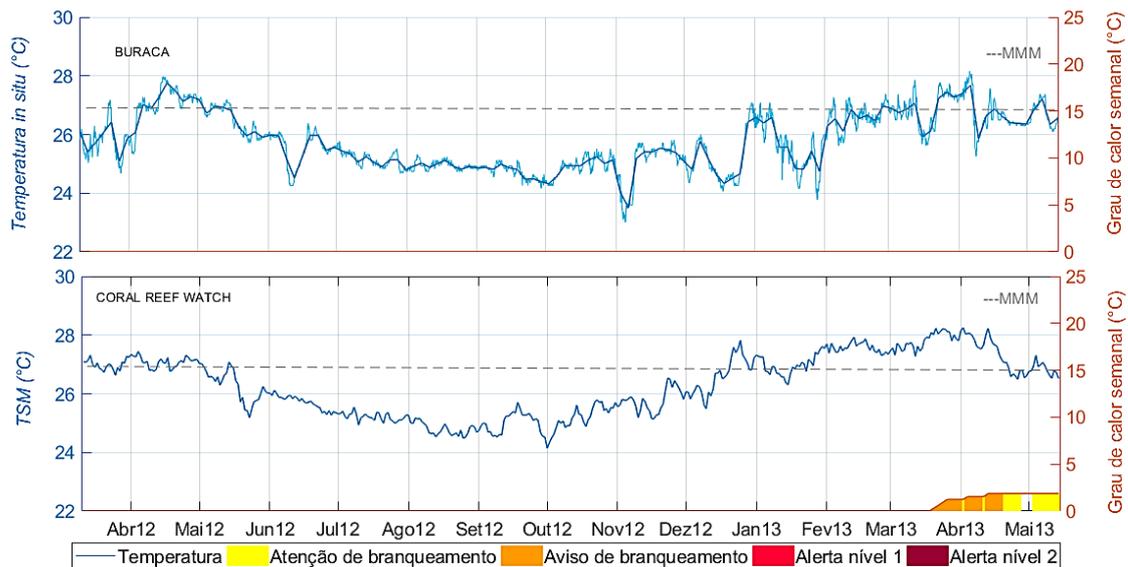


Figura 26: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Buraca no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

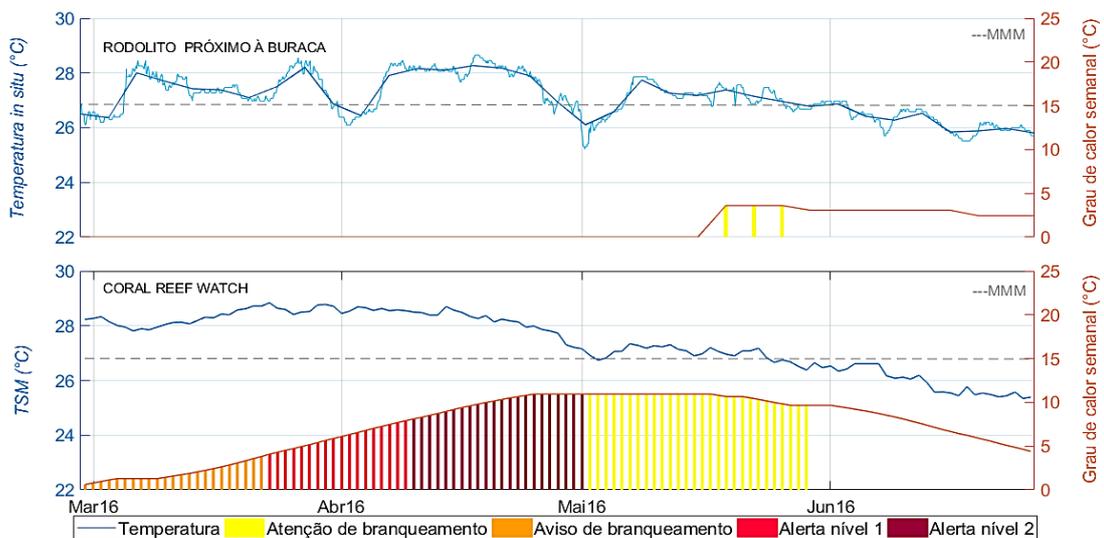


Figura 27: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Rodolito próximo à buraca no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.



Figura 28: Distribuição temporal da temperatura e alertas de branqueamento para as medidas *in situ* (topo) e *Coral Reef Watch* (inferior) para o ponto Rodolito Raso no período quando os dados são concomitantes. A linha em ciano no *plot* superior representa os dados de temperatura em intervalos de duas horas, enquanto que a linha contínua representa os dados brutos. A linha tracejada representa a MMM. A quantificação dos alertas está indicada no eixo Y do lado direito.

As comparações para o arco costeiro *offshore* podem ser grosseiramente agrupadas em dois *clusters*. O primeiro englobaria Farol, Portinho Norte, PAB2 e PAB3, enquanto o segundo seria formado pelo Recife Mesofótico Topo e Parede, Buraca, Rodolito Próximo à Buraca e Rodolito Raso. No primeiro conjunto os alertas do CRW são semelhantes aos estimados pelos dados *in situ*, enquanto que no segundo agrupamento as estimativas do CRW superestimam aquelas dos dados medidos. Os resultados apresentados indicam que embora as estimativas produzidas pelo CRW sejam um produto importante para se monitorar o estresse térmico no Banco de Abrolhos, os alertas não são válidos para todo o Banco que é espacialmente heterogêneo.

4 DISCUSSÃO

Devido à delicada tolerância dos recifes às variações de temperatura da água do mar, eles têm sido de grande importância para se avaliar o efeito das anomalias térmicas sobre os organismos (Vilaça, 2002). Neste sentido, os recifes de corais do Banco de Abrolhos (Figura 1 e Figura 3) também são áreas sujeitas ao estresse térmico que causam condições desfavoráveis ou mesmo letais afetando organismos até ecossistemas.

Termicamente, o padrão temporal da temperatura do ar é coerente com a distribuição temporal do calor de onda curta que atinge a região (Figura 4). Fevereiro é,

portanto, o mês mais quente do ano. Similarmente, o fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera também tem seus valores máximos nos meses de verão (janeiro a março). No entanto, se considerarmos os valores positivos (entrada de calor no oceano) e negativos (saída de calor do oceano) do fluxo líquido de calor é comum assumir-se apenas duas estações (Carton & Zhou, 1997) comumente associadas com o padrão de pluviosidade local das regiões tropicais, isto é, um período úmido (de outubro a março) e outro seco (de abril a setembro).

