



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA MARINHA, COSTEIRA E SEDIMENTAR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PREVISÃO DO BRANQUEAMENTO DOS CORAIS NO
COMPLEXO RECIFAL DOS ABROLHOS-BA: UMA
ABORDAGEM BAYESIANA VISANDO SUPORTE À GESTÃO
AMBIENTAL

DANILO SILVA LISBOA

SALVADOR
MARÇO DE 2016

**PREVISÃO DO BRANQUEAMENTO DOS CORAIS NO
COMPLEXO RECIFAL DOS ABROLHOS-BA: UMA
ABORDAGEM BAYESIANA VISANDO SUPORTE À GESTÃO
AMBIENTAL**

Danilo Silva Lisboa

Orientador: Prof. Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar.

SALVADOR
MARÇO DE 2016

DANILO SILVA LISBOA

**PREVISÃO DO BRANQUEAMENTO DOS CORAIS NO
COMPLEXO RECIFAL DOS ABROLHOS-BA: UMA
ABORDAGEM BAYESIANA VISANDO SUPORTE À GESTÃO
AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Marinha Costeira e Sedimentar em 23/03/2016.

DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:

Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi
Orientador – PPPGG/UFBA

Dra. Zelinda Margarida de Andrade Nery Leão
Examinador Interno – PPPGG/UFBA

Dra. Lilia C. C. Costa
**Examinador Interno – Departamento de Estatística –
Instituto de Matemática/UFBA**

Salvador – BA
16 de março de 2016

À minha família.

RESUMO

Ao longo dos últimos anos, o processo conhecido como branqueamento dos corais tem sido um dos principais objetos de pesquisas relacionadas aos estudos climáticos nos ambientes marinhos. Devido à complexidade envolvida nestes fenômenos, sua previsão tornou-se um dos grandes desafios da comunidade científica empenhada em compreender os processos atuantes no ambiente recifal. Nesta pesquisa dados de monitoramento recifal do complexo recifal dos Abrolhos referentes a nove verões foram utilizados para construir e ensinar um modelo de previsão de branqueamento capaz de gerar prognósticos em termos de probabilidades de ocorrência de eventos extremos na região. O modelo proposto fundamentou-se em duas ideias principais extensivamente discutidas em periódicos relacionados ao tema: 1- o branqueamento dos corais é principalmente influenciado por anomalias térmicas positivas na água do mar; e 2- existe uma relação entre a intensidade do fenômeno El Niño e anomalias térmicas positivas na região do Atlântico Sul Ocidental. A abordagem Bayesiana proposta para a construção do modelo demonstrou ser adequada ao organizar hierarquicamente as variáveis locais e combiná-las com os indicadores do El Niño referentes ao inverno predecessor para gerar previsões de branqueamento com alguns meses de antecedência. Os resultados, fornecidos pela rede em termos de probabilidades condicionais, são calculados a partir da propagação da evidência através da estrutura da rede, segundo o teorema de *Bayes*. Durante a validação do modelo através do método *Leave one out*, demonstrou-se que a rede foi capaz de prever acertadamente todos os 28 (vinte e oito) casos com os quais foi ensinada. Quatro diferentes aplicações foram propostas para o modelo, demonstrando uma expressiva utilidade tanto de caráter prático, ao ser utilizado como ferramenta suporte durante as campanhas de campo, assim como na previsão para o verão de 2016, como de caráter teórico ao ser empregado para se realizar especulações a respeito do papel da turbidez durante os episódios de branqueamento. Outra aplicação de caráter teórico refere-se à previsão “passada” de eventos extremos para os verões dos anos de 2004 a 2009, quando não foram realizadas campanhas de campo. Além disso, uma última utilidade foi proposta ao usarmos os dados de entrada do modelo para construir mapas de probabilidade média de branqueamento passíveis de serem empregados como critério de seleção de áreas prioritárias para conservação ambiental na região do complexo recifal dos Abrolhos. Estes mapas indicam onde, segundo o modelo, os corais teriam melhores chances de sobrevivência frente à tendência atual de aumento gradativo na TSM e conseqüentemente na frequência e intensidade dos episódios de branqueamento. Portanto, o modelo apresentado nesta pesquisa alcançou seus objetivos ao demonstrar utilidade prática e teórica, além de apresentar-se consistente em suas previsões, representando, dessa maneira, uma ferramenta apta a conceder suporte à gestão ambiental na região do complexo recifal dos Abrolhos.

Palavras-chave: Previsão de branqueamento dos corais. Modelo de Rede Bayesiana. Complexo recifal dos Abrolhos.

ABSTRACT

Over the past few years, the process known as coral bleaching has been one of the main objects of research related to climate studies in marine environments. Due to the complexity involved in these phenomena, his prediction has become a major challenge for the scientific community committed to understanding the processes acting in the reef environment. In this research reef monitoring data of the Abrolhos reef complex referring to nine summers were used to construct and teach a bleaching prediction model capable of generating predictions in terms of probabilities of occurrence of extreme events in the region. The proposed model was based on two main ideas discussed extensively in journals related to the topic: 1- coral bleaching is mainly influenced by positive thermal anomalies in sea water; and 2- there is a relationship between the intensity of El Niño and positive temperature anomalies in the South West Atlantic region. The Bayesian approach proposed for the construction of the model was suitable to hierarchically organize the local variables and combine them with the El Niño indicators for the predecessor winter to generate bleaching predictions for a few months in future. The results provided by the network in terms of conditional probabilities are calculated from the spread of evidence through the network structure, according to the Bayes theorem. During the validation of the model by the method Leave One Out, it was demonstrated that the network was able to correctly predict all 28 (twenty eight) cases which have been taught. Four different applications have been proposed for the model, demonstrating an important utility of practical nature, to be used as a support tool during field campaigns, as well as the forecast for the summer of 2016. A theoretical character utility was demonstrated to perform speculation about the role of turbidity during episodes of bleaching. Another theoretical character application refers to the forecast "last" of extreme events for the summers of 2004 to 2009, when field campaigns were not carried out. Also, one last use was proposed in using the model input data to construct medium probability maps of susceptible to bleaching to be employed as a criterion for selection of priority areas for conservation in the reef complex region of the Abrolhos. These maps indicate where, according to the model, the corals would have better chances of survival facing the current trend of gradual increase in SST and consequently the frequency and intensity of bleaching episodes. Therefore, the model presented in this study achieved its objectives to demonstrate theoretical and practical utility, in addition to present consistent in their predictions, representing, thus, an apt tool to provide support to environmental management in the reef complex region of the Abrolhos.

Keywords: Forecast of coral bleaching. Bayesian Network Model. Abrolhos reef complex.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	7
CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1: PREVISÃO BAYESIANA PARA O BRANQUEAMENTO DOS CORAIS EM ABROLHOS – BA	18
2.1 INTRODUÇÃO.....	18
2.2 DADOS E MÉTODOS.....	19
2.2.1 Chapeirões do OASO.....	19
2.2.2 Índice de branqueamento.....	21
2.2.3 Dados numéricos utilizados para construção dos indicadores ambientais.....	22
2.2.4 Indicadores ambientais do modelo de previsão de branqueamento.....	22
2.2.5 Abordagem Bayesiana para previsão do branqueamento.....	24
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
2.3.1 Previsão do branqueamento nos Chapeirões de Abrolhos.....	30
2.3.2 Validação do modelo e análise de sensibilidade do branqueamento aos outros nós da rede.....	31
2.3.3 Testes de aplicabilidade do modelo.....	32
2.3.3.1 Previsão passada para os verões não monitorados.....	32
2.3.3.2 Previsão para o verão de 2016	33
2.3.3.3 O papel da turbidez no branqueamento dos corais.....	34
2.3.3.4 Áreas prioritárias para conservação ambiental.....	36
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS MÉTODOS DE TRABALHO DESENVOLVIDOS E TABELAS COM DADOS BRUTOS	46

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Este documento representa parte de um amplo estudo dedicado a elucidar as questões relacionadas à saúde dos recifes do litoral da Bahia em termos de vulnerabilidade à ocorrência do branqueamento dos corais. Apresentado como dissertação de mestrado do curso de pós-graduação em Geologia Marinha da Universidade Federal da Bahia, este documento foi organizado em três partes: o capítulo introdutório; o artigo a ser submetido em revista de cunho científico; e o capítulo de considerações finais.

Em linhas gerais, no capítulo introdutório ponderamos acerca das mudanças climáticas, sua estreita relação com o dióxido de carbono antropogênico e suas principais tendências no ambiente marinho. Sob a perspectiva dos recifes de corais, descrevemos os principais impactos associados a estas tendências, evidenciando as principais causas e consequências relacionadas ao branqueamento. Ainda neste capítulo, pontuamos acerca dos nossos objetivos, destacando as referências-chaves utilizadas na elaboração do artigo científico, cujo objetivo principal foi descrever as diversas etapas do desenvolvimento do modelo de previsão do branqueamento dos corais na região do complexo recifal dos Abrolhos. Por fim, no terceiro capítulo, são expostas as considerações finais e conclusões oriundas dos resultados encontrados no artigo científico.

Mudanças climáticas sob a perspectiva dos corais

Ao longo das últimas décadas, um considerável esforço de pesquisa tem sido dispendido para elucidar questões relacionadas ao clima, devido, principalmente, aos padrões de intensificação e aumento da frequência de fenômenos extremos observados em grande parte do planeta (Bright, 1997). A interação entre diversos fatores naturais e antrópicos produzem mecanismos de retroalimentação, por vezes ainda pouco entendidos pela comunidade científica, os quais

conduzem à atual depreciação da estabilidade climática do planeta (Solomon et al., 2007; Norris et al. 2013). Apesar de, ao longo do tempo geológico, o clima da Terra estar em constante oscilação, ressalta-se que o perigo vinculado às atuais mudanças climáticas está relacionado, principalmente, à velocidade, mas também à magnitude das mudanças impostas pelas ações antrópicas (Bright, 1997).

O análogo pretérito mais proeminente para o atual aumento do dióxido de carbono atmosférico aconteceu acerca de 55 Ma (Milhões de anos), caracterizado como o máximo termal do Paleoceno-Eoceno (Kennett e Stott, 1991). Durante este período uma grande quantidade de carbono inorgânico foi emitida para o sistema oceano/atmosfera, desencadeando uma série de consequências no clima da Terra (Zachos et al., 1993). Segundo estes autores, o efeito estufa bem acentuado favoreceu o aquecimento global médio de pelo menos 5°C em menos de 10.000 anos.

Para o Homem, a estabilização das condições de clima e do nível do mar, ocorrida após a última transgressão marinha, foi essencial no sentido de proporcionar as condições de estabilidade necessárias para o desenvolvimento da agricultura (nota de aula Geodinâmica costeira). Entretanto, a segunda revolução, ou revolução industrial, ocorrida mais recentemente há cerca de 250 anos, impôs um novo padrão de emissão de gases estufa oriundos da queima de combustíveis fósseis, trazendo implicações definitivas para o clima na Terra, e, provavelmente o fim dessa estabilidade que perdurou durante os últimos milhares de anos (Solomon et al., 2007). Segundo as pesquisas mais recentes a concentração atmosférica de CO_2 já alcançou os “fatídicos” 400 ppm, a mais alta dos últimos 800.000 anos, frente aos 280 ppm da era pré-industrial. Para muitos pesquisadores as rápidas e intensas alterações nos padrões climáticos representam um grande desafio para os organismos e ecossistemas, colocando em prova suas habilidades em se adaptar às novas condições (Norris et al., 2013).

No ambiente marinho, extensivas investigações nos últimos 30 anos realizadas por diferentes tipos de instrumentos em muitas regiões do globo tem alertado sobre duas principais tendências vinculadas à temática de mudanças climáticas: o aquecimento das águas superficiais e o processo de Acidificação dos Oceanos (AO) (Marshall e Schuttenberg, 2006; Cooley *et al.*, 2012), ambos, primordialmente influenciadas pelo aumento na concentração de CO_2 antropogênico na atmosfera. Segundo observações de Norris *et al.*, (2013), os múltiplos impactos associados a este incremento já estão condicionando alterações nos ecossistemas marinhos. Entre os ecossistemas mais afetados estão os recifes de corais, pois, além de viverem em ambientes próximos a seu limite superior de tolerância térmica, indicado por sua sensibilidade a pequenas variações na TSM (Brown, 1997; Marshall e Schuttenberg, 2006), também são ecossistemas cujo sucesso evolutivo está intimamente relacionado à habilidade de depositar grandes quantidades de carbonato de cálcio (Wood, 2001). Essas características ajudaram a garantir a sobrevivência das espécies de corais ao longo dos últimos 200 Ma, através de períodos glaciais e interglaciais. No entanto, diante do cenário atual de rápido aumento nas concentrações de CO_2 antropogênico, essas mesmas características parecem também desempenhar um papel chave em conferir a estes organismos a particularidade de bioindicadores de mudanças no clima.

Comumente chamado de "*The other CO_2 problem*" (Henderson, 2006; Doney *et al.*, 2009), o processo de AO representa um aumento progressivo da acidez da água do mar durante um certo período, normalmente de décadas ou mais, sendo primordialmente provocado pelo sequestro do CO_2 atmosférico (IPCC, 2011). Este processo traz significativas implicações para a comunidade biológica, pois diminui o estado de saturação dos principais minerais de carbonato de cálcio utilizados na construção de carapaças e esqueletos carbonáticos (Doney *et al.*, 2009; Cooley *et al.*, 2012). Diversas pesquisas que buscaram investigar as respostas biológicas chamam atenção para o fato de que a AO pode impactar significativamente alguns

dos processos biogeoquímicos marinhos mais importantes nas próximas décadas (Henderson, 2006). Para os dias atuais, de maneira geral, os organismos calcificadores apresentam reduções nas taxas de calcificação associadas a outras alterações deletérias (e.g. diminuição da maturidade sexual, crescimento atrofiado, mudança na fluatuabilidade) (Gattuso et al. 1998; Langdon et al. 2000; Riebesell et al. 2000; Zondervan et al., 2001, 2002; Gazeau *et al.*, 2007; Cooley *et al.*, 2012).

Em relação à tendência de aquecimento das águas superficiais, sob o ponto de vista dos corais, é indispensável considerar o fenômeno conhecido como branqueamento dos corais. Este processo resulta da exposição dos esqueletos calcários dos corais através dos seus tecidos que se encontram transparentes quando desprovidos de suas microalgas endossimbiontes (zooxantelas), ou, seus pigmentos, em casos menos frequentes (Brown, 1997). As colônias de corais podem alterar suas populações de zooxantelas de maneira gradual buscando estabelecer condições ótimas para o desenvolvimento da fotossíntese (Marshall e Schuttenberg, 2006). Entretanto, o término súbito dessa relação mutualística decorre da intervenção de algum fator estressante, principalmente relacionado às alterações nas condições físico-químicas da água do mar (Glynn e Dcroz, 1990; Glynn, 1993; Trench, 1979). As colônias branqueadas podem reaver suas populações de zooxantelas, caso as condições ambientais voltem ao normal (Trench, 1979; McClanahan *et al.*, 2007), entretanto o fenômeno de branqueamento desencadeia muitos efeitos deletérios, além de impor uma vulnerabilidade temporária a outros agentes impactantes (Brown, 1997). Destacam-se reduções nas taxas de fecundidade, capacidade de autolimpeza e resistência à competição e/ou predação, ou até mesmo a morte parcial ou total da colônia (Brown, 1997; Marshall e Schutenberg, 2006). Além disso, observações de Cantin *et al.* (2010) sugerem que os eventos de branqueamento, mais intensos e frequentes nas últimas décadas, são responsáveis pelo declínio nas taxas de crescimento e calcificação de várias espécies de corais hermatípicos.

