

Geração de mapas de *HotSpots* e Índice de Aquecimento para identificação de regiões de branqueamento no Nordeste do Brasil com base em dois conjuntos de dados

Danilo Silva Lisboa^{1,a,*}
Carlos Alexandre Domingos Lentini^{1,b,*}

¹Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Instituto de Física
Travessa Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Ondina, Salvador - BA, Brasil
^a zecassivaldo@yahoo.com.br
^b clentini@ufba.br

*Grupo de Oceanografia Tropical – www.goat.fis.ufba.br

Abstract. The AVHRR Pathfinder V5 high-resolution (4 km x 4 km) satellite-derived sea surface temperature (SST) has been used to identify the intensity and the extension of HotSpots and potential areas of coral reef bleaching along the northeast coast of Brazil. The choice of using a high-resolution SST product instead of the NOAA Coral Reef Watch product (50 km x 50 km) available online is mainly due to the small width of the northeastern Brazilian continental shelf, which is around 30-50 km. In this way, two datasets are used here for intercomparison: monthly mean SSTs and mean SST pentads. These datasets are the basis of all subsequent analysis and correspond to night retrievals only to avoid diurnal differential heating. The "bleaching threshold" concept is crucial for understanding and identifying regions where corals may experience thermal stress. Therefore, one may expect that using different datasets will produce different bleaching threshold maps. These maps make it possible to quickly pinpoint regions of elevated SSTs throughout the area of study. The results indicate HotSpots, which are simply areas of anomalously high temperature SSTs exceeding +1°C above the warmest monthly mean SST, mainly over the continental shelf in the Royal Charlotte and in the Abrolhos Bank region. These HotSpots denote potential bleaching activity is most likely underway wherever a +1°C elevation above the monthly mean maximum exists. These maps are shown for a bleaching episode in 2003.

Palavras-chave: TSM, coral, SST, AVHRR, Abrolhos, estresse térmico, anomalia, thermal stress.

1. Introdução

A temperatura de superfície do mar (TSM), obtida rotineiramente através de sensores remotos, tem sido usada frequentemente para definir e limitar áreas de branqueamento de coral ao redor dos oceanos tropicais. A determinação dessas áreas pode ser feita através da definição de um valor de TSM limite máximo, ou através da construção de um índice de branqueamento baseado no critério de "semanas de aquecimento" (e.g., Strong & Gleeson 1995). Outra técnica comumente empregada baseia-se na observação de "pontos quentes", ou *HotSpots* (Goreau & Hayes 1994). Os *HotSpots* são simplesmente áreas com TSM anormalmente elevada e que excede em 1°C a máxima média mensal climatológica de TSM (Goreau & Hayes 1994). Quando esses *HotSpots* persistem por mais de uma semana, espera-se que ocorra um branqueamento em massa (Goreau & Hayes, 1994; Marshall & Schuttenberg, 2006).

No Brasil, desde a década de 1990, casos de branqueamento foram observados, especialmente ao longo do litoral do estado da Bahia. No verão de 1993/1994, o fenômeno foi verificado na costa de São Paulo (Migotto, 1997, apud Kikuchi et al., 2003) e no sul da Bahia no Parcel dos Abrolhos (Castro e Pires, 1999). Em 1998, foi verificado também na costa norte da Bahia e em Abrolhos (Leão et al., 2003; Leão et al., 2008). Além disso, outros eventos de branqueamento foram reportados no estado da Bahia nos anos de 2000 a 2005 (Leão et al., 2008). Segundo Leão et al. (2008), anomalias de TSM provocaram os casos de branqueamento observados ao longo dos recifes de corais do litoral baiano.