Apesar do aquecimento da camada de mistura do oceano ocorrer, aproximadamente, durante o período úmido, a distribuição temporal da temperatura da água do mar sobre o Banco de Abrolhos é defasada (Figura 5, Figura 6, Tabela 2) em relação ao fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera. Como resultado, o período mais crítico aos organismos estenotérmicos na área ocorre no outono, isto é, na primeira metade do período seco decorrente do aprofundamento da camada de mistura.

O padrão térmico observado em Abrolhos caracteriza-se por uma variabilidade sazonal na espessura da camada de mistura (Lima & Lentini, 2009), mais fina no período úmido e mais espessa no período seco. Ghisolfi *et al.* (2015) concluíram que o espessamento da camada de mistura é favorecido, inicialmente, pela mistura vertical decorrente do resfriamento radiativo superficial o que deixaria essa camada superficial quente e homogênea. A diminuição da estratificação vertical associada com o aumento da perda de calor do oceano (Figura 4) e a ocorrência de ventos do quadrante leste e sudeste, mais intensos (Ghisolfi *et al.*, 2015), resultaria em uma camada de mistura mais fria nos meses de agosto/setembro e, provavelmente, mais profunda.

O padrão aquecimento-resfriamento é observado tanto nas medidas de TSM feitas por satélite quanto nas séries temporais medidas *in situ* (pelo menos naquelas longas o suficiente para se caracterizar o padrão anual, por exemplo, Figuras 8 a 12). Então, as medidas disponibilizadas pelo CRW representariam o comportamento sobre o Banco de Abrolhos como um todo.

A primeira indicação de que esta afirmação pode não ser válida é apresentada na Figura 3 do estudo de Ghisolfi *et al.* (2015). Em todos os cinco pontos analisados em seu estudo houve um ciclo sazonal claro de aquecimento-resfriamento da água. Além disso, em quatro dos cinco pontos foi identificada diferença entre a temperatura superficial e a temperatura de fundo, enquanto que no ponto PT3 (costeiro) a coluna de água esteve verticalmente homogênea durante todo o período analisado. Adicionalmente, como pode

ser observado na Figura 29, a área na qual é obtida a medida de TSM do CRW é ligeiramente mais fria, pelo menos em janeiro, do que o restante do Banco de Abrolhos.

A evidência da heterogeneidade térmica sobre o Banco de Abrolhos é identificada na sequência das Figuras 7 a 17. Algumas características importantes emergem dessas comparações: a) as medidas *in situ* mostram que ocorrem processos suprainerciais sobre o Banco que são capazes de alterar significativamente a temperatura da água. Embora uma análise aprofundada deva ser realizada, esse aspecto está fora do escopo de análise do presente estudo; b) o período no qual o oceano perde calor para a atmosfera as duas medidas de temperatura tendem a se assemelhar já que há uma homogeneização da coluna de água. Esse padrão estaria de acordo com a dinâmica descrita por Ghisolfi *et al.* (2015) que implica no aprofundamento da camada de mistura; c) a diferença entre as medidas de temperatura *ex-situ* e *in situ* tendem a ser mais significativas durante o período de aquecimento do oceano (primavera e verão), embora isso não seja necessariamente verdadeiro para todos os pontos analisados.

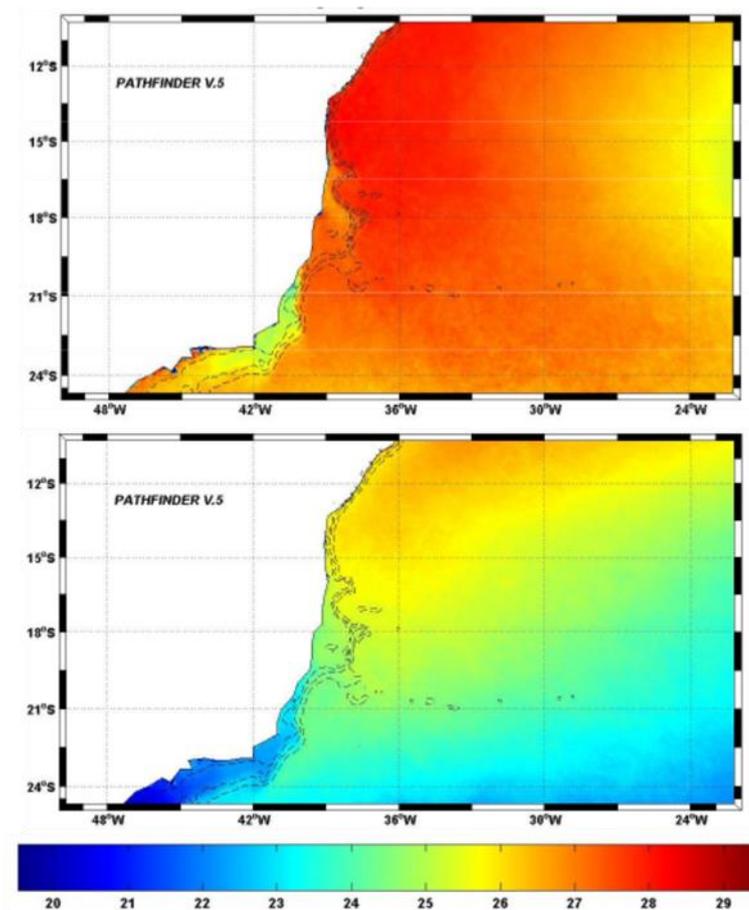


Figura 29: Mapas de médias mensais climatológicas de TSM (°C) obtidas através do sensor AVHRR do programa NOAA *Pathfinder* para o mês de janeiro (superior) e julho (inferior). As linhas tracejadas representam as isóbatas de 100m, 200m e 500m, respectivamente. Fonte: Souza et al. (2007).