Pesquisas dedicadas a investigar as possíveis razões que desencadeiam o processo de branqueamento revelam que os corais são mais sensíveis a algumas variáveis ambientais. O papel preponderante da temperatura da água do mar, ou seu indicador mais próximo, a TSM, na manutenção da saúde destes organismos é consenso entre os pesquisadores desta área (e.g. Glynn, 1993; Goreau e Hayes, 1994; Brown, 1997; Castro e Pires, 1999; Marshall e Schuttenberg, 2006; Leão *et al.*, 2008; Miranda *et al.*, 2010; Krug *et al.*, 2013). Segundo observações de Marshall e Schuttenberg (2006), um aumento na temperatura da água do mar pode levar a inibição do fluxo de energia para a fase escura da fotossíntese, comprometendo a eficiência do processo fotossintético, ou até mesmo estimular a produção de compostos químicos tóxicos (e.g. radicais de oxigênio), forçando os corais a expulsar suas microalgas endossimbiontes. Diversas pesquisas de campo e laboratoriais mostram que à medida que a temperatura atinge níveis acima da média histórica de verão a capacidade fotossintética das zooxantelas declina, podendo resultar no término da calcificação ou até mesmo resultar na mortalidade dos corais (e.g. Glynn, 1993; Goreau e Hayes, 1994; Brown, 1997).

Para Goreau e Hayes (1994), anomalias térmicas positivas de 1 °C, se persistirem por mais de uma semana, devem condicionar o branqueamento nos recifes onde elas ocorrem. Análises realizadas por Leão *et al.* (2008), Miranda *et al.* (2010), Krug (2013) em diversas áreas recifais brasileiras indicam o branqueamento como resposta à elevação anômala da TSM. Além disso, pesquisas laboratoriais que reproduziram condições de estresse térmico para espécies de corais do Brasil através de experimentos controlados em aquários também obtiveram o branqueamento como resposta imediata dos corais (Silva, 2008). Outros fatores como a fraca circulação de água, a diminuição de salinidade, o aumento de sedimentos em suspensão, a insuficiência de luz solar ou a exposição aérea durante a baixa-mar também conduzem os corais ao branqueamento (Glynn, 1993; Brown, 1997). Somado a isso, segundo Marshall e

Schuttenberg (2006), valores extremos em alguns parâmetros físicos da água do mar podem agir de forma combinada para causar o branqueamento.

Para McClanaham et al (2015), visto o caráter multifatorial, os parâmetros e efeitos associados a este fenômeno devem ser considerados de maneira conjunta, ao invés de analisados como variáveis independentes, buscando, dessa forma, contemplar a complexidade dos ecossistemas e das relações interespecíficas existentes nos ambientes naturais. Exemplos de tais abordagens multifatoriais foram desenvolvidas por Wooldridge e Done (2004) e Krug et al. (2013). Nestas pesquisas séries de *proxies* foram utilizadas para modelar as dependências do branqueamento através de redes Bayesianas. Em ambas as pesquisas, desenvolvidas nos litorais da Austrália e do estado da Bahia, respectivamente, as redes Bayesianas propostas obtiveram taxas de acerto superiores a 70%, comprovando a abordagem Bayesiana como poderosa ferramenta para o prognóstico do branqueamento e/ou mortalidade dos corais.

Definidas como grafos acíclicos de probabilidade condicional, estas redes podem ser entendidas como diagramas de influência que organizam determinadas fatores ou variáveis em uma estrutura acíclica, que, dadas as evidências disponíveis, calcula a probabilidade condicional de um evento a partir da aplicação do teorema de Bayes (Cheng *et al.*, 2002; Neapolitan, 2004; Krug *et al.*, 2013). Uma rede Bayesiana configura-se, portanto, como uma diagramação icônica de influência entre variáveis, semelhante a um dendograma, onde cada nó representa o domínio da variável, e os arcos entre nós representam as dependências probabilísticas entre as variáveis conectadas (Cheng *et al.*, 2002; Neapolitan, 2004).

Nesta pesquisa pretendeu-se contribuir para o estado atual de conhecimento acerca das relações existentes entre diversas variáveis ambientais, e o fenômeno de branqueamento dos corais nos chapeirões do ATS. A partir dos dados de campo, obtidos através do protocolo AGRRA (*Atlantic and Gulf Rapid Assessment*; Ginsburg *et al.*, 1998) em nove verões durante o intervalo de 2000 a 2014, buscou-se estabelecer relações de causa e efeito entre diversos

índices relacionados às condições físicas da água do mar e o grau de severidade dos eventos de branqueamento observados neste período. Em uma segunda etapa pretendeu-se utilizar tais relações para derivar a estrutura de modelo gráfico probabilístico capaz de incorporar informações relativas a diversos parâmetros em suas previsões, ou seja, um modelo de Rede Bayesiana.

A aplicabilidade do modelo elaborado foi inicialmente testada para estimar a ocorrência do branqueamento para verões passados, dos quais não temos os dados de campo, e para o verão de 2016. Além disso, o modelo foi utilizado para realizar especulações acerca do papel da turbidez durante os períodos de branqueamento. Por fim, os dados de entrada do modelo, relativos a todo o período de estudo, foram utilizados para derivar mapas de probabilidades médias de branqueamento. Tais mapas podem ser utilizados como critério de seleção de áreas prioritárias para conservação ambiental ao apontar os recifes menos propensos ao desenvolvimento de condições desencadeadoras do processo de branqueamento.

Portanto, o objetivo principal desta pesquisa configurou-se como a elaboração de um modelo preditivo, baseado em um conjunto eclético de parâmetros oceanográficos e atmosféricos, capaz de fornecer prognósticos acerca da ocorrência e severidade do branqueamento dos corais na região do complexo recifal dos Abrolhos. Nosso propósito aqui também remeteu à construção de uma ferramenta que utilize variados índices relacionáveis ao branqueamento para dar suporte à gestão ambiental dos recifes da Bahia, através da indicação de onde e quando as condições ambientais devem disparar o branqueamento nos corais. Através de uma organização hierárquica entre variáveis locais e globais na estrutura do modelo pretendeu-se desenvolver uma ferramenta capaz de fornecer prognósticos com certo grau de antecedência, proporcionando tempo hábil para o planejamento e execução das campanhas de campo.

Por fim, é significativo mencionar que a elucidação de questões relacionadas ao branqueamento dos corais é de extrema relevância para a tentativa de garantir a sobrevivência

dos ecossistemas recifais do Oceano Atlântico Sul Ocidental frente às crescentes ameaças de elevação da temperatura da acidez da água do mar.

REFERÊNCIAS

Bright C., 1997. Tracking the ecology and climate change. In: STARKE, L., (ed.) State of the world – a worldwatch institute report on progress toward a sustainable society. London: Norton, W.W., p. 78-94.

Brown B. E., 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*, v. 16, p. 129-138.

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

Cantin N. E., Cohen A. L., Kamauskas K. B., Tarrant A. M., McCorkle D. C. 2010. Ocean Warming Slows Coral Growth in the Central Red Sea. *Science* Vol. 329:322-325

Cheng J., Griener R., Kelly J., Bell D., Liu W., 2002. Learning Bayesian networks from data: an information-theory based approach. *Artif. Intell.* 137, 43e90.

Cooley S., Mathis J., Yates K, and Turley C. 2012. Frequently Asked Questions about Ocean Acidification. U.S. Ocean Carbon and Biogeochemistry Program and the UK Ocean Acidification Research Programme. Version 2.

Doney, S. C.; Fabry, V. J.; Feely, R. A.; Kleypas J. A., 2009. Ocean Acidification: The Other CO_2 Problem. *Annu. Rev. Marine. Sci.* 1:169-192.

Gattuso J. P., Frankignoulle M, Bourge I, Romaine S, Buddemeier R. W. 1998. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Glob. Planet. Chang.* 18:37–46

Gazeau F, Quiblier C, Jansen J. M., Gattuso J-P., Middelburg J. J., Heip C. H. R. 2007. Impact of elevated CO_2 on shellfish calcification. *Geophys. Res. Lett* 34:L07603

Ginsburg R.N., Kramer P.A., Lang J.C., Sale P., 1998. AGRRA, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. Disponível *online* em: <http://agrra.org> (acessado em 17/08/15).

Glynn P. W.; D'croz L. 1990. Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Niño coincident coral mortality. *Coral Reefs*, v.8, p. 181-191.

Glynn P. W., 1993. Coral reef bleaching ecological perspectives. *Coral Reefs* 12, p. 1-17.

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

Henderson C., 2006 Ocean acidification: the other CO_2 problem, *New Scientist*, 8.

IPCC, 2011: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp

Kennett J. P., Stott L. D. 1991. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene. *Nature* 353:225–29

Krug L. A., Gherardi D. F. M., Stech J. L., Leão Z. M. A. N., Kikuchi R. K. P., Junior E. R. H., Suggett D. J. 2013. The construction of causal network to estimate coral bleaching intensity. *Environmental Modelling & Software*: 42, 157-167.

Langdon C., Takahashi T., Sweeney C., Chipman D., Goddard J., 2000. Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef. *Glob. Biogeochem. Cycles* 14:639–54

Leão Z. M. A. N., Kikuchi R. K. P., Oliveira M. D. M. 2008. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. *Biota Neotrop.* V.8, n. 3,

Marshall P.; Schuttenberg H., 2006. A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching. Published by: Great Barrier Reef Marine Park Authority, p. 178.

McClanahan T. R.; Ateweberhan M.; Ruiz Sebastián C.; Graham N. A. J.; Wilson S. K.; Bruggemann J. H.; Guillaume M. M. M. 2007. Predictability of coral bleaching from synoptic satellite and in situ temperature observations. *Coral Reefs* DOI v.3, p. 338-346.

McClanahan T. R., Maina J., Ateweberhan M. 2015. Regional coral responses to climate disturbances and warming is predicted by multivariate stress model and not temperature threshold metrics. *Climatic Change*, 1-14, April 19 2015.

Miranda, R. J., Cruz, I. C. S., Leão, Z. M. A. N., 2010. Coral bleaching in the Caramuanas reef (Todos os Santos Bay, Brazil) during the 2010 El Niño event. *Latin American Journal of Aquatic Research*

Neapolitan R.E., 2004. Learning Bayesian Networks. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Norris R. D., Kirtland S. T., Hull, P. M. e Ridgwell A., 2013 Marine ecosystem responses to cenozoic global change, *Science*, 492.

Riebesell U., Zondervan I., Rost B., Tortell P. D., Zeebe R. E., Morel F. M. M. 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO_2 . *Nature* 407:364–67

Silva M. M. 2008. Avaliação do efeito do aumento da temperatura da água sobre a espécie endêmica de coral *Siderastrea stellata* Verrill, 1868 observado em aquário. Monografia de graduação. Salvador: UniJorge. 56 p.

Solomon S., Qin, D., Manning, M. Chen, Z. e Marquis, M. 2007. Climate change, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1.

Trench R. K., 1979. The cell biology of plant-animal symbiosis. *Annual Reviews of Plant Physiology* 30, 485-511.

Wood R., 2001. Reef evolution, Oxford Univ. Press., 1.

Wooldridge S., Done, T., 2004. Learning to predict large-scale coral bleaching from past events: a Bayesian approach using remotely sensed data, in-situ data, and environmental proxies. *Coral Reefs* 23, 96e108.

Zachos J. C, Rohl U, Schellenberg S. A., Sluijs A., Hodell D. A. 2005. Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Science* 308:1611–15

Zondervan I., Zeebe R.E., Rost B., Riebesell U. 2001. Decreasing marine biogenic calcification: A negative feedback on rising atmospheric $p\text{CO}_2$. *Glob. Biogeochem. Cycles* 15:507–16

Zondervan I., Rost B., Riebesell U., 2002. Effect of CO_2 concentration on the PIC/POC ratio in the coccolithophore *Emiliana huxleyi* grown under light-limiting conditions and different daylengths. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 272:55–70

CAPÍTULO 2

ARTIGO – PREVISÃO BAYESIANA PARA O BRANQUEAMENTO DOS CORAIS EM ABROLHOS - BA

2.1 INTRODUÇÃO

Os corais são essencialmente vulneráveis a dois principais processos marinhos cujas razões estão intimamente vinculadas ao aumento de CO₂ antropogênico na atmosfera: a Acidificação dos Oceanos (AO); e o aquecimento gradativo de suas águas superficiais. À medida que a AO pode levar a uma redução drástica das taxas de calcificação, ou mesmo conduzir à dissolução completa dos seus esqueletos carbonáticos (Henderson, 2006; Cooley *et al.*, 2012), o aquecimento anormal da água deteriora a relação de endossimbiose entre os corais e suas zooxantelas, através do desencadeamento do processo de branqueamento (Brown, 1997). Observações de Cantin *et al.* (2010) sugerem que nas próximas décadas os impactos associados aos eventos de branqueamento, cada vez mais frequentes, devem condicionar mortalidade dos corais antes mesmo das taxas de calcificação se aproximarem de zero. Previsões de Norris *et al.* (2013) indicam que as consequências associadas ao aumento de CO₂ antropogênico devem causar elevação do nível e da temperatura do mar, acidificação, estratificação e hipóxia, conduzindo os ecossistemas marinhos a um estado de constante mudança pelos próximos 100.000 anos. Para estes autores, os impactos mais severos associados a este cenário devem ser primeiramente observados nos ecossistemas recifais.

Diante de perspectivas tão desencorajadoras para os recifes de corais, ressaltam-se os esforços de pesquisas dedicadas à modelagem da saúde desses ambientes, especialmente os relacionados à previsão em termos de ocorrência do branqueamento dos corais. Para os ecossistemas recifais do Oceano Atlântico Sul Ocidental (OASO) dados relativos ao branqueamento sugerem episódios menos intensos quando comparados aos eventos reportados para os recifes do Caribe, ou Indo-Pacífico (e.g. Brown *et al.*, 1996; Berkelmans *et al.*, 2004; Strong *et al.*, 2006; Leão *et al.*, 2008; Miranda *et al.*, 2010;). O elevado grau de endemismo, a relativa baixa biodiversidade e o formato de crescimento semelhante a grandes cogumelos conferem características bastante peculiares às maiores construções recifais do OASO, os grandes Chapeirões (Leão e Kikuchi, 2000). As singularidades destes recifes em conjunto com características da constituição genéticas das algas simbióticas adicionam níveis de complexidade das respostas fisiológicas às forçantes ambientais nesta região.