A National Oceanic and Atmospheric Administration/National Environmental Satellite Data and Information Service (NOAA/NESDIS) desenvolve rotineiramente mapas semanais globais de *HotSpots* com uma resolução de 50 km para avaliação de áreas de estresse térmico

e possivelmente de risco de branqueamento através do programa NOAA *Coral Reef Watch* (NOAA-CRW) (<http://www.coralreef.noaa.gov/>). Esse produto tem se mostrado eficiente para regiões da Austrália, Caribe e Japão, mas não para águas brasileiras. A não-detecção de *HotSpots* ao longo do litoral brasileiro pode ser decorrente dos altos valores de TSM usados na confecção do mapa de temperatura de fronteira. Além disso, devido à pequena largura da plataforma continental no Nordeste do Brasil (i.e., ~ 50 km), esse tipo de produto não oferece a resolução espacial necessária para avaliar regiões potencialmente favoráveis ao branqueamento ao longo da costa, principalmente em regiões marcadas por intensos gradientes térmicos (Toscano et al., 1999).

Com base nos argumentos acima, uma metodologia comparativa da técnica de *HotSpots* baseada em duas climatologias distintas, mensal e pentadal (5 em 5 dias), é proposta. Este estudo objetiva a geração de mapas de Temperatura de Fronteira, *HotSpots* e de Índice de Aquecimento que identifique as áreas com potencial de estresse térmico e de branqueamento ao longo da costa Nordeste de Brasil.

2. Metodologia

Para este trabalho, foram utilizados dados mensais e pentadais (5 em 5 dias) de TSM da National Oceanographic Data Center/Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science (NODC/RSMAS) da versão 5 do *PathFinder Best SST* (PV5). O PV5 utiliza uma versão melhorada do algoritmo distribuído na versão anterior (PV4), com uma resolução espacial nominal de 4 km x 4 km. Esta resolução foi melhorada a partir do conjunto de dados originais do PV4, que apresentavam uma resolução de 9 km x 9 km. O aumento significativo da resolução espacial permite aplicar os dados do PV5 em áreas costeiras e em regiões com forte gradiente térmico superficial, como o caso da região do Complexo Recifal de Abrolhos e ao longo da plataforma continental nordeste brasileira.

O índice denominado de Temperatura de Fronteira (TF) é um valor limite acima do qual a comunidade biológica deve experimentar estresse térmico, e conseqüentemente, branqueamento (Marshall e Schuttenberg, 2006). De acordo com a literatura, a TF pode ser calculada de diferentes formas, de maneira a apontar regiões onde a TSM possa desencadear o processo de branqueamento através da perda da relação endossimbionte entre a microalga zooxantella e o coral (Glynn, 1991; Goreau & Hayes, 1994). Segundo observações de Goreau & Hayes (1994), Toscano et al. (1999) e Liu et al. (2005), a TF é simplesmente igual à máxima média mensal climatológica da TSM para uma dada região, sendo que as médias mensais climatológicas devem ser baseadas em no mínimo dez anos de dados. Este índice, que é fixo no tempo, mas que pode variar no espaço, foi construído para os cinco primeiros meses do ano (janeiro a maio), que correspondem ao período das maiores temperaturas de superfície observadas no hemisfério austral. Os mapas de TF foram construídos a partir de climatologias de TSM, com duas resoluções temporais: mensal e pentadal (5 em 5 dias) disponíveis no link http://data.nodc.noaa.gov/pathfinder/Version5.0_Climatologies para a geração dos mapas de máximos locais. Estes dois mapas de TF, ou máximos locais, foram utilizados como valores limites para a construção dos mapas de *HotSpots* e de Índice de Aquecimento Pentadal (IAP) para o período estudado.