Embora essa última característica seja uma evidência importante, ela deve ser analisada cuidadosamente. As duas medidas de temperatura não são realizadas no mesmo ponto da coluna de água e os sensores *in situ* deveriam estar a, pelo menos, 2 ou 3m abaixo da superfície da água. No entanto, embora a medida derivada do satélite seja denominada de Temperatura da Superfície do Mar ela na verdade representa a temperatura de balde (*bulk temperature*) da porção superficial da coluna de água. Se a região de estimativa da TSM por satélite for relativamente mais fria (Figura 29) então seria esperado que a temperatura *in situ* medida nos recifes costeiros (Sebastião Gomes e Pedra de Leste) fosse maior no período de verão já que a coluna de água rasa seria mais aquecida. Apesar disso, a temperatura nos recifes do arco costeiro externo mais profundos (mesofóticos) e aquela associada aos rodolitos é significativamente menor que a TSM sugerindo que houve a ocorrência de água mais fria na porção inferior da coluna de água

desses locais. Os recifes do arco costeiro externo mais superficiais (Portinho Norte, Farol, PAB2 e PAB3) estariam sujeitos à processos similares que ocorreriam na região de medição da TSM. Considerando-se todos esses aspectos pode-se sugerir que ocorre heterogeneidade térmica espaço-temporal sobre o Banco dos abrolhos, apesar de não ser possível identificar ou pontuar um ou mais processos físicos que o condicionariam.

Uma vez que os alertas de estresse térmico e de branqueamento derivam dos valores de temperatura medidos, as diferenças discutidas até aqui também modificam essas estimativas. Observações *in loco* tais como as relatadas, por exemplo, por Goreau *et al.* (2000) e Strong *et al.* (2000) constataram que existe uma correlação entre o branqueamento dos corais e os valores de Grau de Calor Semanal (GCS), isto é, uma estimativa do acúmulo de calor na água que atua como um fator estressante (estresse térmico) sobre a biota.

Coerente com a análise em termos do padrão de temperatura, o mesmo se identificou com o padrão de alerta e níveis de branqueamento. Os recifes costeiros (ex., Figura 19) tiveram os alertas de branqueamento mais intensos e o GCS maior do que aqueles preditos pelo CRW. Por outro lado, nos recifes do arco costeiro *offshore* e rodolitos não apresentaram alertas como os estimados pelo CRW (Figura 24 a 28). O restante deles (Figura 20 a 23) foram iguais ou menores que aqueles do CRW.

Uma outra característica que emerge do padrão mostrado nas Figuras 18 a 28 é que o período de estresse térmico é relativamente longo, se estendendo de março a julho, em torno de 4 meses (Figura 30, Tabela 3), além da variabilidade interanual no nível de calor acumulado pelo sistema no período analisado.

De acordo com a Figura 30, o evento mais significativo dentre aqueles avaliados ocorreu em 2016. Nesse período somente há dados *in situ* disponíveis para o ponto Portinho Norte (Figura 21), PAB3 (Figura 23) e Rodolito próximo à Buraca (Figura 27). Nos dois primeiros pontos os alertas derivados de ambas as medidas foram semelhantes, ambos os sinais captaram a mesma anomalia, enquanto que no último ponto as medidas *in situ* não indicaram o mesmo alerta. Nesse caso, em especial houve uma redução na temperatura da água superior a 2°C em abril e maio de 2016 que provocaram uma redução no conteúdo de calor acumulado na água e, conseqüentemente, no nível de alerta de branqueamento coralíneo.

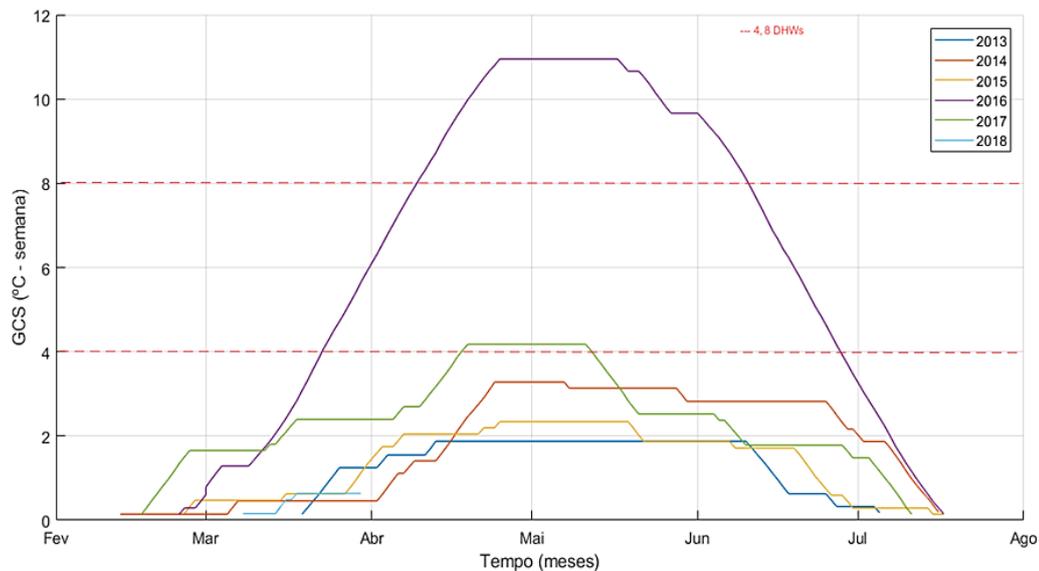


Figura 30: Gráfico com os valores de GCS plurianuais da CRW para 2013- 2018. Nota-se que o maior valor de GCS é no ano de 2016 entre os meses de março a julho. As linhas tracejadas em (vermelho) representam os valores de GCS de 4°C-semanas e 8°C- semanas. Valores maiores ou iguais a 8°C- semanas indicam um amplo branqueamento e mortalidade de ecossistemas recifais.

A nível global, Hughes *et al.* (2017) relataram que em 2016 os recifes da Grande Barreira de Corais da Austrália branquearam em 93%, onde 60 % tiveram branqueamento severo, enquanto que os recifes brasileiros branquearam menos, já que apenas 3% deles branquearam durante o período quando ocorreu o Terceiro Evento Global de Branqueamento nos anos entre 2014 e 2017. De acordo com estudos recentes de Teixeira *et al.* (2019), em Abrolhos os eventos de branqueamento foram moderados e ocorreram em 2016 durante o verão austral, estimando que cerca de 30 a 50% das colônias de corais sofreram branqueamento.

Parece ser consenso entre os autores que os recifes do Atlântico Sul sofreriam menos branqueamento do que os demais recifes a nível global já que a severidade do branqueamento varia no tempo e no espaço e está relacionada a fatores ambientais (DE CARLO & HARRISON, 2019).