Apesar disso, já sabemos atualmente que o branqueamento responde, de maneira primordial, aos efeitos da elevação na temperatura da água (Brown, 1997). Outros fatores (e.g. fraca circulação de água, diminuição de salinidade, aumento de sedimentos em suspensão, insuficiência de luz solar, exposição aérea durante a baixa-mar) cujas funções não estão ainda totalmente elucidadas podem potencializar os efeitos deletérios para os corais (Marshall e Schutenberg, 2006). Outra imprescindível questão refere-se ao estreito relacionamento do fenômeno climático El Niño com a ocorrência de anomalias positivas na Temperatura da

Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico. Segundo dados de Lanzante (1996), Klein et al. (1999), Lentini et al (2001) e Soppa (2007) esta relação ocorre de maneira mais pronunciada com defasagem temporal de 5 a 15 meses, o que sugere que o fenômeno El Niño exerce um efeito remoto sobre o branqueamento através de uma tele conexão com anomalias na TSM. Este conjunto de ideias, amplamente discutido em periódicos relacionados ao tema, foi explorado nesta pesquisa para derivar diversos índices representativos das condições ambientais durante os períodos de monitoramento recifal, buscando assinalar a conjuntura de circunstâncias favoráveis ao desenvolvimento do branqueamento dos corais na região dos grandes Chapeirões.

Nesta altura, ressalta-se uma importante questão a ser respondida: é possível utilizar as relações de dependência entre estas diversas observações para aprender a estrutura de um modelo capaz de incorporar informações variadas em prognósticos a respeito do branqueamento? Nesse sentido, a abordagem através da utilização de redes Bayesianas demonstra-se ideal, visto sua capacidade em descrever probabilisticamente fenômenos cujas funções não são completamente entendidas (Charniak, 1991). Além disso, a representação gráfica, proporcionada pela estrutura da rede, possibilita uma organização hierárquica dos indicadores ambientais baseada em seus níveis de influência sobre o branqueamento (Wooldridge e Done, 2004).

Sendo assim, a presente pesquisa pretende utilizar as relações entre diversos indicadores ambientais para derivar a estrutura de um modelo de previsão capaz de indicar quando as condições da água do mar serão favoráveis ao desencadeamento do branqueamento dos corais na região do complexo recifal dos Abrolhos. Buscou-se a elaboração de um modelo de Rede Bayesiana capaz de prover prognósticos com certo grau de antecedência, proporcionando tempo hábil à gestão ambiental para planejamento e execução das campanhas de campo durante os períodos potencialmente mais perigosos para os corais. A finalidade deste artigo é, portanto, descrever como utilizamos indicadores ambientais derivados de dados remotos para monitorar as condições térmicas da água suficientes para disparar e intensificar o branqueamento de categoria “Forte” (a ser explicado). Além disso, pretendemos evidenciar como a abordagem Bayesiana demonstrou-se adequada ao aproveitar as informações referentes a estes indicadores térmicos e combiná-las com dados relacionados à intensidade do fenômeno El Niño para estimar, com certa antecedência, a probabilidade de ocorrência do branqueamento nos Chapeirões do OASO.

2.2 DADOS E MÉTODOS

2.2.1 Chapeirões do OASO

A região de estudo refere-se ao complexo recifal dos Abrolhos (figura 1). Situada sobre um alargamento plataformal do sul do estado da Bahia, esta área é composta por parcéis coralíneos, ilhas vulcânicas, bancos e canais distribuídos ao longo de mais de 6000 km² (Leão e Kikuchi, 2000). Nesta região as colônias de corais encontraram condições necessárias para se desenvolverem ao longo dos últimos milhares de anos, em estruturas de dimensões variáveis, cujo formato assemelha-se a grandes cogumelos (Leão e Kikuchi, 1999). Este formato singular de crescimento confere o nome de chapeirões a estes recifes, que ainda caracterizam-se como as maiores e mais diversas construções coralíneas do OASO (Leão e

Kikuchi, 2000). Estes chapeirões estão distribuídos ao longo dos arcos interno e externo do complexo recifal dos Abrolhos. No arco interno estas construções coalesceram em extensos bancos recifais, normalmente cercados por chapeirões isolados, que estão dispostos paralelos à linha de costa em distâncias entre 10 e 20 km, estendendo-se de Norte para o Sul, por mais de 100 km (Kikuchi et al., 2010). No Parcel dos Abrolhos, situado no arco externo a 80 km da costa, os chapeirões isolados gigantes, maiores de 50 metros de diâmetro, são encontrados em uma grande área a leste do arquipélago dos Abrolhos, em profundidades superiores a 20 m. (Kikuchi et al., 2010).

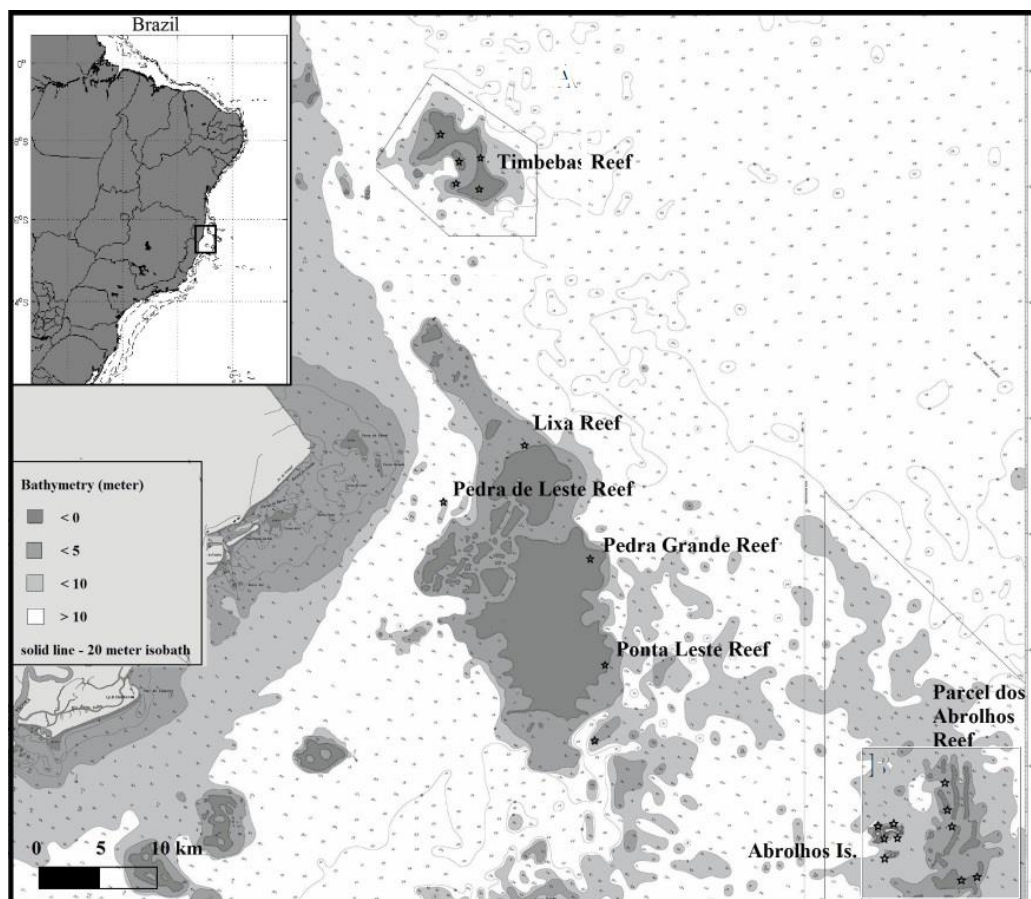


Figura 1 – Localização da região de estudo. O complexo recifal dos Abrolhos pode ser dividido em: Arco interno, cujos recifes encontram-se *inshore* em relação ao Canal do Abrolhos; e Arco Externo, constituído pelo arquipélago e parcel dos Abrolhos à *offshore* do Canal. Os tons de cinza indicam a batimetria da área e os pentagramas as posições exatas das estações recifais de aplicação do protocolo AGRRA as quais foram utilizadas para seleção dos dados deste trabalho.

Oceanograficamente, a área de estudo é definida dentro da região sob influência da Corrente do Brasil (CB 4 Sv), possuindo uma variação sazonal na intensidade do transporte proveniente da variação meridional dos Alísios (Peterson e Stramma, 1991). A CB integra o giro subtropical do Atlântico Sul (Peterson e Stramma, 1991), sendo formada pelo empilhamento de massas d'águas, destacando-se entre elas a Água Tropical (AT), caracterizada por temperaturas maiores que 20°C e salinidades acima de 36 ups (Cirano et al., 2006). A precipitação média anual está em torno de 2000 mm/ano, direções mais significantes dos ventos concentradas no

quadrante NE-SE que induzem regimes de ondas com períodos médios entre 5 e 6.5 segundos e alturas entre 1 e 1,7 m. (Lentini *et al.*, 2001). Segundo classificação proposta por Davies (1980), esta região pode ser enquadrada dentro do regime de micro-marés (≤ 2 m).

2.2.2 Índice de Branqueamento (IB)

Os dados de branqueamento de corais utilizados nesta pesquisa resultaram do monitoramento intermitente durante o período de 2000 a 2014 em 25 sítios de coleta distribuídos ao longo dos arcos interno e externo da região de Abrolhos. Estas subestações foram agrupadas em quatro estações de acordo com suas localizações geográficas: Recife das Timbebas, Recife do Lixa, Parcel das Paredes e Parcel dos Abrolhos (os dados referentes ao arquipélago não foram empregados nesta pesquisa). Para o cálculo do IB foram utilizados dados de número de colônias e suas respectivas áreas branqueadas, obtidos a partir da aplicação do protocolo AGRRA (*Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment*; ver Ginsburg *et al.*, 1998), segundo a equação:

$$IB = A * B^* + 2 * C * D^* \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

A = % de colônias com branqueamento de intensidade “Fraca”

B* = área média com branqueamento de intensidade “Fraca” (entre valores não nulos)

C = % de colônias com branqueamento de intensidade “Forte”

D* = área média com branqueamento de intensidade “Forte” (entre valores não nulos)

Portanto, o IB pode apresentar valores entre zero, onde todas as colônias estão completamente saudáveis e livres do branqueamento, e 20000 pontos que representa o limite máximo, onde teoricamente 100% das colônias estariam completamente branqueadas (com branqueamento de categoria “Forte”).

É conveniente considerar que segundo o protocolo AGRRA (ver Ginsburg *et al.*, 1998), diferencia-se o branqueamento de intensidade “Forte”, onde a superfície da colônia apresenta-se totalmente ou parcialmente branca, do branqueamento de intensidade “Fraca”, onde a colônia apresenta-se com coloração pálida. Isto introduz um nível de subjetividade ao dado que, em conjunto com o grande número de amostradores envolvidos nas campanhas de campo, nos levou a desenvolver uma avaliação criteriosa, levando em consideração apenas os dados dos transectos cujos valores de porcentagem de colônias branqueadas encontravam-se dentro do intervalo de confiança de 95%. Ou seja, transectos da mesma estação que apresentaram dados fora deste intervalo foram desconsiderados para efeito de cálculo do índice de branqueamento.

2.2.3 Dados numéricos utilizados para construção dos indicadores ambientais

Dados de diferentes atributos e origens foram utilizados para obtenção dos indicadores ambientais considerados nesta pesquisa. Para facilitar sua descrição, as características destes dados foram resumidas na tabela 1.

Tabela 1 - Dados ambientais que derivaram os índices utilizados na construção do modelo de previsão do branqueamento.

Índice relacionável ao IB	Variável ambiental	Origem	Resolução espacial	Resolução/intervalo temporal
MaxTSM5Ac	TSM	OSTIA*	~5km	Diária / 2000-2015
GAT	TSM	OSTIA	~5km	Diária / 2000-2015
KD ATN	Kd490*	SEAWIFS*/ MODIS*	~4km ~4km	Semanal / 2000-2010/ 2002-2014
TSM ATP Inv	TSM	OSTIA	~5km	Diária / 1985-2015
ONI*	TSM	CPC*- NOAA*	-	Mensal / 2000-2015
MEI*	Multivariável	ESRL*- NOAA*	-	Mensal / 2000-2015

*OSTIA (*Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis*)

*SEAWIFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*);

*MODIS (*Moderate Imaging Spectroradiometer*);

*ONI (*Oceanic Niño Index*);

*MEI (*Multivariate El Niño Index*);

*CPC (*Climate Prediction Center*);

*NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*);

*ESRL (*Earth System Research Laboratory*);

*Kd490 (Coeficiente de Atenuação da Luz)

Para a construção do indicador de turbidez da água foram utilizados dados oriundos dos sensores MODIS e SEAWIFS. Visando minimizar a disparidade entre estes sensores, o período de disponibilidade dos dados de ambos os sensores (2002 a 2010) foi utilizado para calibrar os dados SEAWIFS a partir de uma equação obtida pelo método de mínimos quadrados (Apêndice A).

2.2.4 Indicadores ambientais do modelo de previsão de branqueamento

Os índices relacionáveis ao branqueamento foram calculados de maneira a contemplar as condições atuantes durante o período do monitoramento recifal, e referente aos três meses imediatamente anteriores, denominadas de Anomalias Trimestrais Positivas (ATP) ou Negativas (ATN). Além disso, buscando estabelecer relações de dependência sazonal entre as variáveis, foram calculadas médias relativas ao verão e ao inverno predecessor.

Em relação ao ambiente termal, é relevante considerar que índices baseados em um limiar de temperatura são amplamente utilizados pela comunidade científica para prever os recifes onde as anomalias térmicas devem ser capazes de causar branqueamento dos corais (e.g. Goreau e Haey, 1994; Strong *et al.*, 2006). A Temperatura de Fronteira (TF), apesar de calculada de distintas formas, representa o limite térmico acima do qual a comunidade biológica enfrenta

efeitos do estresse térmico. Nesta pesquisa, dados mensais de TSM para os anos de 1985 a 2005 (excluindo-se os anos de 1992 e 1993 devido à erupção do Monte Pinatubo, e os anos excepcionalmente quentes de 1988, 1989 e 1998) foram utilizados para o cálculo da climatologia, de onde foram extraídos os máximos valores para gerar o mapa de TF. À medida que a TSM atinge valores acima da TF, a capacidade fotossintética das zooxantelas endossimbiontes declina (Marshall e Schuttemberg, 2006), assinalando as regiões momentaneamente aquecidas conhecidas como *Hotspots* (Goreau e Hayes, 1994). O efeito prolongado dessas anomalias foi contemplado, nesta pesquisa, através do Grau de Aquecimento Trimestral (GAT), que resulta do somatório dos *Hotspots* em uma janela temporal de três meses (Equação 2). É pertinente ponderar que o GAT foi desenvolvido levando-se em consideração os métodos propostos por Strong et al (1997) (índice conhecido como DHW do inglês *Degree Heating Weeks*). Em essência, o GAT difere do DHW por apreciar uma TF particular, por considerar para efeito de cálculo todos os *Hotspots* acima da TF, ao invés de apenas os *Hotspots* maiores ou iguais a 1°C, e por derivar de dados diários.

Outro índice térmico, cuja relação com o branqueamento foi anteriormente assinalada em Berkelmans et al. (2004) e Krug et al (2013) refere-se a TSMs acumuladas em um intervalo de alguns dias. Este índice é calculado de maneira a representar o montante de calor necessário para desencadear, inicialmente, o fenômeno de branqueamento em níveis potencialmente perigosos para os corais. Nesta pesquisa, a TSM de cinco dias consecutivos foram somadas gerando o índice TSM5Ac. As séries destes índices foram utilizadas para extração dos máximos valores de verão, buscando capturar o alcance das elevadas anomalias de curta duração (Equação 3).