As anomalias térmicas, que podem gerar estresse térmico, correspondem a valores de temperatura que estão logo acima dos valores de TF, enquanto que os *HotSpots* representam regiões cujos valores de TSM estão, no mínimo, 1°C acima dos valores da TF. Quando zonas de *HotSpots* coincidem com regiões de ocorrência de recifes de corais, dependendo da sua duração e intensidade, pode ocorrer branqueamento (Goreau & Hayes, 1994; Toscano et al., 1999; Liu et al., 2005). Os mapas de *HotSpots* propiciam a avaliação da intensidade do estresse térmico, mas não seu efeito prolongado. O efeito acumulativo dos *HotSpots* é quantificado a partir de um índice de estresse térmico chamado de “Índice de Aquecimento Pentadal (IAP)”. O IAP corresponde a integração espacial e temporal dos *HotSpots* dos últimos três meses. Este produto é equivalente aos mapas de grau de aquecimento semanal

(i.e., *Degrees of Heating Weeks - DHW*) utilizados pela NOAA-CRW (Goreau & Hayes, 1994;; Liu et al., 2003; MacClanaham, 2006). Para a construção dos mapas de IAP, apenas os valores iguais ou maiores que 1°C dos 18 mapas de *HotSpots* foram somados. O resultado foi multiplicado por 2/3 para que os mapas de IAP apresentassem valores correspondentes aos valores encontrados nos mapas de *DHW* (e.g. Liu et al., 2005).

3. Resultados e Discussão

Mapas de TF, gerados pelas duas diferentes climatologias, são apresentados na Figura 1. Ambos os mapas apresentam configurações semelhantes e intensidades relativas de TSM coerentes, sendo que as diferenças observadas entre estes dois mapas refletem, muito provavelmente, a média de séries temporais com resoluções temporais diferentes. Como era de se esperar, a TF baseada nas médias climatológicas mensais (TFmc - Figura.1, painel da esquerda) apresentou valores de TSM menores, enquanto que mapa de TF baseado nas pântadas climatológicas (TFpc - Figura1, painel da direita) apresentou valores levemente mais elevados.

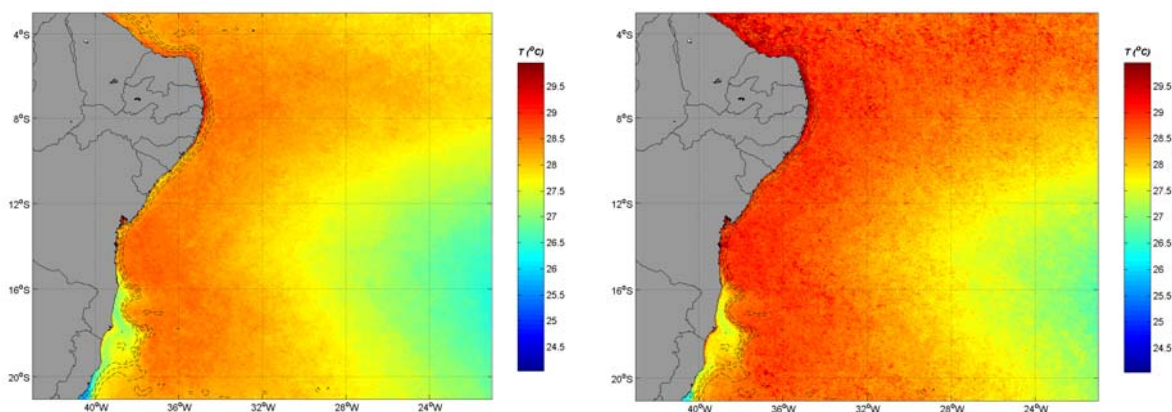


Figura 1: Mapas de temperatura de fronteira (TF) baseados nas médias climatológicas mensais (painel da esquerda) e pentadais (painel da direita). As linhas tracejadas indicam as isóbatas de 50 m, 200 m e 1000 m.

Em geral, os dois mapas de TF apresentam valores coerentes com os valores médios esperados para os meses de verão no Atlântico Tropical. As temperaturas variam entre os valores de 26°C a 30°C. Algumas características comuns aos dois mapas de TF são observadas e discutidas a seguir. Por exemplo, a configuração NE-SW de valores de TSM $\geq 28^\circ\text{C}$ estendendo-se até o Banco dos Abrolhos é bem marcada e presente nos atlas climatológicos para o Atlântico Tropical (e.g., COADS, NCEP, Reynolds OI-SST). Este padrão é resultado da circulação superficial de larga escala gerada pelo vento e responsável por transportar calor do equador em direção aos pólos.