Em relação aos recifes do Caribe e do Indo- Pacífico, os recifes do Atlântico Sul são menos suscetíveis ao branqueamento e podem ter se adaptado às condições locais de Abrolhos desenvolvendo uma aclimação ou refúgio contra eventos de estresse térmico (Duarte *et al.*, 2020). Devido a sua grande extensão e distribuição, os ecossistemas recifais do Atlântico Sul podem estar sujeitos a algumas condições ponderadas por Meis *et al.* (2020) que seriam: (1) a profundidade de sua localização; (2) os recifes que se encontram

em regiões com alta turbidez devido a descarga de rios sobre o oceano; (3) um maior crescimento de espécies de corais que se tornaram mais resistentes ao branqueamento; (4) e possibilidade de refúgio em condições mais profundas e frias (Glynn, 1996).

A turbidez da água agiria suavizando a alta irradiância e temperatura, servindo como um refúgio para os ecossistemas recifais (Woesik *et al.*, 2012), podendo algumas espécies já se adaptado a uma condição de ambiente turvo (Leão *et al.*, 1997) de baixa luminosidade e alta sedimentação (Laboral, 1969; Leão & Kikuchi, 2001). Outra condição local que pode interferir sobre os ecossistemas em Abrolhos seria a quantidade de nutrientes que pode modular a vulnerabilidade de corais (Wang *et al.* 2018), sendo possível que haja branqueamento, pois o excesso de nutrientes aumenta as concentrações de algas simbiotes (zooxantelas) que vivem nos tecidos dos corais (Marumbins & Davies, 1996). No entanto, as águas tropicais da Corrente do Brasil estão sempre presentes superficialmente sobre o Banco de Abrolhos (ex., Silveira *et al.*, 2000) com suas condições oligotróficas (Castro & Miranda, 1998).

Os resultados mostrados neste estudo mostram que a avaliação do impacto do estresse térmico sobre o sistema coralíneo não é uma tarefa simples, sendo quase impossível isolar o efeito dessa única forçante, pelo menos sobre o Banco de Abrolhos. A intrusão de uma água mais fria na porção inferior da coluna de água e uma menor anomalia térmica pode ter resultado em uma aclimatação ou até mesmo servido como um *buffer* térmico para os recifes de corais.

Além dos possíveis mecanismos já descritos por Ghisolfi *et al.* (2015) é possível incluir o papel da interação entre marés internas e a topografia de fundo (Pereira *et al.*, 2005) capazes de induzir localmente a intrusão de águas relativamente frias e ricas em nutrientes (a ACAS). A chegada de água mais fresca sobre as poças que são circundadas por esses recifes, podem atenuar as temperaturas mais elevadas sobre a água, ou em razão da ação de ondas internas associadas à frequência das marés que podem levar aos recifes águas mais frias (Storlazzi *et al.*, 2020).

5 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram, a partir de dados TSM de sensoriamento remoto e medições de temperatura *in situ* em diferentes pontos do Banco de Abrolhos, que o estresse térmico sobre os corais é recorrente, embora apresente uma variabilidade

interanual. Entre os anos de 2013 e 2018, o verão/outono de 2016 foi o período com maior estresse térmico sobre os corais do Banco de Abrolhos, segundo os alertas do CRW. Nesse período o Grau de Calor Semanal atingiu valores máximos, se comparado a anos anteriores e posteriores, além de ter apresentado cerca de 1,5 mês de alertas máximos (níveis 1 e 2). O ano de 2017 também apresentou significativo estresse térmico sobre os corais de Abrolhos, segundo o CRW, chegando a alertas nível 1

No entanto, quando se comparam os alertas gerados por uma série de temperatura pontual pelo CRW com medidas *in situ* obtidas em diferentes profundidades e locais viu-se que a extrapolação espacial não é válida. A comparação entre os dados *in situ* e do CRW mostrou que, tanto na duração quanto na intensidade do alerta, as diferenças entre a estimativa de temperatura *ex-situ* e a temperatura que realmente atua sobre os corais podem ser grandes. Essas diferenças refletem em parte a estratificação vertical sobre o Banco de Abrolhos nos meses críticos de fluxo líquido de calor em direção ao oceano (final do período chuvoso e início do período seco). As medições de temperatura dos corais profundos e do arco externo mostraram valores inferiores a MMM, impedindo o estresse térmico sobre os corais. Na estação seca ocorre a homogeneidade térmica da coluna de água.

Embora o verão de 2016 tenha sido um período com poucas medições *in situ* simultâneas ao longo do Banco, ele é emblemático em mostrar a heterogeneidade espacial da temperatura que atua sobre os corais na região. No ano em que os maiores valores de temperatura e alertas foram estimados pelo CRW, dois pontos próximos tiveram temperatura *in situ* bastante diferentes: PAB3 e Portinho Norte. Enquanto em PAB3 o aquecimento durante março e abril gerou alertas de branqueamento máximos (tanto no CRW quanto a partir dos dados medidos), a região de Portinho Norte teve apenas um alerta mínimo durante uma semana. A distância entre esses dois pontos é de apenas 5 km. Mesmo que próximos, processos oceanográficos locais podem atenuar o aquecimento em Portinho Norte ou até mesmo uma diferença da posição vertical na coluna d'água entre os pontos pode explicar comportamentos tão distintos entre os pontos. De qualquer forma, esse resultado reforça a importância da presença de uma forte estratificação vertical como uma barreira para o estresse térmico sobre determinadas áreas dos corais do Banco.

Para o mesmo período, processos na escala de dias (> 5 dias) ocorreram nos Rodolitos próximos às Buracas diminuindo a temperatura local e atenuando o Grau de Calor Semanal. Entre o final de março e início de abril de 2016 e entre o final de abril e início de maio de 2016 uma queda de temperatura de aproximadamente 2°C impediu que

um alerta de branqueamento severo ocorresse na região. Mudanças com escalas temporais semelhantes também aconteceram em outros locais (e.g, Califórnia Topo, Buraca) e sugerem que processos de mesoescala podem ser importantes fatores em diminuir a temperatura que atua sobre os corais, que progressivamente aumentaria com o calor líquido positivo em direção ao oceano. Esses processos podem ser gerados tanto por interações com o vento local e regional como processos de meandramento e penetração de massas d'água oceânicas sobre a plataforma de Abrolhos. No entanto, entender e explicar dinamicamente esses processos permaneceu além do escopo desse projeto e deve ser alvo de trabalhos futuros.