Para contemplar as condições de turbidez da água durante os períodos de branqueamento foi calculado o índice KD ATN, calculado a partir da soma dos valores negativos que resultam da diferença entre o dado semanal e a climatologia mensal de turbidez (2002 a 2014); (Equação 4).

$$GAT = \sum_n^{n-89} TSM_n - TF \quad \text{Equação 2}$$

$$MaxTSM5ac = Max \sum_n^{n-4} TSM_n \quad \text{Equação 3}$$

$$KD ATN = \sum_n^{n-11} Kd490 - Clim(Kd490) \quad \text{Equação 4}$$

$$TSM ATP Inv = \sum_n^{n-89} TSM_n - Clim(TSM) \quad \text{Equação 5}$$

Além dos dados relativos aos parâmetros oceanográficos, Índices associados ao fenômeno El Niño também foram utilizados para testar suas relações com o branqueamento dos corais nos chapeirões. Relações entre o fenômeno El Niño, anomalias positivas da TSM, e consequentemente, episódios de branqueamento foram anteriormente assinaladas em diversos recifes dos três grandes oceanos para os anos de 1982-1983, 1997-1998, 2002-2003, 2005 e 2010 (Glynn. 1984; Bruno et al 2001; Wilkinson 2008; Leão et al., 2008; Miranda et al., 2010). Os índices MEI (*Multivariate El Niño Index* para detalhes ver Wolter e Timlin, 1993) e ONI

(*Oceanic Niño Index* para detalhes ver Hoerling e Kumar, 2000) são utilizados para monitorar a ocorrência do El Niño a partir de observações de parâmetros relativos a regiões do Oceano Pacífico tropical. Por se tratar de um fenômeno remoto em relação às águas do OASO, estes índices foram utilizados nesta pesquisa com uma defasagem temporal de 7 a 8 meses respectivamente, de acordo com as maiores correlações com dados de TSM da região de estudo (para detalhes ver Soppa, 2007).

2.2.5 Abordagem bayesiana para previsão do branqueamento

De maneira geral, as redes Bayesianas podem ser definidas como diagramas acíclicos de influência que calculam a probabilidade condicional de um evento, a partir das observações disponíveis (Cheng *et al.*, 2002, Neapolitan, 2004). Nestes diagramas orientados cada nó representa o domínio de uma variável, e os arcos representam as relações de dependência probabilística entre os nós conectados. A utilização destas redes para a modelagem do branqueamento (e mortalidade) dos corais foi anteriormente proposta por Wooldridge e Done (2004) e Krug *et al.* (2013). Nestas pesquisas, desenvolvidas nos litorais da Austrália e do Brasil, respectivamente, séries de proxies foram utilizadas para modelar as dependências do branqueamento através de redes Bayesianas, obtendo taxas de acerto superiores a 70%. A capacidade de lidar com diferentes tipos de dados e representar as relações de dependência entre eles através de uma estrutura gráfica conferem características ideais às redes Bayesianas para o emprego do prognóstico do branqueamento. Além disso, esta abordagem permite lidar com incertezas e complexidades inerentes a estes fenômenos, através da propagação da evidência pela estrutura da rede segundo teorema de Bayes, fornecendo resultados em termos de probabilidades condicionadas às observações disponíveis (Cheng *et al.*, 2002).

Nesta pesquisa, para a construção do modelo da rede foram utilizados algoritmos que se baseiam em análises de dependência a partir do fluxo de informação entre os indicadores ambientais investigados (descritos anteriormente). Ou seja, se existe uma relação de dependência direta entre duas variáveis, dadas as observações disponíveis, o algoritmo estabelece um arco de ligação entre elas, e mede a intensidade dessa ligação. Os valores numéricos destes indicadores (Apêndice A - tabela 6) foram discretizados em três intervalos mutuamente exclusivos de acordo com sua frequência, ou comprimento (tabela 2), através da ferramenta *Pre Processor* do *software Belief Network Power Constructor* (BNPC). Os nomes foram atribuídos às classes das variáveis apenas para efeito comparativo entre os dados de entrada do modelo, sem, necessariamente ter relação com os históricos dos fenômenos.

O BNPC também foi utilizado para aprendizado da estrutura da rede a partir das observações disponíveis, inicialmente, sem a inserção do conhecimento prévio de domínio do usuário, buscando estabelecer uma estrutura indicativa das relações de dependência probabilística dentro do conjunto de variáveis (Cheng *et al.*, 2002). À medida que os testes de Independência Condicional prosseguiram, as variáveis que apresentaram as menores influências sobre o branqueamento (maiores distâncias) foram sendo gradativamente excluídas. Por fim, buscando refinar a estrutura do modelo, as seguintes informações de domínio do usuário especialista foram inseridas:

1 - Os índices relativos ao fenômeno El Niño, por se tratar de um fenômeno remoto, não podem ser influenciados pelas variáveis locais (não possuem nós pais), nem podem exercer influência

direta sobre o branqueamento; 2- As variáveis ambientais referentes a períodos passados não podem ser influenciadas por variáveis calculadas para períodos mais à frente no tempo; 3 - O nó branqueamento é um nó folha, ou seja, não pode influenciar as outras variáveis (não possui nós filhos); e 4 - O nó branqueamento pode ser direta ou indiretamente influenciado pelo índice GAT, devido ao elevado índice de correlação entre eles.

É pertinente ponderar que a inclusão de informações de conhecimento de domínio do usuário especialista pode aprimorar os resultados do modelo, entretanto, uma ordenação incorreta pode acrescentar incoerências durante o processo de aprendizagem da estrutura.

Tabela 2- Variáveis ambientais discretizadas em intervalos mutuamente exclusivos utilizados para aprendizado da estrutura e das probabilidades condicionais da rede Bayesiana.

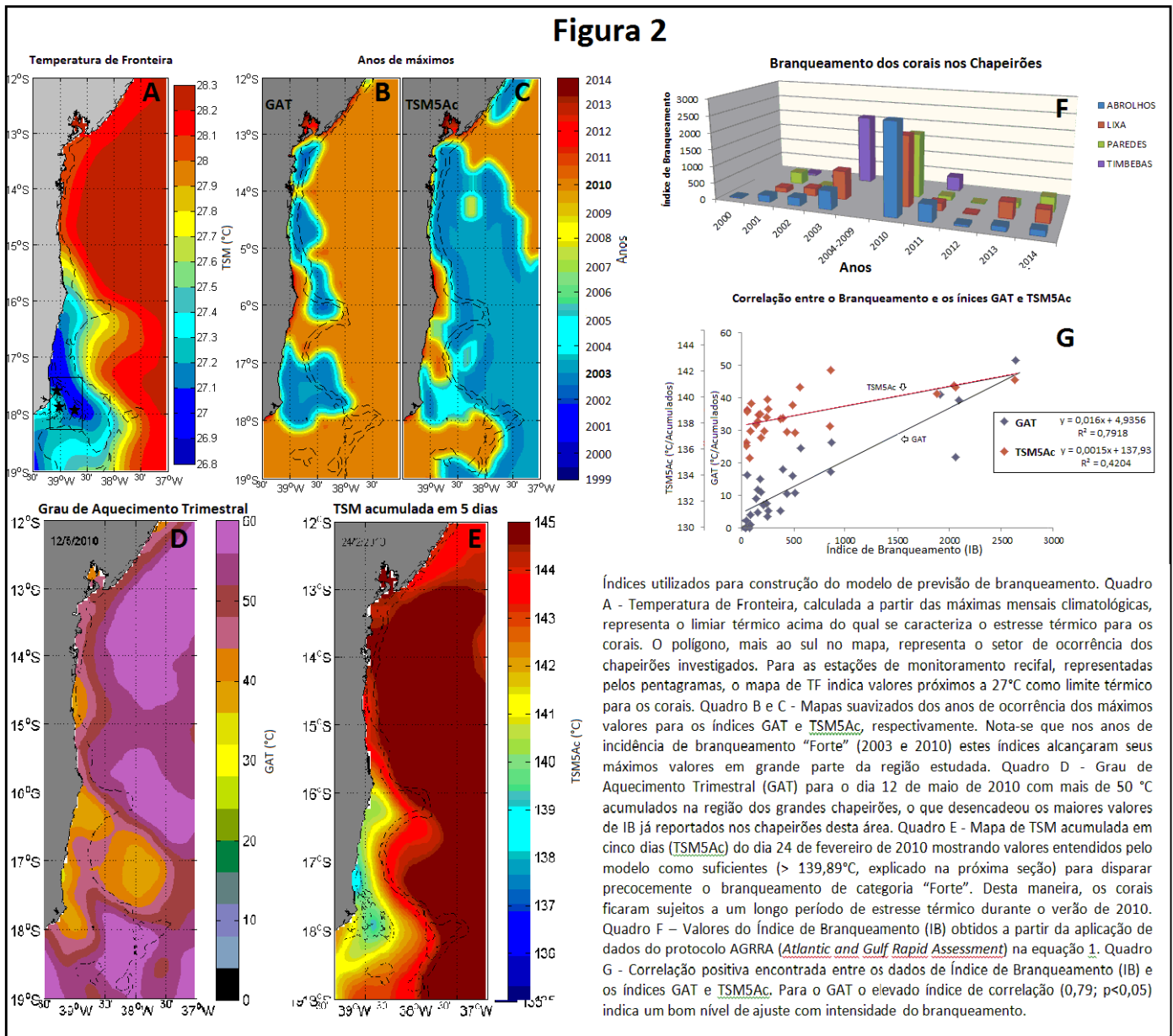
<p>Índice de Branqueamento</p> <p>Branqueamento</p> <p>“Fraco” (0 < X ≤ 500)</p> <p>“Forte” (X > 500)</p>	<p>Média de Inverno da Anomalia Trimestral Positiva de TSM</p> <p>TSM_ATP_Inv (°C)</p> <p>Inverno (X ≤ 20,91)</p> <p>Moderado (20,91 < X ≤ 34,16)</p> <p>Alto (X > 34,16)</p>
<p>Grau de Aquecimento Trimestral (°C)</p> <p>GAT</p> <p>Baixo (X ≤ 17,18)</p> <p>Moderado (17,18 < X ≤ 34,35)</p> <p>Alto (X > 34,35)</p>	<p>Oceanic Niño Index com lag de 8 meses</p> <p>ONI-8</p> <p>Niña (X ≤ -0,25)</p> <p>Normal (-0,25 < X ≤ 0,6)</p> <p>Niño (X > 0,6)</p>
<p>Máxima TSM 5 dias/acumulados (°C)</p> <p>MaxTSM5ac</p> <p>Fria (X ≤ 137,62)</p> <p>Moderada (137,62 < X ≤ 139,89)</p> <p>Quente (X > 139,89)</p>	<p>Multivariate ENSO Index com lag de 7 meses</p> <p>MEI-7</p> <p>Niña (X ≤ -0,21)</p> <p>Normal (-0,21 < X ≤ 0,32)</p> <p>Niño (X > 0,32)</p>
<p>Anomalia Trimestral Negativa de Turbidez Superficial (m⁻¹)</p> <p>Kd-ATN</p> <p>Clara (X ≤ -2,96)</p> <p>Moderada (-2,96 < X ≤ -1,96)</p> <p>Quente (X > -1,96)</p>	

Após determinar as dependências entre os indicadores ambientais a partir da diagramação gráfica da estrutura da rede é necessário o aprendizado das probabilidades condicionais. O editor de redes Netica (<http://www.norsys.com>, acessado em 22/02/2015) foi utilizado para a aplicação do algoritmo de inferência probabilística, desenvolvido por Lauritzen e Spiegelhalter (1988). Este algoritmo procura estabelecer a probabilidade de uma variável ambiental (nó filho) estar em um estado particular, dados os estados das outras variáveis (nós pais) a partir da propagação da evidência pela estrutura da rede. As Tabelas de Probabilidade Condicionais (TBC) são estabelecidas a partir do conjunto de observações fornecido pelo usuário e informam a probabilidade condicional de cada classe para todos os nós da rede, quando as condições são desconhecidas. Testes de sensibilidade do nó branqueamento aos outros nós da rede foram desenvolvidos baseados na redução de entropia, indicando como o nó da variável IB é influenciado pelos outros nós da rede. Outra análise de sensibilidade dos estados “Forte” e “Fracó” do nó da variável IB foi desenvolvida ao sistematicamente variar o estado de cada nó da rede entre suas possibilidades, mantendo todos os outros nós inalterados. Uma validação cruzada segundo o método *Leave One Out* foi desenvolvida para avaliar a acurácia do modelo em termos de taxas de acerto das previsões do estado do nó da variável IB. Para isso foi necessário excluir, sistematicamente, cada um dos casos (um por vez, de maneira independente) antes do aprendizado das probabilidades para evitar sua influência no cálculo das TBCs. A rede Bayesiana ensinada a partir de cada novo conjunto de dados é então utilizada para prever a observação excluída. As taxas de acerto são computadas em termos de previsões corretas (quando a previsão é 100% correta), prováveis (quando a previsão aponta o estado mais provável) e incorretas (quando a previsão indica erroneamente o estado do nó branqueamento).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados relativos à aplicação do protocolo AGRRA foram utilizados para calcular o Índice de Branqueamento (IB) para nove verões nos intervalos de 2000 a 2003 e 2010 a 2014 (Figura 2-F). Os eventos mais severos, classificados na categoria de branqueamento “Forte”, concentraram-se nos anos de 2003 e 2010, com o IB médio significativamente mais elevado em 2010, fato cuja relevância será destacada mais adiante. Dados de outras pesquisas confirmam a coincidência de eventos de branqueamento relativamente mais severos nestes mesmos anos em outros recifes do litoral da Bahia (e.g. Leão *et al.*, 2008; Miranda *et al.*, 2010). O mapa de Temperatura de Fronteira (Figura 2-A) indicou valores próximos a 27 °C como limite térmico para o branqueamento dos corais no setor de ocorrência dos chapeirões que inclui os Bancos Royal Charlotte e o complexo de Abrolhos. Essas águas mais frias, em relação às outras áreas recifais localizadas mais ao norte, apresentam-se como um padrão característico de ressurgência localizada, fazendo-se presente nos meses de verão, quando o regime de ventos favorece o transporte de *Ekman* para *offshore*. Segundo Souza *et al.* (2007), o alargamento plataformal dessa região representa uma barreira topográfica ao escoamento da Corrente do Brasil para sul, o que por sua vez induz variações nas feições físicas (e.g., ressurgência), químicas (e.g., aporte de nutrientes para a camada eufótica) e biológicas (e.g., “*patches*” de clorofila).

Uma análise temporal dos índices térmicos (GAT e TSM5Ac) indicou que em grande parte da região estudada os máximos valores, assim como o IB, também aconteceram nos anos de 2003 e 2010 (Figura 2-B e 2-C), o que indica uma relação direta de proporcionalidade entre estas variáveis. Os níveis mais críticos que estes índices alcançaram durante o verão de 2010 estão representados nos mapas dos quadros D e E, ainda na figura 2. O elevado índice de correlação encontrado entre o IB e o GAT ($R = 0,79$; $p < 0,05$; Figura 2-F) indica um bom nível de ajuste entre estes indicadores ambientais. Esta informação nos foi muito útil durante a etapa de construção da estrutura do modelo da rede Bayesiana, ao ser empregada como conhecimento do domínio do usuário especialista (descrito anteriormente).