O limite entre 10°S-15°S compreende a porção da divergência superficial e da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial que dá origem à Corrente do Brasil (Rodrigues et al., 2007). Ao norte do Banco dos Abrolhos, a Corrente do Brasil não é bem definida como uma corrente de jato com estrutura coerente típica de correntes de borda oeste. Este assunto é um tópico importante e é um dos objetivos do Projeto PRÓ-ABROLHOS.

Além disso, nota-se também a presença de valores de TSM $\leq 27^\circ\text{C}$ em duas regiões: (i) *offshore* a leste do meridiano de 28°W e ao sul do paralelo de 10°S na região de estudo, (ii) e *onshore* sobre a plataforma continental ao sul de 16°S (Figura 1). Na região *offshore*, estes valores de TSM correspondem à porção NW do giro subtropical do Atlântico Sul, com

temperaturas notavelmente menores que as temperaturas da região adjacente. O gradiente superficial térmico mais marcante dos mapas de TF está localizado ao sul de 16°S e a oeste de 36°W no alargamento da plataforma continental do sul da Bahia, na altura do Banco Royal Charllote e do Banco dos Abrolhos. Abaixo desta latitude até o paralelo de 23°S, a topografia é complexa. A extensão da plataforma é bem variável com uma largura de 35 km na sua porção norte, aumentando na direção sul nas proximidades do Banco de Royal Charlotte, onde atinge 110 km. Em seguida a plataforma se estreita (~ 45 km) para novamente se estender até 190 km na altura do BAS (Castro e Miranda, 1998). Acredita-se que estes valores locais de $TSM \leq 27^{\circ}C$ sejam decorrentes da dinâmica de Ekman local e da interação com a topografia local (Souza et al., 2007).

O aparecimento dos *HotSpots* é condicionado pela intensidade que os valores de TSM alcançam nas datas e regiões investigadas. Além disso, o surgimento dessas regiões aquecidas é amplamente dependente dos valores de TFs, sendo as regiões que apresentam menores valores de TFs as que, preferencialmente, poderão apresentar os maiores níveis de *HotSpots*. Desta forma, como era de se esperar, as regiões com os maiores níveis de *HotSpots* aparecem nos mapas gerados a partir das regiões com os menores TF, uma vez que são necessários menores valores de TSM para ultrapassar este limite térmico. A tabela abaixo evidencia este fenômeno: Banco dos Abrolhos apresenta menor temperatura de fronteira comparada com os outros sítios estudados, e os maiores níveis de *HotSpots* (Tabela 1). Nota-se que o mapa de TF baseado nas pântadas climatológicas apresentou valores superiores de TF.

Tabela 1- Valores das TFs, em °C, de alguns recifes do litoral baiano que apresentaram eventos de branqueamento, entre os anos de 2000 e 2005 (Leão et al., 2008). TFmc representa o mapa de temperatura de fronteira, TF, para as médias climatológicas mensais, enquanto o mapa TFpc foi construído com base nas pântadas climatológicas.

Recifes→ Mapas↓	L.N.	B.T.S.	T.B.	Cabrália	Itacolomis	Abrolhos
TFmc	28,5	28,5	28,5	28,3	28,2	28,2
TFpc	28,9	28,8	28,9	28,7	28,6	28,5