Finalmente, para os recifes costeiros e rasos (porém relativamente distantes da costa) os alertas de branqueamento se comparam entre si. No entanto, isso não significa que o branqueamento efetivamente ocorrerá no nível predito já que ele precisa ser avaliado pontualmente e individualmente, pois processos físico-químicos podem afetá-los distintamente em diferentes locais.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, R.; MORELOCK, J; OLIVIERI, R.A. Modification of coral reef zonation by terrigenous sediment stress. **Palaios**, v. 4, n. 1, p. 92-100, 1989.
- AMADO-FILHO, G.M.; MOURA, R.L.; BASTOS, A.C.; SALGADO, L.T.; SUMIDA, P.Y.; GUTH, A.Z.; FRANCINI-FILHO, R.B.; PEREIRA-FILHO, G.H.; ABRANTES, D.P.; BRASILEIRO, P.S.; BAHIA, R.G.; LEAL, R.N.; KAUFMAN, L.; KLEYPAS, J.A.; FARINA, M.; THOMPSON, F.L. Rhodolith beds are major CaCO₃ bio-factories in the tropical South West Atlantic. **PloS One** 7 (4), e35171, 2012.
- BARKLEY, H.C.; COHEN, A.L.; MOLLICA, N.R.; BRAINARD, R.E.; RIVERA, H.E.; DECARLO, T.M.; LOHMANN, GP.; DRENKARD, E.; ALPERT, A.E.; YOUNG, C.W.; VARGAS-ÁNGEL, B.; LINO, K.C.; OLIVER, T.A.; PIETRO, K.R.; LUU, V.H. Repeat bleaching of a central Pacific coral reef over the past six decades (1960–2016). **Communications Biology** 1 (1) :177 DOI 10.1038/s42003-018-0183-7, 2018.
- BASTOS, A.C.; MOURA, R.L.; AMADO-FILHO, G.M.; D'AGOSTINI, D.P.; SECCHIN, N.A.; FRANCINI-FILHO, R.B.; GÜTH, A.Z.; SUMIDA, P.Y.G.; MAHIQUES, M.; THOMPSON, F.L. Buracas: novel and unusual sinkhole-like features in the Abrolhos Bank. **Cont. Shelf Res.** 70,118–125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.04.035>, 2013.

- BASTOS, A.C. et al. **Origin and sedimentary evolution of sinkholes (buracas) in the Abrolhos continental shelf, Brazil.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 462, p. 101-111, 2016.
- BASTOS, A.C.; MOURA, R.L.; MORAES, F.C.; VIEIRA, L.S.; BRAGA, J.C.; RAMALHO, L.V. Bryozoans are major modern builders of South Atlantic oddly shaped reefs. **Sci. Rep.** 8, 9638, 2018.
- BRUCE, T. et al. Abrolhos bank reef health evaluated by means of water quality, microbial diversity, benthic cover, and fish biomass data. **PloS One**, v. 7, n. 6, p. e36687, 2012.
- BRUNO, J. F.; AND SELIG, E. R. Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: timing, extent, and sub-regional comparisons. **PLoS ONE** 2: e711. doi: 10.1371/journal.pone.0000711, 2007.
- BRUNO, J.; SIDDON, C.; WITMAN, J.; COLIN, P.; TOSCANO, M. El Niño related coral bleaching in Palau, Western Caroline Islands. **Coral Reefs** 20 (2): 127–136 DOI 10.1007/s003380100151, 2001.
- CARTON, J.A.; ZHOU, Z. Annual cycle of sea surface temperature in the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 102(C13), pp. 27813-27824, 1997.
- CASTRO, B.M.; DOTTORI, M.; PEREIRA, A.F. Subinertial and tidal currents on the Abrolhos Bank shelf. **Continental Shelf Research**, 70, pp.3-12, 2013.
- CASTRO, B.M.; MIRANDA, L.B.; Physical Oceanography of the Western Atlantic continental Shelf located between 4°N and 34° S. In: ROBISON, A.R.; BRINK, K.H. (Eds.), **The Sea**, vol.11. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, pp. 210 – 251,1998.
- CASTRO, C.B.; PIRES, D.O. A bleaching event on a Brazilian coral reef. **Rev. Bras. Oceanogr.** 47: 87-90, 1999.
- CAVALCANTI, G.; GREGORACCI, G.B.; MOURA, R.L.; AMADO-FILHO, G.; LONGO, L.L.; BASTOS, A.C.; FERREIRA, C.M.; FRANCINI-FILHO, R.B.; PARANHOS, R.; GHISOLFI, R.D.; KRÜGER, R.; GÜTH, A.Z.; SUMIDA, P.Y.G.; MAIA-NETO, O.; SANTOS; E.O.; LIDA, T.; THOMPSON, F.L. Sinkholeslike structures as bioproductivity hotspots in the Abrolhos bank. **Cont. Shelf Res.** 70, 126–134, 2013.
- CHOLLETT, I.; MUMBY, P.J.; CORTE´S, J. Upwelling areas do not guarantee refuge for coral reefs in a warming ocean. **Mar Ecol Prog Ser** 416:47–56, 2010.
- CORTÉS, J.; MURILLO, M.M.; GUZMFIN, H.M.; ACUFIA, J. Perdida de zooxantelas y muerte de corales y otros organismos arrecifales en el Caribe y Pacifico de Costa Rica. **Re Biol Trop** 32:227-231, 1984.