Índices utilizados para construção do modelo de previsão de branqueamento. Quadro A - Temperatura de Fronteira, calculada a partir das máximas mensais climatológicas, representa o limiar térmico acima do qual se caracteriza o estresse térmico para os corais. O polígono, mais ao sul no mapa, representa o setor de ocorrência dos chapeirões investigados. Para as estações de monitoramento recifal, representadas pelos pentagramas, o mapa de TF indica valores próximos a 27°C como limite térmico para os corais. Quadro B e C - Mapas suavizados dos anos de ocorrência dos máximos valores para os índices GAT e TSM5Ac, respectivamente. Nota-se que nos anos de incidência de branqueamento "Forte" (2003 e 2010) estes índices alcançaram seus máximos valores em grande parte da região estudada. Quadro D - Grau de Aquecimento Trimestral (GAT) para o dia 12 de maio de 2010 com mais de 50 °C acumulados na região dos grandes chapeirões, o que desencadeou os maiores valores de IB já reportados nos chapeirões desta área. Quadro E - Mapa de TSM acumulada em cinco dias (TSM5Ac) do dia 24 de fevereiro de 2010 mostrando valores entendidos pelo modelo como suficientes (> 139,89°C, explicado na próxima seção) para disparar precocemente o branqueamento de categoria "Forte". Desta maneira, os corais ficaram sujeitos a um longo período de estresse térmico durante o verão de 2010. Quadro F - Valores do Índice de Branqueamento (IB) obtidos a partir da aplicação de dados do protocolo AGRRA (*Atlantic and Gulf Rapid Assessment*) na equação 1. Quadro G - Correlação positiva encontrada entre os dados de Índice de Branqueamento (IB) e os índices GAT e TSM5Ac. Para o GAT o elevado índice de correlação (0,79; $p < 0,05$) indica um bom nível de ajuste com intensidade do branqueamento.

Uma investigação mais minuciosa dos anos de 2003 e 2010, proporcionada pelas séries temporais da figura 3, demonstra como os índices térmicos utilizam os valores diários de TSM para monitorar as condições ambientais suficientes para desencadear o branqueamento de categoria “Forte”. Em 2003, por exemplo, a campanha de campo para monitoramento recifal, indicado pela barra vertical, aconteceu no mês de março, após um pico no índice TSM5Ac, mas cerca de 5 semanas antes do pico do GAT. Isto sugere que a extensão do branqueamento estaria em processo de evolução durante a campanha de campo, provavelmente se intensificando no período pós-monitoramento. Em Maio de 2010, por outro lado, foram observados os maiores valores de IB médio (IB=2227) coincidentes com elevados valores de GAT (acima de 50°C/acumulados para a estação do Parcel do Abrolhos). A análise das séries temporais deste ano demonstra que o monitoramento recifal ocorreu após picos de GAT, em Abril, e TSM5Ac nos meses de Fevereiro e Março. Isto nos leva a supor que o branqueamento de categoria “Forte” observado nas campanhas de campo deste ano encontrava-se no seu patamar mais elevado. Admite-se, portanto, que altos valores de GAT acabam mantendo, ou mesmo agravando os níveis de branqueamento, mesmo quando as anomalias térmicas mais fortes já tenham passado há algum tempo.

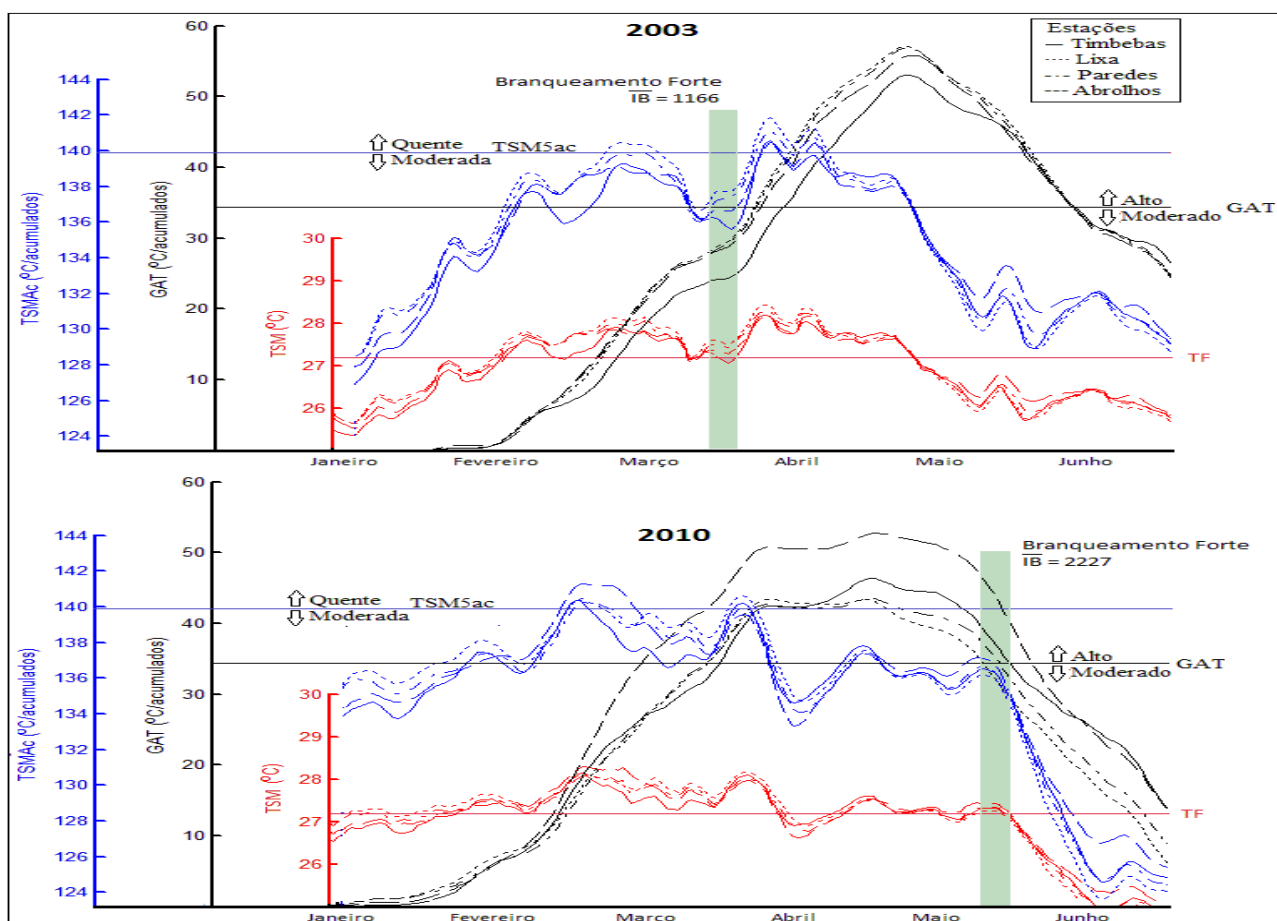


Figura 3 – Séries temporais das estações recifais de TSM (vermelha), GAT (preta) e TSM5Ac (azul) para os anos de 2003 (acima) e 2010 (abaixo). Linhas horizontais representam a Temperatura de Fronteira (TF) (vermelha), o limite entre os estados Alto e Moderado da variável GAT (preta) e o limite entre os estados Quente e Moderada da variável TSM5Ac (azul). As barras verticais representam o período do monitoramento recifal, quando foram reportados os maiores índices de Branqueamento já registrados nos chapeirões.

2.3.1 Previsão do branqueamento nos Chapeirões de Abrolhos

O algoritmo de aprendizado das relações de dependência estrutural entre as variáveis ambientais (Cheng et al 2002), somados à inclusão do conhecimento de domínio do usuário especialista gerou o modelo de rede representada na figura 4. O IB, objeto de consulta da rede, mostrou ser primordialmente influenciado pelos índices térmicos MaxTSM5Ac e GAT (nós pais). O arco direto entre estes índices e o branqueamento indica o papel preponderante da temperatura da água na determinação da severidade destes fenômenos nesta região. Enquanto a TSM5Ac representa uma curta anomalia térmica entendida como gatilho que dispara o branqueamento em níveis potencialmente perigosos para os corais, o GAT é visto como o total de calor responsável por agravar a severidade do branqueamento para escalas mais generalizadas.

Esta relação entre anomalias térmicas positivas e o branqueamento na região do Banco dos Abrolhos e em outras áreas recifais do OASO foi anteriormente apontada em diversas pesquisas (e. g. Castro e Pires, 1999; Leão et al., 2008). Outra relação captada pela estruturação gráfica da rede, e também indicada em periódicos relacionados ao tema, refere-se à influência remota do fenômeno El Niño em anomalias térmicas positivas da TSM. Esta influência está representada na rede pela conexão direta entre os índices ONI e MEI com seus nós filhos MaxTSM5Ac e GAT, sendo que este último também diretamente influenciado pela Anomalia Trimestral Positiva média de Inverno de TSM (TSM ATP Inv). Estes resultados indicam que a intensidade que os índices térmicos alcançam durante o verão, e por consequência o branqueamento dos corais, guardam relação com as condições locais relativas ao inverno predecessor. Além disso, as relações dos índices térmicos com a intensidade do fenômeno El Niño com alguns meses de defasagem apontam para a existência de importantes tele conexões climáticas para a determinação da severidade do branqueamento.

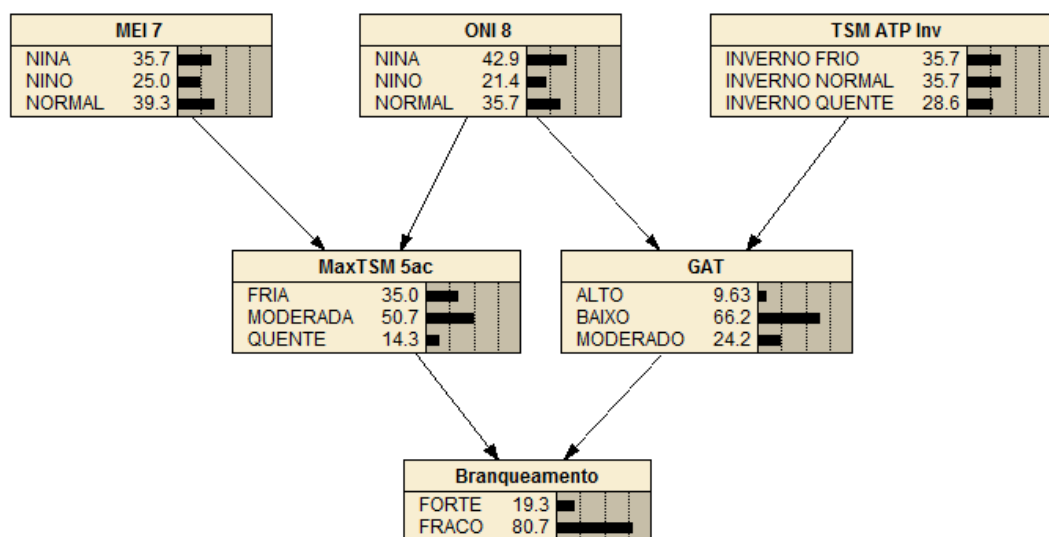


Figura 4 - Estrutura gráfica da Rede Bayesiana utilizada para previsão do branqueamento dos corais nos Chapeirões de Abrolhos. Os valores e barras horizontais indicam as probabilidades condicionais dos estados dos indicadores ambientais quando as condições são desconhecidas. Nota-se que o branqueamento “Fraco” é quatro vezes mais provável de ocorrer do que o branqueamento de categoria “Forte”.

2.3.2 Validação do modelo e análise de sensibilidade do branqueamento aos outros nós da rede

A validação através do método *Leave One Out* expõe as taxas de acerto do modelo em termos prognósticos acertados a respeito da categoria do branqueamento observada. Nesta análise constatamos que a rede foi capaz de prever acertadamente todos os 28 casos com os quais foi ensinada, atingindo a marca de 100% de previsões corretas (Tabela 3). A mesma análise foi desenvolvida utilizando apenas as informações referentes aos nós Avós do branqueamento (ONI, MEI e TSM ATP Inv), demonstrando que a rede tem um bom poder de previsão, mesmo quando seus nós Pais (GAT e TSM5Ac) são tratados como desconhecidos.

Tabela 3 – Taxas de previsão do branqueamento da Rede Bayesiana segundo o método *Leave One Out*. Os prognósticos do modelo são classificados como “Alta Probabilidade” quando a previsão está 100% correta, como “Estado provável” quando aponta com maior probabilidade a categoria certa de branqueamento, e “Estado improvável” quando o modelo erra sua previsão em termos de categorias “Fraco” ou “Forte”. Na parte direita temos as taxas de acerto do modelo ao adicionarmos apenas as observações referentes aos nós ONI, TSM ATP Inv e MEI, e tratamos as informações dos nós GAT e TSM5Ac como desconhecidas. Neste caso, nota-se uma perda nas taxas de “Alta Probabilidade” de 100% para cerca de 82% que não é transmitida para as taxas de “Previsão correta”, devido aos prognósticos divergentes terem sido classificados como “Estado Provável”, ao invés de “Estado improvável”.

	Nós Pais		Nós Avós	
	FRACO	FORTE	FRACO	FORTE
Alta Probabilidade	22/22 (100%)	6/6 (100%)	18/22 (82%)	5/6 (83%)
Estado Provável	0	0	4/22 (18%)	1/6 (17%)
Estado Improvável	0	0	0	0
Previsão correta	100%	100%	100%	100%

Uma análise de sensibilidade foi desenvolvida com o objetivo de avaliar como a probabilidade de branqueamento pode ser influenciada por observações de cada um dos nós que compõem a rede. Ao sistematicamente variar o estado de cada nó, mantendo os outros inalterados, computou-se a variação de probabilidade nos estados “Fraco” e “Forte” do nó branqueamento (figura 5). Ainda nesta figura expomos o resultado do teste de sensibilidade segundo a variação da entropia, também centrado em mensurar o grau de influência entre os nós (detalhes ver Lauritzen e Spiegelhalter, 1988). Como era de se esperar, nos dois testes os nós relativos aos índices térmicos MaxTSM5Ac e GAT representaram os componentes mais influentes da rede. Apesar de tratar-se de um fenômeno remoto, o nó relativo ao índice ONI mostrou ter uma considerável influência no branqueamento, propagada através dos seus dois nós pai. Com níveis de influência limitados estão os nós dos índices MEI e TSM ATN Inv. O nó relativo às anomalias de turbidez (Kd ATN – presente na rede Bayesiana alternativa proposta na figura 6) demonstrou-se como o nó menos influente na rede, com os estados “Forte” e “Fraco” do nó Branqueamento relativamente insensíveis à sua variação. Estes resultados, em conjunto com outras análises expostas anteriormente, comprovam a estreita relação da severidade do branqueamento dos corais desta região com a elevação na TSM.