Os mapas de *HotSpots* do ano de 2003, calculados a partir dos mapa de temperatura de fronteira TF para as médias climatológicas mensais, o TFmc, e para as médias climatológicas das pântadas, o TFpc, são apresentados na Figura 2. Por questões de espaço, apenas um mapa de cada para o mês de março é apresentado dentre os 18 mapas gerados. O TFmc caracteriza altos níveis de *HotSpots* para a região do Banco Royal Charllote e do Banco dos Abrolhos sobre a plataforma (Figura 2, painel da esquerda). Além disso, nota-se, do mês de fevereiro até meados de março, a formação de *HotSpots* na porção sul dos mapas, especialmente a sudeste da área de estudo (não mostrados aqui). A partir do mês de março, à medida que esses *HotSpots* da porção sudeste se dissipam, novos *HotSpots* começam a se formar na região nordeste da área de estudo e ao longo da plataforma continental do norte da Bahia, Sergipe e Alagoas (não mostrados aqui). Esses *HotSpots* intensificaram-se até o início de abril, quando grande parte da plataforma continental dos estados da Bahia, Sergipe e Alagoas encontravam-se sobre os efeitos destas anomalias térmicas. Em meados de abril eles perdem força e começam a se dissipar. Nos mapas de *HotSpots* gerados a partir do mapa TFpc, apenas duas pequenas regiões anormalmente aquecidas foram detectadas no mês de março, uma na altura do Banco Royal Charllote e do Banco do Abrolhos, e outra mais a *offshore* na porção sudeste (Figura 2, painel da direita). Tais níveis inferiores de *HotSpots* devem-se às TFs mais elevadas do TFpc.

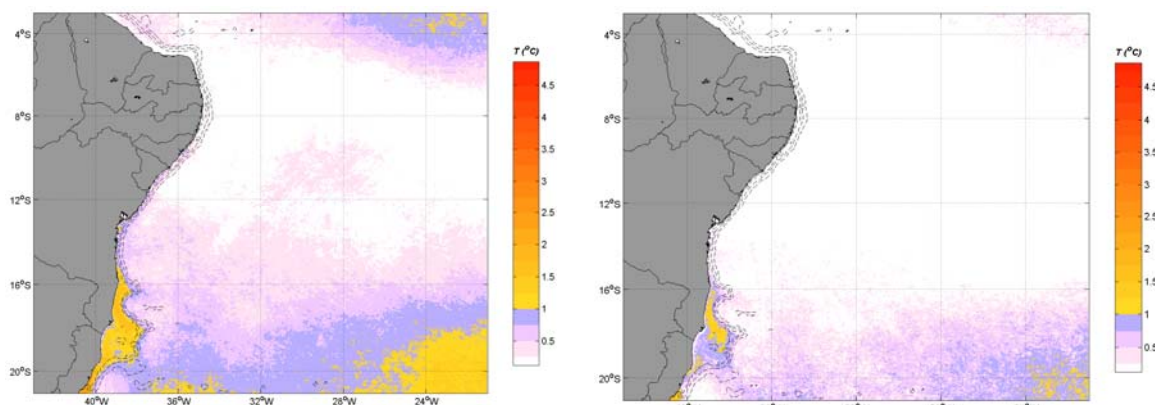


Figura 2: *HotSpots* correspondentes ao dia 02/03/03, calculados a partir dos mapas TFmc (painel da esquerda) e TFpc (painel da direita), respectivamente. As linhas tracejadas indicam as isóbatas de 50 m, 200 m e 1000 m.

O efeito acumulativo dos *HotSpots* foi mensurado a partir de um índice definido aqui como Índice de Aquecimento Pentadal (IAP). Este índice baseia-se na soma dos *HotSpots* dos últimos três meses, ou seja, 18 mapas de anomalias térmicas são somados para gerar um mapa único dos *HotSpots* acumulados em uma janela temporal de três meses. As somas dos 18 *HotSpots* referentes a cada um dos mapas de TFs utilizados gerou dois mapas de IAP. Os mapas de IAP são apresentados na Figura 3.