- COSTA, J.R.; LEÃO Z.; NIMMO, M.; ATTRILL, M.J. Impactos da Nutrição nos recifes de coral do norte da Bahia, Brasil. **Hydrobiologia**. 4400: 307-315, 2000.
- DE CARLO, T.M.; HARRISON, H.B.; GAJDZIK, L.; ALAGUARDA, D.; RODOLFO-METALPA, R.; D'OLIVO, J.; LIU, G.; PATALWALA D, MCCULLOCH M.T. Acclimatization of massive reef-building corals to consecutive heatwaves. Proceedings of the Royal Society B: **Biological Sciences** 286 (1898): 20190235, 2019.
- DE OLIVEIRA, M. D. D. M. Os mecanismos de sobrevivência dos corais diante do impacto das mudanças climáticas sobre o ecossistema de recifes. **Cadernos de Geociências**, 9(2), 2012.
- DE'ATH, G.; FABRICIUS, K. E.; SWEATMAN, H.; AND PUOTINEN, M. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.** 109, 17995–17999. doi: 10.1073/pnas.1208909109, 2012.
- DHN. **Atlas de Cartas Piloto**. Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1993.
- DONNER, S.D.; RICKBEIL, G.J.M.; HERON, S.F, TRIEBOLD, C.; DUBOIS, E.; HENSS, J. A new, high resolution global mass coral bleaching database. **PLOS ONE** 12 (4): e0175490DOI 10.1371/ journal. Pone. 0175490, 2017.
- DUARTE, G. A.S et al. Heat waves are a major threat to turbid coral reefs in Brazil. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, p. 179, 2020.
- DUTRA, L. X. C.; KIKUCHI, R. K.P.; LEÃO, Z.M.A. N. Effects of sediment accumulation on reef corals from Abrolhos, Bahia, Brazil. **Journal of Coastal Research, Royal Palm Beach**, 39: 639-644. Edinger E. N., Jompa, 2006.
- DUTRA, L.X.M.; KIKUCHI, R.K.P.; LEÃO, Z.M.A.N. **Thirteen months monitoring coral bleaching on Bahia's north coast, Brazil**. Proc. Int. Coral Reefs Symp. 9. Vol 1. Bali, Indonesia. p. 373, 2000.
- EMILSON, I. The Shelf and Coastal Waters Off Southern Brazil. Bolm. **Inst. Oceanogr.**, XI (2), 101-112, 1961.
- ESCOBAR, Herton. Recifes em risco. **Estadão**, 21 de ago.de 2016. Disponível em: <<https://infograficos.estadao.com.br/especiais/recifes-em-risco/>. Acesso em: 15 de out.de 2020.
- FELLET, JOÃO. Como o comércio Transatlântico de escravos explica o caminho do óleo até as praias do nordeste. **BBC News**, São Paulo, 10 de nov. de 2019. Disponível em:< <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-50270579>. Acesso em: 31 de agosto de 2020.
- FRANCINI-FILHO, R.B.; VELÁSQUEZ, V.M.; SILVA, M.B.; ROSA, M.R.; SUMIDA, P.Y, PINHEIRO, HT.; ROCHA, L.A.; FERREIRA, C.EL.; FRANCINI, C.L.B.; ROSA, R.S.

- Brazil. In: Loya Y, Puglise KA, Bridge TCL (eds) *Mesophotic Coral Ecosystems*. **Springer International Publishing**, Switzerland, pp 163–198, 2019.
- GARDNER, T.; CÔTÉ, I.; GILL, J.; GRANT, A.; AND WATKINSON, A. Long term region-wide declines in Caribbean corals. **Science** **30**, 958–960. doi: 10.1126/science.1086050, 2003.
- GATES, R.D.; BAGHDASARIAN, G.; MUSCATINE, L. Temperature stress causes host cell detachment in symbiotic cnidarians: implications for coral bleaching. **Biological Bulletin** **182**(3): 324–332 DOI 10.2307/1542252, 1992.
- GHISOLFI, R. D.; DA SILVA, M. P.; DOS SANTOS, F. T.; SERVINO, R. N.; CIRANO, M.; THOMPSON, F. L. Physical forcing mechanisms controlling the variability of chlorophyll-a over the Royal-Charlotte and Abrolhos Banks—eastern Brazilian shelf. **PloS One**, **10**(2), e0117082, 2015.
- GINTERT, B.E.; MANZELLO, D.P.; ENOCHS, I.C.; KOLODZIEJ, G.; CARLTON, R.; GLEASON, A.C.R.; GRACIAS, N. Marked annual coral bleaching resilience of an inshore patch reef in the Florida Keys: a nugget of hope, aberrance, or last man standing? **Coral Reefs** **37** (2):533–547DOI 10.1007/s00338-018-1678-x, 2018.
- GLYNN, P.W. Widespread coral mortality and the 1982/83 *El Niño* warming event. **Environ Conserv** **11**:133–146, 1994.
- GLYNN, P.W. Coral reef bleaching: ecological perspectives. **Coral Reefs** **12**: 1–17, 1993.
- GLYNN, P.W. Coral reef bleaching: Facts, hypotheses and implications, 1996.
- GLYNN, P.W. *El Niño*-Southern Oscillation 1982-1983: Near shore population, community, and ecosystem responses. **Ann Rev Ecol Syst** **19**:309-345, 1988.
- GLYNN, P.W. Extensive ‘bleaching’ and death of reef corals on the Pacific coast of Panama. **Environmental Conservation** **10** (2): 149–154 DOI 10.1017/S0376892900012248, 1983.
- GLYNN, P.W.; D’CROZ, L. Experimental evidence for high temperature stress as the cause of *El Niño* - coincident coral mortality. **Coral Reef**, **8**,181-191, 1990.
- GOREAU, T.; HAYES, R.L. Coral bleaching and ocean hot spots. **Ambio** **23**: 176-180, 1994.
- GOREAU, T.; MCCLANAHAN, T.; HAVEYS, R.; STRONG, A. Conservation of coral reefs after the 1998 global bleaching event. **Conservation Biology** **14**:5-15, 2000.
- GRIFFIS, R. B. et al. *Oceans and Marine Resources*, 2018.
- GUEST, J.R.; BAIRD, A.H.; MAYNARD, J.A.; MUTTAQIN, E.; EDWARDS, A.J.; CAMPBELL, S.J.; YEWDALL K.; HARTT, C. F.; AGASSIZ, L. **Geology and Physical Geography of Brazil**. Fields, Osgood, 2012.