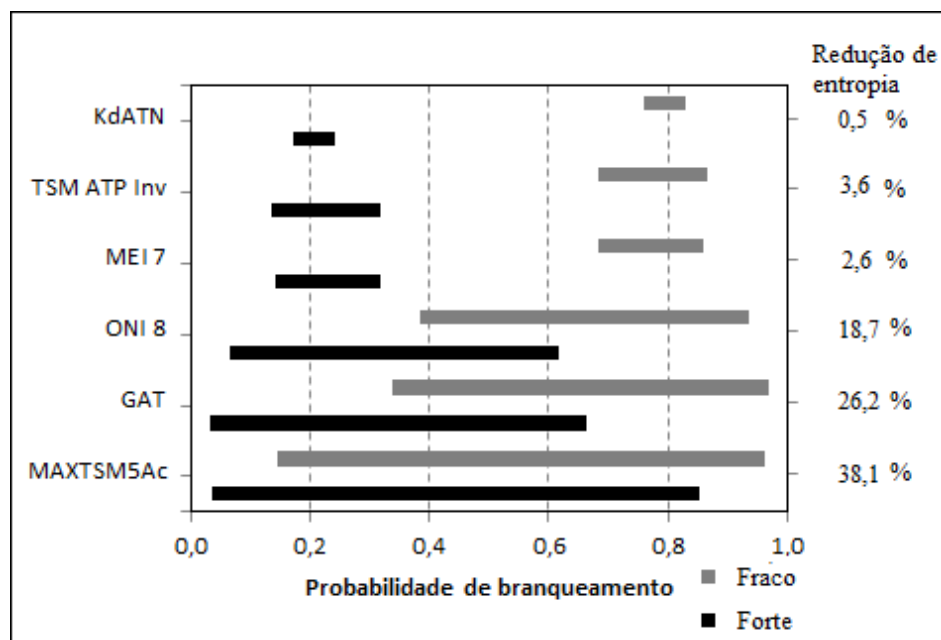


Figura 5 – Análise de sensibilidade do nó branqueamento às variáveis ambientais presentes na Rede Bayesiana. As barras pretas (cinzas) representam a amplitude de variação da probabilidade de ocorrência de um evento de branqueamento “Forte” (“Fraco”) segundo a variação de todos os estados dos nós observados no eixo Y.

2.3.3 Testes de aplicabilidade do modelo

2.3.3.1 Previsão passada para os verões não monitorados

A aplicabilidade do modelo foi, inicialmente, testada para realizar estimativas passadas para os verões de 2004 a 2009, quando não foram realizadas as campanhas de campo ao longo dos chapeirões do sul da Bahia (tabela 4). Neste intervalo, a rede indicou o branqueamento de categoria “Forte” para os anos de 2005, 2008 e 2009. Ressalta-se, entretanto, que apenas nos meses de abril desses anos, o MaxTSM5Ac atingiu valores classificados na categoria “QUENTE” (MaxTSM5Ac > 139,89°C/acumulados). Estes resultados sugerem que houve branqueamento de categoria “Forte” durante os anos não visitados, contudo a data de ocorrência mais tardia do MAXTSM5Ac, e os valores de GAT significativamente menos elevados, apesar de ainda classificados nas categorias “ALTO” e “MODERADO”, insinuam que estes eventos foram menos severos quando comparados aos episódios reportados em 2003 e 2010. Nestes anos os corais ficaram meses expostos às condições térmicas estressantes, pois o gatilho para o branqueamento aconteceu já no mês de fevereiro, com valores de GAT acima de 50°C/acumulados em abril e maio (figura 3). Segundo observações de Leão et al. (2008) e de dados não publicados (Grupo RECOR), relativos a outras regiões recifais do litoral da Bahia, existe uma certa coincidência de eventos relativamente mais intensos nos anos de 2005, 2008 e 2009 comparados com eventos menos intensos em 2004 e 2006. Esta correspondência entre os recifes de distintos setores do litoral da Bahia, em parte atribuída à proximidade geográfica, também pode ser comprovada pelos eventos mais severos reportados em ambas as regiões nos anos de 2003 e 2010.

Tabela 4 – Valores máximos dos índices TSM5Ac e GAT para as estações recifais nos verões não contemplados por campanhas de campo (2004 – 2009). Em cinza destacam-se os valores que, segundo o modelo de previsão, caracterizam as condições ambientais suficientes para desencadear o branqueamento de categoria “Forte”. As datas de ocorrência indicam o MaxTSM5Ac antecedendo o MaxGAT em algumas semanas.

Anos	Índices	Timbebas	Data	Lixa	Data	Paredes	Data	Abrolhos	Data
2004	MaxTSM5ac	139,54	28/02	141,51	28/02	141,26	28/02	140,37	28/02
	MaxGAT	16,50	6 semanas depois	16,34	5 semanas depois	17,02	5 semanas depois	16,85	5 semanas depois
2005	MaxTSM5ac	140,67	09/04	140,97	11/03	140,20	11/03	141,64	10/04
	MaxGAT	41,15	3 semanas depois	37,33	7 semanas depois	37,76	7 semanas depois	45,47	3 semanas depois
2006	MaxTSM5ac	137,89	08/04	139,20	22/02	138,14	08/04	138,39	08/04
	MaxGAT	9,87	3 semanas depois	16,29	8 semanas depois	14,21	3 semanas depois	13,67	3 semanas depois
2007	MaxTSM5ac	138,76	30/03	138,68	30/03	138,24	29/03	138,75	30/03
	MaxGAT	21,18	4 semanas depois	14,63	4 semanas depois	14,68	4 semanas depois	17,82	4 semanas depois
2008	MaxTSM5ac	140,36	23/04	141,41	11/04	141,08	23/04	140,38	22/04
	MaxGAT	32,70	2 semanas depois	34,54	4 semanas depois	35,71	2 semanas depois	32,24	2 semanas depois
2009	MaxTSM5ac	140,33	09/04	140,88	09/04	140,73	09/04	140,04	09/04
	MaxGAT	32,55	5 semanas depois	27,01	3 semanas depois	28,14	3 semanas depois	30,59	3 semanas depois

2.3.3.2 Previsão para o verão de 2016

Outro teste de aplicabilidade que nosso modelo foi submetido refere-se à previsão para o verão de 2016 (tabela 5). Para isso, o primeiro indicador a ser obtido refere-se ao índice ONI, por estar sendo utilizado com defasagem temporal 8 (oito) meses, referente ao mês de março de 2016. O valor encontrado de 1,3 para este índice, classificado segundo nosso modelo na categoria “Niño”, aumenta a probabilidade de ocorrência de branqueamento “Forte” de 19,3% para 61,7%. O índice MEI com defasagem de sete meses referente ao mesmo mês de 2016 apresentou um valor de 2,37, também classificado na categoria de “Niño”, o que desencadeia um aumento substantivo para 94% de probabilidade de um evento de categoria “Forte”. Por fim, ao adicionarmos a informação referente ao nó TSM ATP Inv (classificada na categoria “INVERNO QUENTE”), o modelo prevê 100% de probabilidade de ocorrência de um fenômeno de branqueamento de categoria “Forte” no mês de março de 2016. Apesar de representar apenas uma estimativa inicial, modelada a partir de um conjunto limitado de observações, este resultado ganha real importância para a gestão ambiental, tanto por chamar atenção para um período potencialmente perigoso para os corais, como por proporcionar certo tempo hábil para planejamento das campanhas de campo. Além disso, ao monitorar em tempo quase real o comportamento dos indicadores MAXTSM5Ac e GAT, durante o verão de 2016, teremos uma ideia exata de quando as condições térmicas serão suficientes para disparar o branqueamento, caracterizando, desta forma, uma grande oportunidade para investigarmos o processo de evolução do branqueamento, desde seu início até atingir seus níveis mais críticos.

Tabela 5 - Valores numéricos e suas respectivas categorias para os indicadores que representam os nós avós do branqueamento referentes à previsão para o mês de março de 2016. Na coluna da direita está representado o aumento gradativo na probabilidade de ocorrência de um evento de branqueamento “Forte” ao adicionarmos as informações dos índices.

Previsão para o verão de 2016			
Nó avô do Branqueamento	Valor numérico	Categoria classificada	Aumento na probabilidade de branqueamento “Forte”
<i>ONI</i>	1,3	Niño	19,3% → 61,7%
<i>MEI</i>	2,37	Niño	61,7% → 94,0%
<i>TSM ATP Inv*</i>	40,2	Inverno Quente	94,0% → 100%

* Valor médio entre as estações

2.3.3.3 O papel da turbidez no branqueamento dos corais

A rede alternativa proposta na figura 6 é apresentada com a indicação do estado “Forte” na variável IB com o intuito de se avaliar a associação desta categoria com os estados dos outros nós da rede. Nesta rede também foi mantido o nó relativo à Anomalia Trimestral Negativa da Turbidez (Kd_ATN), apenas para descobrirmos em que sentido a turbidez pode atuar nos eventos de branqueamento “Forte”. A habilidade da rede em realizar especulações bidirecionais pode ser utilizada para identificar o estado mais provável de um nó pai que desencadeia num estado particular de um nó filho de interesse. Por exemplo, a análise das probabilidades da rede indica que o estado “Forte” do nó Branqueamento está probabilisticamente associado ao estado de “Niño” dos nós ONI (58,8%) e MEI (39,1%), ao estado de “Inverno Quente” do nó TSM ATP Inv (45,9%), ao estado “Moderada” do nó KD ATN (38,1%), e aos estados de “Moderado” e “Quente” dos nós GAT (50,6%) e MAXTSM5Ac (66,5%), respectivamente. A análise de sensibilidade do nó relativo turbidez da água (Kd ATN) (figura 7), indica que o Branqueamento “Forte” parece estar ligado a condições de turbidez “Moderada” (38,1%) e “Turva” (32,7%), ao passo que os eventos de categoria “Frac” estão preferencialmente associados à condições de água “Clara” (37,5%) e “Moderada” (35,1%). Juntos, estes resultados sugerem que condições de água mais turvas podem aumentar a vulnerabilidade dos corais dessa região aos impactos associados ao aumento da temperatura, ao invés de protegê-los contra o excesso de luz. Acredita-se que nestes recifes, a demanda energética para manter os pólipos livres do excesso de material particulado em suspensão deve adicionar níveis de vulnerabilidade dos corais aos impactos associados à elevação na temperatura da água (comunicação pessoal Prof. Dr. Ruy Kikuchi).

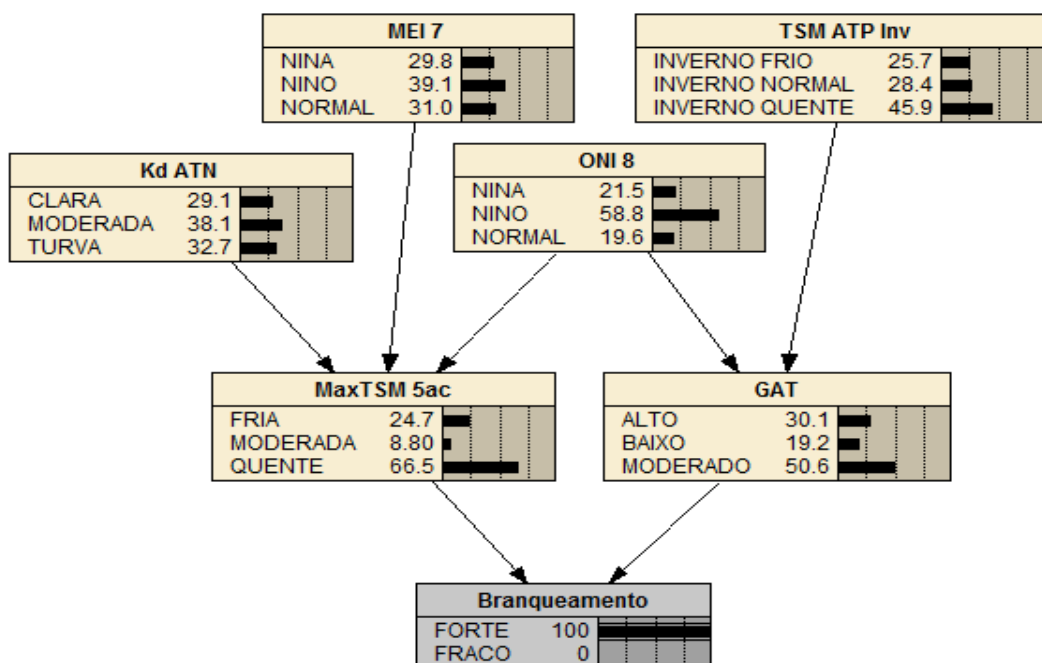


Figura 6 - Rede Bayesiana alternativa e as probabilidades condicionais ligadas à categoria “Forte” do nó branqueamento. O nó KD_ATN foi mantido para realizar especulações a respeito das condições de turbidez da água ligadas aos eventos de branqueamento de categoria “Forte”.

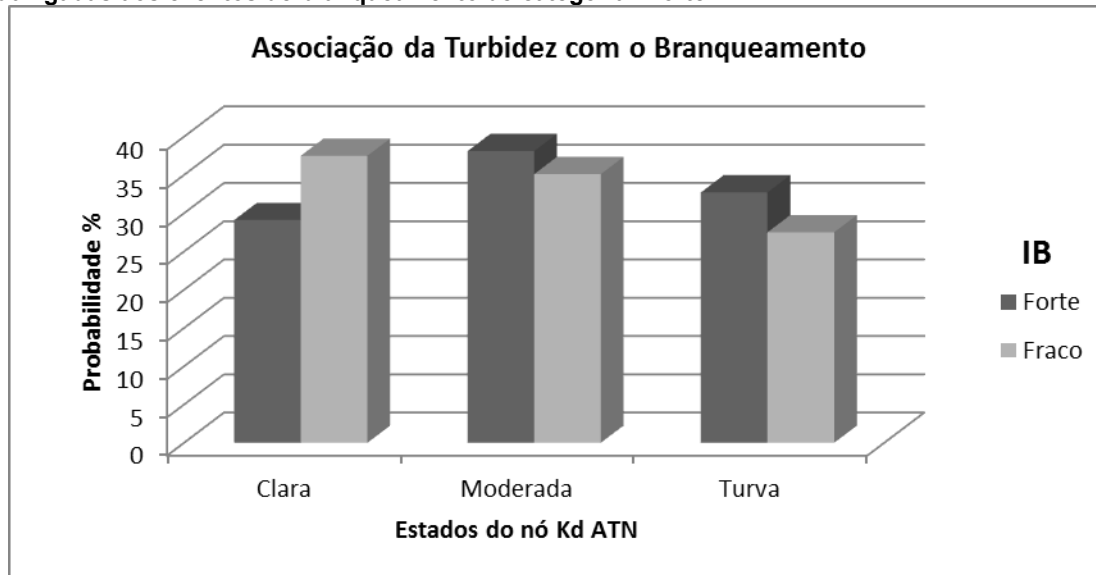


Figura 7 – Análise da associação dos estados do nó Kd ATN, relativo à turbidez da água, com os estados “Forte” e “Fraco” do nó da variável Branqueamento. As barras escuras (claras) representam as probabilidades de cada estado do nó KD ATN condicionadas pelo estado “Forte” (“Fraco”) de branqueamento. Nota-se que para o modelo o branqueamento “Forte” está preferencialmente associado com condições de água “Moderada” (38,1%) a “Turva” (32,7%), enquanto o branqueamento “Fraco” tem mais probabilidades de ocorrer em condições de água “Clara” (37,5%) e “Moderada” (35,1%).