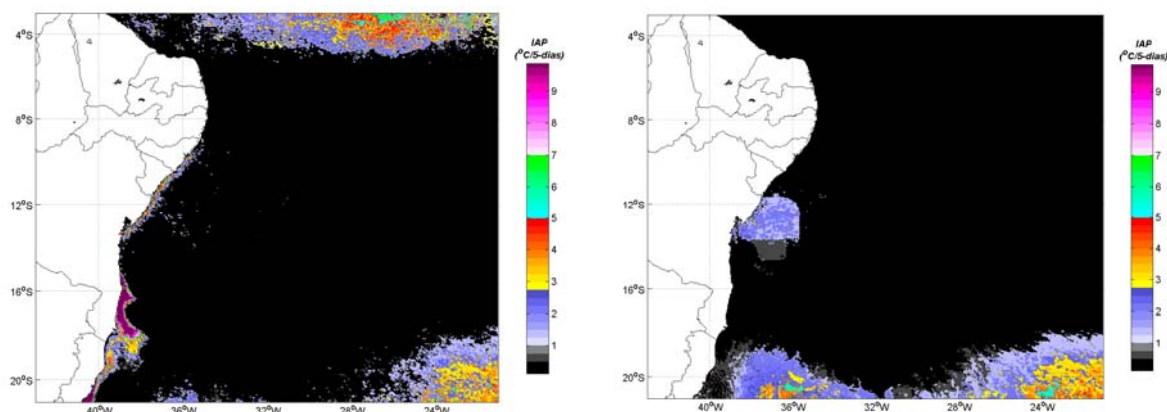


Figura 3: Mapas de Índice de Aquecimento correspondente à soma cumulativa dos *HotSpots* num período de 3 meses, decorrentes dos mapas de TFmc (painel da esquerda) e de TFpc (painel da direita), respectivamente. As linhas tracejadas indicam as isóbatas de 50 m, 200 m e 1000 m.

No mapa de IAP relativo à TFmc (Figura 3, painel da esquerda), os *HotSpots* se acumularam ao longo da plataforma continental dos estados de Alagoas, Sergipe, Bahia e Espírito Santo, gerando valores variados de IAP. Nota-se valores acima de 4°C localizados sobre o Banco Royal Charlote e Banco dos Abrolhos. Segundo observações de Liu et al. (2003), valores de *DHW* (índice de aquecimento semanal e análogo ao IAP usado aqui) que atingem os 4°C estão correlacionados com casos significativos de branqueamento. Já valores perto de 8°C correlacionam-se com uma distribuição mais ampla do branqueamento associada a alguma mortalidade de corais.

No caso do mapa de IAP relativo à TFpc (Figura 3, painel da direita), apenas no litoral sul da Bahia e Espírito Santo, as anomalias térmicas foram suficientemente fortes para gerar IAP's com valores próximos a 4°C. Correlacionando os valores de IAP, encontrados nos dois mapas, com os dados de branqueamento disponíveis na literatura para o mesmo ano, é possível estabelecer uma ligação mais coerente entre os eventos de branqueamento e os de aparecimento de *HotSpots*. Os valores de *HotSpots* e IAPs encontrados neste trabalho apresentam valores coerentes e típicos dos encontrados em outras regiões do globo.

4. Conclusões

Os mapas de TF baseados em dados de climatologia da NOAA/NESDIS apresentaram valores coerentes com os padrões esperados para a área de estudo. O método utilizado no presente trabalho mostrou-se eficiente na detecção de valores de TSM anormalmente elevados, i.e., valores acima da máxima média mensal para os meses de verão. As diferentes escalas temporais utilizadas na construção dos mapas de TFmc e TFpc geraram resultados distintos. O período monitorado apresentou níveis de anomalias térmicas coerentes com os encontrados na literatura.