- HARTT, C. F.; LOUIS, A. Scientific Results of a Journey in Brazil by Louis Agassiz and His Travelling Companions: **Geology and Physical Geography of Brazil**. Fields, Osgood, 1870.
- HINDERSTEIN, L. M. et al. Theme section on “Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology, and Management”. **Coral Reefs**, v. 2, n. 29, p. 247-251, 2010.
- HORTA, P. A et al. Rhodoliths in Brazil: Current knowledge and potential impacts of climate change. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n. SPE2, p. 117-136, 2016.
- HUGHES, T. P. Catastrophes, phase shifts, and large-Scale degradation of a Caribbean coral reef. **Science** **265**, 1547–1551. doi: 10.1126/science.265. 5178.1547, 1994.
- HUGHES, T.; KERRY J. Back-to-back bleaching has now hit two-thirds of the Great Barrier Reef. **The Conversation**, 2017.
- HUGHES, T.P *et al.* Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science* 359 (6371): 80–83 DOI 10.1126/ **Science**. aan8048, 2018.
- IBAMA (*Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis*), **Plano de manejo do Parque Nacional Marinho de Abrolhos**. 1991. IBAMA, Brasília, 1991.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: **IPCC**. Disponível em: <Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: jun. 2020.
- JOKIEL, P.L.; COLES, S.L. Effects of temperature on the mortality and growth of Hawaiian reef corals. **Marine Biology** 43(3): 201–208 DOI 10.1007/BF00402312, 1977.
- KELMO, F.; ATTRILL, M. J.; JONES, M. B. Effects of the 1997-1998 *El Niño* on the cnidarian community of a high turbidity coral reef system (northern Bahia, Brazil). **Coral Reefs** **22**, 541–550, 2003.
- KIKUCHI, R.K.P.; LEÃO, Z.M.A.N.; OLIVEIRA, M.D.M.; DUTRA, L.X.C.; CRUZ, I.C. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia associado aos efeitos do *El Niño* 2003. **Cong. Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa 2**. Recife, Brasil. p.213, 2004.
- KOPP, R. E. et al. Evolving understanding of Antarctic ice-sheet physics and ambiguity in probabilistic sea-level projections. **Earth's Future**, v. 5, n. 12, p. 1217-1233, 2017.
- LABOREL, J.L. Les peuplements des madreporaires cotes tropicales du Bre ´sil. **Annales Univ. dAbidjan**, Serie E, II, Fasc. 3, 260, 1969.

- LAND, L.A.; PAULL, C.K.; HOBSON, B. Genesis of a submarine sinkhole without subaerial exposure: Straits of Florida. **Geology** **23**, 949–951. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023b0949:GOASSWN2.3.CO2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023b0949:GOASSWN2.3.CO2), 1995.
- LEÃO, Z. M. A. N. Abrolhos: **O complexo recifal mais extenso do Oceano Atlântico Sul**. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. SIGEP, p. 345-359, 1999.
- LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P. “The Abrolhos reefs of Brazil,” in Coastal Marine Ecosystems of Latin America, eds U. Seeliger and B. Kjerfve (Berlin: **Springer-Verlag**), 83–96. doi: 10.1007/978-3-662-04482-7_7, 2001.
- LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; OLIVEIRA, M. D. M.; VASCONCELLOS, V. Status of Eastern Brazilian coral reefs in time of climate changes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**. v. 5, n. 2, p. 224-235, 2010.
- LEÃO, Z. M.; KIKUCHI, R. K.; FERREIRA, B. P.; NEVES, E. G.; SOVIERZOSKI, H. H.; OLIVEIRA, M. D.; JOHNSON, R. Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. **Brazilian Journal of Oceanography**, 64(SPE2), 97-116., 2016.
- LEÃO, Z.M.A.N.; GINSBURG, R.N. Living reefs surrounded by siliciclastic sediments: the Abrolhos coastal reefs, Bahia, Brazil. In: **Proceedings of the Eighth International Coral Reef Symposium**, vol. 2, pp. 1767–1772, 1997.
- LEÃO, Z.M.A.N.; KIKUCHI, R.K.P. A relic coral fauna threatened by global changes and human activities, Eastern Brazil. **Mar Pollut Bull**. 51: 599–611. pmid: 15913660, 2005.
- LEÃO, Z.M.A.N.; KIKUCHI, R.K.P.; OLIVEIRA M.D.M. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. **Biota Neotrop**. 8: 69-82, 2008.
- LEÃO, Z.M.A.N.; KIKUCHI, R.K.P.; TESTA V. Corais e recifes de coral do Brasil. In: Jorge C, editor. Recifes de corais da América Latina. Amsterdã: **Elsevier Science**. 9-52, 2003.
- LIMA, L.N.; LENTINI, C.A.D. Variabilidade Sazonal da Profundidade da Camada de Mistura na Região do Complexo Recifal dos Abrolhos e da Cadeia Vitória Trindade baseada em Dados de Ventos Derivados do Satélite Quik SCAT. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, RN, Brasil, INPE, pp: 6533-6540, 2009.
- LISBOA, D. S.; KIKUCHI, R. K. P.; LEÃO, Z. M.A.N. El Nino, sea surface temperature anomaly and coral bleaching in the South Atlantic: A chain of events modeled with a Bayesian approach. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 123, n. 4, p. 2554-2569, 2018.
- LIU, G.; EAKIN, C.M.; CHEN, M.; KUMAR, A.; DE LA COUR, J.L.; HERON, S.F.; GEIGER, E.F.; SKIRVING, W.J.; TIRAK, K.V.; STRONG, A.E. Predicting Coral Bleaching Heat

- Stress to Inform Reef Management: NOAA Coral Reef Watch's Four-Month Outlook. **Front Mar Sci** (interview), 2017.
- LIU, G.; HERON, S.F.; EAKIN, C.M.; MULLER-KARGER, F.E.; VEGA-RODRIGUEZ, M.; GUILD, L.S.; DE LA COUR, J.L.; GEIGER, E.F.; SKIRVING, W.J.; BURGESS, T.F.R.; STRONG, A.E.; HARRIS, A.; MATURI, E.; IGNATOV, A.; SAPPER, J.; LI, J.; LYNDY, S. Reef-scale thermal stress monitoring of coral ecosystems: New 5-km global products from NOAA Coral Reef Watch. **Remote Sens** 6:11579–11606, 2014.
- LIU, G.; STRONG, A.; SKIRVING, W.; ARZAYUS, F. Overview of NOAA Coral Reef Watch program's near real-time satellite global coral bleaching monitoring activities. **Proc 10th Int Coral Reef Symp**, Okinawa, Japan. 1. 1783-1793, 2005.
- LIU, Q.; SONG R. Elementary Discussion on Sea Water Intrusion. **Hydrogeology Journal**, 978-1-4244-4713-8/10, 2010.
- LOUGH, J.M.; ANDERSON, K.D.; HUGHES, T.P. Increasing thermal stress for tropical coral reefs: 1871-2017. **Scientific Reports** 8:6079, 2018.
- MARUBINI, F.; DAVIES, P.S. Nitrate increases zooxanthellae population density and reduces skeletogenesis in corals. **Marine Biology** 127 (2): 319–328 DOI 10.1007/BF00942117, 1996.
- MIES, M. et al. South Atlantic coral reefs are major global warming refugia and less susceptible to bleaching. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, p. 514, 2020.
- MORGAN, K.M.; PERRY, C.T.; JOHNSON, J.A.; SMITHERS, S.G. Nearshore turbid-zone corals exhibit high bleaching tolerance on the Great Barrier Reef following the 2016 ocean warming event. **Front Mar Sci** 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00224>, 2017.
- MOURA, R. L.; SECCHIN, N. A.; AMADO-FILHO, G. M.; FRANCINI-FILHO, R. B.; FREITAS, M. O.; MINTE-VERA, C. V.; GUTH, A. Z. Spatial patterns of benthic megahabitats and conservation planning in the Abrolhos Bank. **Continental Shelf Research**, 70, 109-117, 2013.
- MOURA, R.L.; SECCHIN, N.A.; AMADO-FILHO, G.M.; FRANCINI-FILHO, R.B.; FREITAS, M.O., MINTE-MOURA, RODRIGO L. ET AL. An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science advances**, v. 2, n. 4, p. e1501252, 2016.
- NIMER, E. Climatologia Do Brasil. **IBGE**, Rio de Janeiro, 421 pp, 1987.
- NOAA Coral Reef Watch. NOAA coral reef watch daily global 5-km satellite coral bleaching degree heating week product. Available at https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_sst.php, 2019.