2.3.3.4 Áreas prioritárias para conservação ambiental

Outra interessante aplicação do modelo proposto nesta pesquisa é assinalar as regiões com menores predisposições ao desenvolvimento de condições suficientes ao desencadeamento do branqueamento de categoria “Forte”. Ao utilizar os dados dos índices térmicos TSM5Ac e GAT referentes aos meses potencialmente mais perigosos para os corais dentro do período estudado (fevereiro a abril de 2000 a 2014) podemos construir mapas de probabilidades médias de ocorrência de branqueamento de categoria “Forte”. Estes mapas podem ser utilizados como critério de seleção de áreas para conservação ambiental, onde, baseados no que observamos durante o período estudado, os corais teriam melhores chances de sobrevivência diante do aumento gradativo da temperatura. Já existem, entretanto, entre os recifes estudados nesta pesquisa, duas unidades de conservação ambiental que fazem parte do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos: mais ao norte, no arco interno encontra-se o Recife das Timbebas, e mais ao sul, no arco externo o arquipélago e o Parcel dos Abrolhos (polígonos circundados de vermelhos na figura 8). Pela análise dos mapas de TSM5Ac e GAT da figura 8 pode-se perceber que, justamente, as áreas protegidas pelas unidades de conservação (Recife das Timbebas e Abrolhos) possuem menores probabilidades de desenvolvimento das condições suficientes para causar branqueamento “Forte”. Este resultado alcança uma significativa utilidade para gestão ambiental ao apontar as unidades de conservação da região de estudo como as áreas mais promissoras para a sobrevivência dos corais frente às condições térmicas elevadas.

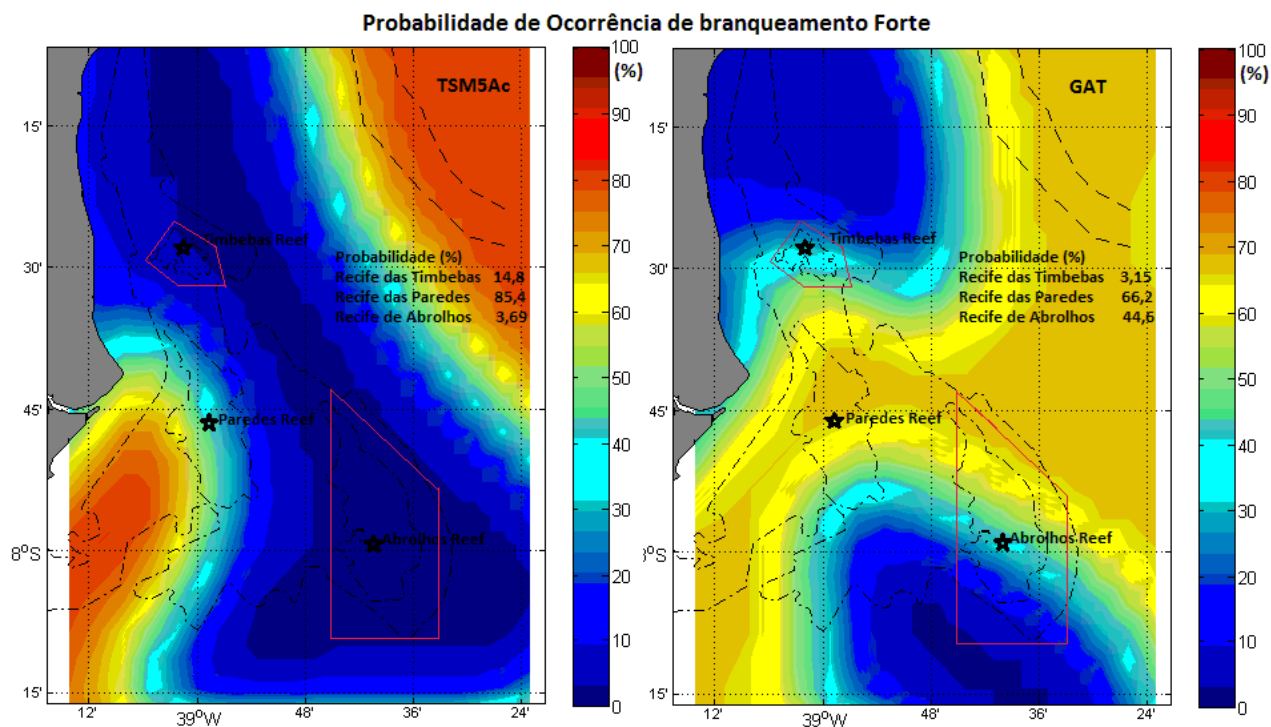


Figura 8 - Mapas de probabilidade média de branqueamento de categoria “Forte” durante os meses potencialmente mais perigosos para os corais (fevereiro a abril). À esquerda (direita), probabilidades calculadas pelo modelo segundo os valores médios do índice térmico TSM5Ac (GAT). Nota-se em ambos os mapas que os recifes localizados nas reservas ambientais (polígonos vermelhos) das Timbebas (14,8% - TSM5Ac e 3,15% - GAT) e dos Abrolhos (3,68% - TSM5Ac e 44,6% - GAT) possuem menores probabilidades

de desenvolvimento de condições suficientes ao branqueamento, representando, portanto, as áreas com melhores chances de sobrevivência para os corais.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa as relações de causa e efeito entre o branqueamento dos corais nos Chapeirões e diversos indicadores ambientais foram utilizadas para construir um modelo capaz de prever a ocorrência de branqueamento de categoria “Forte”. O algoritmo de aprendizado empregado para determinar as dependências estruturais no nosso conjunto de indicadores (Cheng et al., 2002) sugere que o padrão de branqueamento nesta região é um sistema que responde a forçantes em escalas regionais (índices GAT, MAXTSM5Ac e TSM ATP Inv) e remotas (índices ONI e MEI). Os índices térmicos MAXTSM5Ac e GAT, desenvolvidos para monitorar as condições ambientais suficientes para disparar e intensificar, respectivamente, o branqueamento de categoria “Forte”, mostraram-se altamente eficientes em caracterizar a conjuntura de circunstâncias favoráveis a estes fenômenos. Isto também foi enfatizado pela validação do modelo através do método *Leave one out*, onde a rede foi capaz de reproduzir corretamente o estado do nó relativo ao branqueamento para todos os casos com os quais foi ensinada.

Ao terem suas evidências propagadas até o nó do Branqueamento, os índices relativos ao fenômeno climático El Niño (ONI e MEI) e o índice de inverno (TSM ATN Inv), adicionaram ao modelo um poder de previsão em uma janela temporal de seis meses. Esta característica da rede ganha uma importância particular para a gestão ambiental ao proporcionar um tempo hábil para o planejamento das campanhas de campo. Para Leão et al. (2010) a sobrevivência destes recifes depende de uma compreensão adequada de todos os processos envolvidos na manutenção e funcionamento dos ecossistemas recifais. Neste sentido, o modelo proposto demonstra uma interessante aplicabilidade ao oferecer uma ferramenta habilitada para monitorar todo o processo de evolução do branqueamento, desde as primeiras colônias a perderem suas zooxantelas, até este processo atingir seu ponto mais crítico e potencialmente mais perigoso para os corais.

Em relação à frágil dependência encontrada entre variável relacionada à turbidez da água (Kd ATN) e o branqueamento nos Chapeirões, é conveniente ressaltar que foram utilizados dados provenientes de distintos sensores, não representando, portanto, uma condição de análise ideal. Apesar disso, os resultados demonstraram que os elevados níveis de turbidez da água podem atuar de maneira combinada com a elevação da temperatura para aumentar os efeitos deletérios para os corais.

Ao utilizarmos as informações dos índices térmicos para criarmos mapas de probabilidade média de branqueamento, demonstrou-se outra interessante utilidade para o modelo como critério de seleção de áreas dentro do domínio dos grandes Chapeirões menos propensas ao desenvolvimento de condições estressoras aos corais. Segundo os dados do modelo, acredita-se que as regiões recifais das Timbebas e Abrolhos, quando comparadas com a região do Parcel das Paredes, tenham melhores chances de sobreviver aos prováveis episódios de branqueamento cada vez mais intensos e frequentes.

Em relação ao prosseguimento futuro desta pesquisa, é imprescindível considerar que novos dados de branqueamento, à medida que se tornem disponíveis, podem ser facilmente

incorporados ao modelo, o que, provavelmente, promoverá um acréscimo na robustez das previsões através do cálculo de novas probabilidades condicionais dentro desse mais recente conjunto de observações. Isto se torna ainda mais conveniente ao considerarmos o limitado número de amostras (28 observações de branqueamento) com as quais nosso modelo foi ensinado. Além disso, as relações de causa e efeito entre os indicadores do El Niño e os índices térmicos GAT e TSM5Ac podem ser consideravelmente fortalecidas pelo acréscimo de dados pretéritos referentes à períodos anteriores ao estudado, mesmo com a respectiva ausência de dados de branqueamento.

Por fim, a abordagem Bayesiana em conjunto com as análises e resultados expostos nesta pesquisa enfatizaram a íntima conexão entre o branqueamento dos corais nos Chapeirões do OASO e a tendência de elevação da temperatura da água do mar. Estas indicações, apesar de corroborarem com resultados encontrados anteriormente em outras pesquisas, adicionaram informações pertinentes ao atual estado de conhecimento acerca das condições causadoras do branqueamento nesta região. Além disso, o modelo de previsão desenvolvido por esta pesquisa alcança uma imprescindível aplicação ao representar uma ferramenta apta a conceder suporte à gestão ambiental dos ecossistemas recifais do OASO.

2.5 REFERÊNCIAS

- Berkelmans R., De'ath G., Kininmonth S., Skirving W.J., 2004. A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns, and predictions. *Coral Reefs* 23, 74-83.
- Brown B. E., Dune R. P., Chansang H., 1996. Coral bleaching relative to elevated sea surface temperature in the Andaman Sea (Indian Ocean) over the last 50 y. *Coral Reefs* v.15, p. 151-152.
- Brown B. E., 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*, v. 16, p. 129-138.
- Bruno J., C. Siddon J., Witman, P., Colin and Toscano M., 2001. El Niño related coral bleaching in Palau, Western Caroline Islands. *Coral Reefs* 20: 127-136.
- Castro C. B., Pires D. O., 1999. A bleaching event on an brazilian coral reef. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 47, p. 87-90.
- Cantin N. E., Cohen A. L., Kamauskas K. B., Tarrant A. M., McCorkle D. C. 2010. Ocean Warming Slows Coral Growth in the Central Red Sea. *Science* Vol. 329:322-325.
- Charniak, E., 1991. Bayesian networks without tears. *Artif. Intell. Mag.* 12, 50 e 63.
- Cheng J., Griener R., Kelly J., Bell D., Liu W., 2002. Learning Bayesian networks from data: an information-theory based approach. *Artif. Intell.* 137, 43-90.
- Cirano M., Mata M. M., Campos E. J. D., Deir N. F. R., 2006. A Circulação Oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico sul com base no modelo de circulação global OCCAM. *Revista Brasileira de Geofísica* v. 24(2) p. 209-230.
- Cooley S., Mathis J., Yates K. Turley C. 2012. Frequently Asked Questions about Ocean Acidification. U.S. Ocean Carbon and Biogeochemistry Program and the UK Ocean Acidification Research Programme. Version 2.
- Davies J.L., 1980. *Geographical Variation in Coastal Development*. 2ª ed. Longman, Londres, 221 p.
- Ginsburg R.N., Kramer P.A., Lang J.C., Sale P., 1998. AGRRA, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. Disponível *online* em: <http://agrra.org> (acessado em 17/08/15).
- Glynn P., 1984. Widespread coral mortality and the 1982-1983 El Niño warming event. *Environmental Conservation* 11: 133-146.
- Glynn P. W., 1993. Coral reef bleaching ecological perspectives. *Coral Reefs* 12, p. 1-17.
- Goreau T. J., Hayes R. L., 1994. Coral bleaching and ocean hot spots. @ *AMBIO* v.23: p. 176-180.
- Henderson C., 2006. Ocean acidification: the other **CO₂** problem, *New Scientist*, 8.

Hoerling M. P., and Kumar A., 2000. Understanding and predicting extratropical teleconnections related to ENSO. In *El Niño and the Southern Oscillation: Multi-scale Variations and Global and Regional Impacts*, H.F. Diaz and V. Markgraf (Eds.), Cambridge University Press, 57-88.

IPCC, 2011. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp

Jones R. J. 1995. Sublethal stress assessment in scleractinia and the regulatory biology of the coral-algal symbiosis. PhD Thesis, James Cook University, Australia.

Kikuchi R. K. P., Leão Z. M. A. N., Oliveira M. D. M., 2010. Conservation status and spatial patterns of AGRRA vitality indices in Southwestern Atlantic Reefs. *Revista de Biologia Tropical*, v. 58, n. Suppl. 1, p. 1-31.

Klein S. A., Soden B. J., Lau N., 1999. Remote Sea Surface Temperature Variations during ENSO: Evidence for a Tropical Atmospheric Bridge. *Journal of Climate*, v. 12, p. 917-932.

Krug L. A., Gherardi D. F. M., Stech J. L., Leão Z. M. A. N., Kikuchi R. K. P., Junior E. R. H., Suggett D. J. 2013. The construction of causal network to estimate coral bleaching intensity. *Environmental Modelling & Software*: 42, 157-167.

Lanzante, J. R. 1996. Lag relationships involving tropical sea surface temperatures. *Journal of Climate*, v. 9, p. 2568-2578.

Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J., 1988. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *J. Roy. Stat. Soc. B* 50, 157e224.

Leão Z. M. A. N.; Kikuchi R. K. P. 1999. The Bahian coral reefs – from 7000 years BP to 2000 AD. *Rev. Ciência e Cultura*, v.51 (3/4), p. 88-96.

Leão Z. M. A. N.; Kikuchi R. K. P. 2000. The Abrolhos reefs of Brazil. In: U. Seeliger; B. Kjerfve. (eds.) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag. p. 83-96.

Leão Z. M. A. N.; Kikuchi R. K. P.; Oliveira M. D. M. 2008. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. *Biota Neotrop.* V.8, n. 3,

Leão, Z. M. A. N.; Kikuchi, R. K. P.; Oliveira, M. D. M.; Vasconcellos, V. 2010. Status of Eastern Brazilian coral reefs in time of climate changes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, v. 2, p. 224-235.

Lentini C. A. D., Podesta G. G., Campos E. J. D., Olson D. B. 2001. Sea surface temperature anomalies on the Western South Atlantic from 1982 to 1994. *Continental Shelf Research*, v. 21, 89-112.

Marshall P., Schuttenberg H., 2006. A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching. Published by: Great Barrier Reef Marine Park Authority, p. 178.