Contudo, a avaliação da técnica de *HotSpots* para os dois métodos não pode ser amplamente comprovada diante da escassez de séries temporais de monitoramento dos eventos de branqueamento nos recifes de corais brasileiros. No Brasil, não existem órgãos ambientais ou instituições federais responsáveis pelo monitoramento consistente destes eventos. Os dados de branqueamento dos corais brasileiros são gerados por grupos de pesquisas independentes e temporalmente restritos a um período curto (e.g., dia a semana). Dados de branqueamento mais consistentes associados a séries temporais constantes de monitoramento do estado de saúde dos recifes de corais permitiriam avaliar mais precisamente a qualidade e a ocorrência de regiões de *HotSpots* e de branqueamento. Além disso, poderiam indicar se os mapas de TFs e de *HotSpots* devem ser gerados a partir de escalas de tempo mensal ou pentadal.

Em um futuro próximo, o desenvolvimento de um sistema de avaliação e monitoramento dos recifes de corais em tempo quase real permitirá a elaboração de um sistema de alerta para ações de caráter preventivo. Além disso, este modelo de avaliação, por utilizar dados globais disponibilizados pela NOAA/NESDIS via *internet*, poderá acusar a ocorrência de eventos de branqueamento em regiões onde não estejam sendo desenvolvidas pesquisas *in situ*.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos projetos BACANA (proc. No. 478398/2006-9) PRÓ-ABROLHOS (proc. No. 420219-2005-6).

Referências bibliográficas

Castro, C. B.; Pires, D. O., 1999 A bleaching event on an brazilian coral reef. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 47, p. 87-90.

Castro, B. M.; Miranda, L. B. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf Located Between 4°N and 34°S Coastal Segment (4, W). **In: The Sea**, v. 11, p. 209-251, 1998.

Glynn, P. W. Coral reef bleaching in the 1980s and possible connections with global warming. **Trends Ecol. Evol.**, v. 6., 1991, p. 175-179.

Goreau, T. J.; Hayes, R. L. Coral bleaching and ocean hot spots. **AMBIO**, v. 23, p. 176-180, 1994.

Kikuchi, R. K. P., Leão, Z. M. A. N., Testa, V., Dutra, L. X. C; Spano, S. Rapid assessment of Abrolhos reefs, eastern Brazil (Part 1: stony corals and algae). **Atoll Research Bulletin**, p. 172-188, 2003.

Leão, Z. M. A. N.; Kikuchi, R. K. P.; Testa, V. Corals and coral reefs of Brazil. **J. Latin American Coral Reefs**. Nova Iorque: Elsevier, p. 9- 52, 2003.

Leão, Z. M. A. N.; Kikuchi, R. K. P. **Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano**. 2008.

Liu, G.; Skirving W.; Strong A.E. Remote sensing of sea surface temperatures during 2002 Barrier Reef coral bleaching. **EOS**, 84(15), 137-144, 2003.

Liu G, Strong AE, Skirving W, Arzayus LF. Overview of NOAA coral reef watch program's near-real time satellite global coral bleaching monitoring activities. **In: Proc 10th Int Coral Reef Symp**, v. 1, p. 1783–1793, 2005.

MacClanaham T. R ; Ateweberhan M.; Ruiz Sebastia'n C.; Graham N. A. J.; Wilson S. K.; Bruggemann J. H.; Guillaume M. M. M.; Predictability of coral bleaching from synoptic satellite and in situ temperature observations. **Coral Reefs**, Note. 2007.

Marshall P., e Schuttenberg H. A Reef Manager's Guide to CORAL BLEACHING. **Great Barrier Reef Marine Park Authority**, 2006.

Rodrigues, R. R., L. M. Rothstein and M. Wimbush. Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. **Journal of Physical Oceanography**, vol. 37, p.16-30, 2007.

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. **In: Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto, 13. (SBSR)**, Florianópolis. p. 4735-4742 2007.

Strong A.E.; Gleeson M.W. Applying MCSST to coral reef bleaching. **Adv. Space Res.** 16(10): 151-154, 1995.

Toscano M. A., Strong A. E., and Guch I. C. New analyses for ocean *HotSpots* and coral reef bleaching, **Reef Encounters**, vol. 26, p. 31, 1999.