- OLIVER, J. K.; BERKELMANS, R; EAKI, C.M. "Coral bleaching in space and time." In *Coral bleaching*, pp. 21-39. **Springer**, Berlin, Heidelberg, 2009.
- PEREIRA, A.F.; BELEM, A.L.; GEREMIAS, R. Tide- topography interaction along the Eastern Brazilian Shelf. **Continental Shelf Research** **25** (12 -13), 1521 – 1539, 2005.
- PEREIRA-FILHO, G.H.; AMADO-FILHO, G.M.; MOURA, R.L., BASTOS, A.C., GUIMARÃES, S.M.P.B.; SALGADO, L.T.; FRANCINI-FILHO, R.B.; BAHIA, R.G.; ABRANTES, D.P.; GUTH, A.Z.; BRASILEIRO, P.S. Extensive rhodolith beds cover the summits of southwestern Atlantic Ocean: **Journal of Coastal Research**, v. 28, p. 261–269, 2012.
- PRAHL, H.V. Crecimiento del coral *Pocillopora damicornis* durante y después del fenómeno El Niño 1982–1983 en la Isla de Gorgona, Colombia. **Bol Erfen** 18:11–13, 1986.
- PRATCHETT, M.S.; MCCOWAN, D.; MAYNARD, J.A.; HERON, SF. Changes in bleaching susceptibility among corals subject to ocean warming and recurrent bleaching in Moorea, French Polynesia. **PLOS ONE** 8(7): e70443 DOI 10.1371/**journal.pone.0070443**, 2013.
- ROBINSON, G. Influence of the 1982-83 El Niño on Galapagos marine life. In: Robinson G, del Pino EM (eds) El Niño en las Islas Galapagos: el evento de 1982-1983. Quito, Ecuador, pp 153-190, 1985.
- SHUAIL, D.; WIEDENMANN, J.; D'ANGELO, C.; BAIRD, A.H.; PRATCHETT, M.S.; RIEGL, B.; PETROV, P, AMOS, C. Local bleaching thresholds established by remote sensing techniques vary among reefs with deviating bleaching patterns during the 2012 event in the Arabian/Persian Gulf. **Marine Pollution Bulletin** 105(2):654–659 DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.03.001, 2016.
- SILVEIRA, I.C.A.; SCHMIT, A.C.K.; CAMPOS, E.I.; de GODOI, S. S; IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista brasileira de Oceanografia**, 48 (2), 171 -183, 2000.
- SOUZA, R.B.; GHERARDI, D.F.M.; SATO, O.T.; POLITO, P.S.; KAMPEL, M.; LENTINI, C.A.D. Climatologia e variabilidade ambiental marinha na região do Banco dos Abrolhos determinada por satélites: resultados preliminares do projeto Pro-Abrolhos. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis, Brasil, 2007.
- STORLAZZI, C.D., et al. "Internal tides can provide thermal refugia that will buffer some coral reefs from future global warming." **Scientific reports** 10.1: 1-9, 2020
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 104 (C9), 20863, 1999.

- STRONG, A.E.; KEARNS, E.; GJOVIG, K.K. Sea surface temperature signals from satellites—an update. **Geophysical Research Letters**, 27 (11), 1667–1670, 2000.
- STRONG, A.E.; LIU, G.; MEYER, J.; HENDEE, J.C.; SASKO, D. Coral reef watch 2002. **Bull. Mar. Sci.**, 75, 259–268, 2004.
- STRONG, A.E.; LIU, G.; SKIRVING, W; EAKIN, C.M. NOAA's Coral Reef Watch program from satellite observations. **Annals of GIS**, 17(2), pp.83-92, 2011.
- TEIXEIRA, C. D.; LEITÃO, R. L. L.; RIBEIRO, F. V.; MORAES, F. C.; NEVES, L. M.; BASTOS, A. C. Sustained mass coral bleaching (2016–2017) in Brazilian turbid-zone reefs: taxonomic, cross-shelf and habitat-related trends. **Coral Reefs** 38, 801–813. doi: 10.1007/s00338-019-01789-6, 2019.
- VALE, N.F. Structure and composition of rhodoliths from the Amazon River mouth, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 84, p. 149-159, 2018.
- VAN WOESIK, R.; HOUK, P.; ISECHAL, A.L.; IDECHONG, J.W.; VICTOR, S.; GOLBUU, Y. Climate-change refugia in the sheltered bays of Palau: analogs of future reefs. **Ecology and Evolution** 2(10):2474–2484, 2012.
- VILAÇA, R. Recifes biológicos. **Biologia marinha**, 2002.
- WANG, L.; SHANTZ, A.A.; PAYET, J.P.; SHARPTON, T.J.; FOSTER, A.; BURKEPILE DE, V.; THURBER, R. Corals and their microbiomes are differentially affected by exposure to elevated nutrients and a natural thermal anomaly. **Frontiers in Marine Science** 5:101 DOI 10.3389/fmars.2018.00101, 2018.
- WINTER, A. P. M. Corais de águas turvas e o desafio das mudanças climáticas globais. **Braz. J. oceanogr**, v. 64, n. 3, 2016.