Miranda, R. J., Cruz, I. C. S., Leão, Z. M. A. N., 2010. Coral bleaching in the Caramuanas reef (Todos os Santos Bay, Brazil) during the 2010 El Niño event. *Latin American Journal of Aquatic Research*

Neapolitan, R.E., 2004. *Learning Bayesian Networks*. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Norris R. D., Kirtland S. T., Hull P. M. e Ridgwell A., 2013. Marine ecosystem responses to cenozoic global change, *Science*, 492.

Peterson R G., Stramma L., 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progr. Oceanogr.*, v.1, p. 26–73.

Soppa M. A. 2007. Determinação da variabilidade ambiental dos ecossistemas recifais brasileiros e sua relação com a biodiversidade dos corais. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

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, INPE, v.1, p. 4735-4742, 2007.*

Strong A. E.; Barrientos C. S.; Duda C.; Sapper J. 1997. *Improved satellite techniques for monitoring coral reef bleaching. Proc, 8th Int Coral Reef Symp v.2, p. 1495-1498.*

Strong A. E., Arzayus F., Skirving W., Heron S. F., 2006. Identifying coral bleaching remotely via Coral Reef Watch – improved integration and implications for climate change. Chapter 9 in *Coral Reefs and Climate Change: Science and Management*, J. T. Phinney, O. HOEGH-GULBERG, J. Kleypas, W. Skirving, and A. E. STRONG (Co-Eds), American Geophysical Union.

Wilkinson C. and D. Souter. 2008. Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, 152 p.

Wolter K., and M.S. Timlin. 1993: Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop*, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, 52-57.

Wooldridge S., Done T., 2004. Learning to predict large-scale coral bleaching from past events: a Bayesian approach using remotely sensed data, in-situ data, and environmental proxies. *Coral Reefs* 23, 96e108.

CAPÍTULO 3

CONCLUSÕES

O artigo científico, apresentado no capítulo 2, representa parte de um amplo estudo dedicado a elucidar os aspectos relacionados ao fenômeno de branqueamento dos corais, tema de importância global amparado internacionalmente por diversos governos e organizações científicas. É significativo considerar que para os ecossistemas recifais as perspectivas futuras indicam uma tendência de intensificação no branqueamento dos corais, somada ao processo gradativo de acidificação dos oceanos. Estes dois processos, fundamentalmente relacionados ao aumento de dióxido de carbono antropogênico na atmosfera, conferem uma conjuntura bastante preocupante a um dos ecossistemas mais diversos e produtivos do ambiente marinho, tornando ainda mais imperativo uma plena compreensão dos processos atuantes em seus domínios.

Na presente pesquisa, dados em um intervalo de 15 anos de monitoramento dos Chapeirões do complexo recifal dos Abrolhos foram utilizados em conjunto com diversos indicadores ambientais para construir um modelo de previsão de branqueamento. A estrutura do modelo proposto, originada a partir do algoritmo de aprendizado de relações de causa e efeito no nosso conjunto de variáveis, indicou que o padrão de branqueamento pode ser modelado a partir de sua interação com anomalias térmicas locais (índices GAT e MAXTSM5Ac), e da interação dessas anomalias com indicadores do fenômeno El Niño com defasagem temporal de alguns meses (índices ONI e MEI). Enquanto os índices locais são utilizados pelo modelo para detectar as condições térmicas necessárias para desencadear o branqueamento, os indicadores El Niño referentes ao período de inverno predecessor são utilizados para apontar os meses potencialmente mais perigosos para os corais, assim como foi aplicado durante a previsão de mais um evento de categoria forte para os meses de março e abril de 2016.

O modelo desenvolvido pode ser utilizado, portanto, como uma ferramenta de suporte à gestão ambiental apta a conceder prognósticos acerca do branqueamento na região dos Abrolhos. Além do caráter de utilidade prática como suporte às campanhas de campo, o modelo desenvolvido também foi utilizado para realizar especulações teóricas à respeito do papel da turbidez durante os episódios de branqueamento. Em linhas gerais, o modelo indicou que os eventos extremos de branqueamento estão preferencialmente relacionados às condições de turbidez mais altas, sugerindo que altos níveis de material particulado em suspensão devem

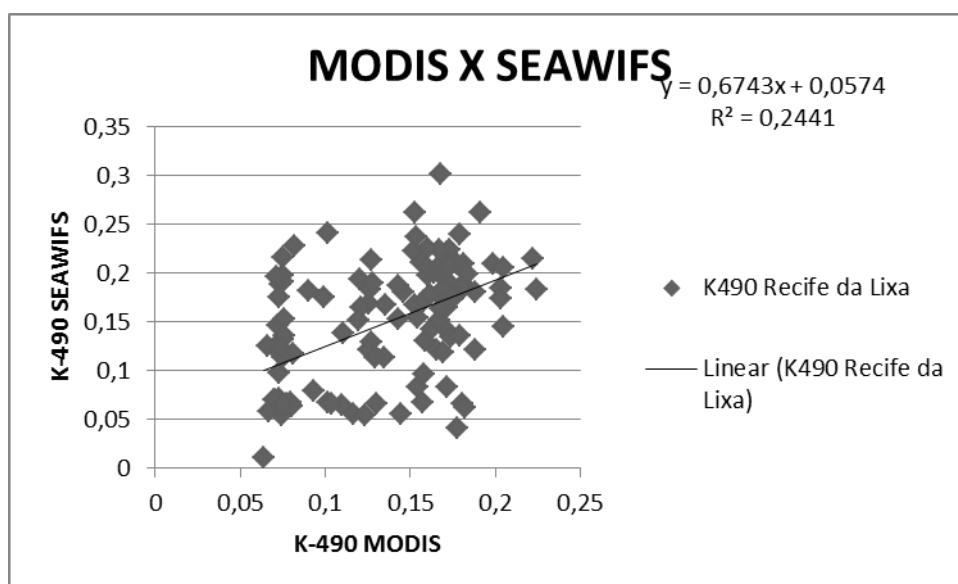
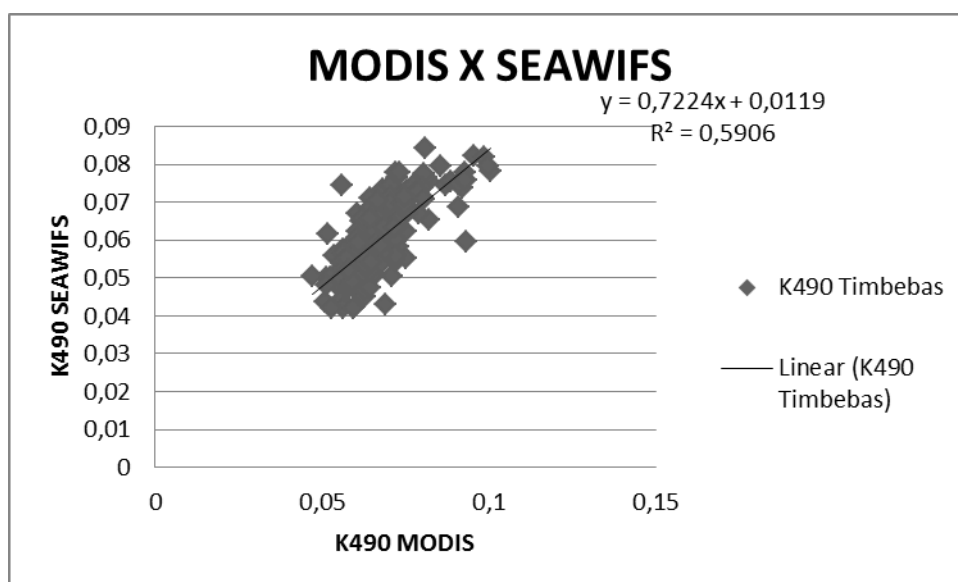
agir de maneira combinada com o aumento da TSM para intensificar a severidade do branqueamento. Comparações entre dados de branqueamento referentes a outros recifes do litoral da Bahia e previsões do modelo para os anos de 2004 a 2009 (quando não temos dados de branqueamento para a região dos Abrolhos) também foram realizadas buscando assinalar possíveis padrões nos dados de distintas regiões. Para os anos de 2005, 2008 e 2009 as previsões do modelo indicam eventos relativamente mais severos quando comparados aos anos de 2004, 2006 e 2007, o que também pôde ser observado nos dados do protocolo AGRRA referentes a outros recifes localizados mais ao norte do litoral da Bahia. Uma última utilidade foi proposta ao usarmos os dados de entrada do modelo para construir mapas de probabilidade média de branqueamento para servirem como critério de seleção de áreas prioritárias para conservação ambiental. Os mapas apontaram onde, segundo o modelo, os corais teriam melhores chances de sobrevivência frente à tendência atual de aumento gradativo na TSM e consequentemente na frequência e intensidade dos episódios de branqueamento.

Portanto, o modelo desenvolvido nesta pesquisa demonstrou ter utilidade prática e teórica, além de apresentar-se consistente em suas previsões, assim como ficou evidente durante a etapa de validação do modelo. Esforços futuros de pesquisa devem procurar estabelecer relações estruturais mais refinadas dentro do domínio das variáveis através da utilização de séries de dados mais longas. A inclusão de novos dados de branqueamento deve, teoricamente, aumentar a robustez e a confiabilidade das previsões do modelo, entretanto, ressalta-se que a aplicabilidade do modelo para outras regiões e períodos deve estar restrita à recategorização das variáveis e reestruturação do modelo dentro deste mais novo conjunto de observações.

Por fim, é significativo considerar que os dados de branqueamento utilizados nesta pesquisa resultaram de um longo monitoramento recifal, envolvendo, portanto, um grande número de estudantes, pesquisadores e equipe técnica de campo. A aquisição de dados tão onerosos só foi possível graças ao envolvimento conjunto dos componentes do Grupo de Pesquisa em Recifes de Coral e Mudanças Globais (RECOR) da UFBA (Universidade Federal da Bahia). Estes estudantes e pesquisadores, envolvidos em diversos projetos de pesquisa relacionados ao ambiente recifal, mostraram-se comprometidos em um expressivo esforço de pesquisa para melhor compreender os processos atuantes nestes ecossistemas. A continuação deste monitoramento ao longo dos recifes de Abrolhos é imprescindível para construirmos dados mais significativos e consistentes ao longo do tempo que beneficiariam diversas outras pesquisas dedicadas ao ambiente recifal.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO MÉTODO DE TRABALHO DESENVOLVIDO E DADOS BRUTOS

A seguir serão apresentados os gráficos de correlação dos dados de Kd-490 (turbidez da água) referentes aos sensores MODIS e SEAWIFS. Foram utilizados dados de quatro estações recifais referentes ao período de 2002 a 2010 para o cálculo das equações e dos coeficientes de correlação.



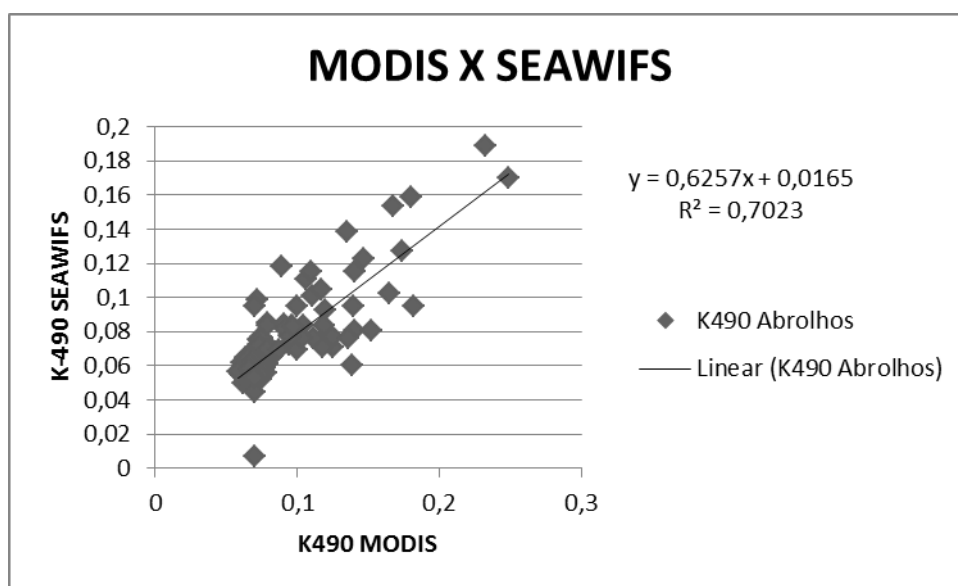
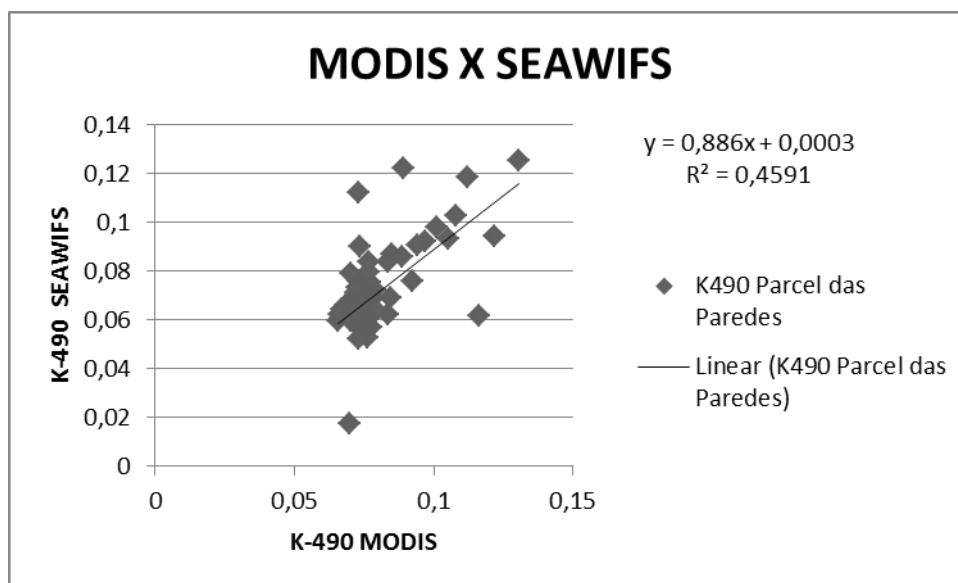


Figura A1; A2; A3; A4; Dados de turbidez superficial para as estações de Timbebas, Recife da Lixa, Parcel das Paredes e Parcel dos Abrolhos referentes aos sensores MODIS (eixo das abcissas) e SEAWIFS (eixo das coordenadas). As equações foram obtidas a partir do método dos mínimos quadrados e utilizadas para a calibração dos dados do MODIS.

A seguir é apresentada a tabela contendo os dados brutos das variáveis ambientais que foram utilizadas para a construção do modelo de rede Bayesiana para previsão do branqueamento dos corais no complexo recifal dos Abrolhos - BA.

Tabela A1 – Valores numéricos dos indicadores ambientais do modelo de previsão de branqueamento organizados por estação recifal

	Data de Monitoramento	Índice de Branqueamento	GAT	MaxTSM5ac	Kd_ATN	PAR_ATN_Inv	TSM_ATP_Inv	MEI_7	ONI_8	
Timbebas	03/03/2001									
		70,34	4,14	137,48	-2,47	-4,13	5,71	-0,14	-0,60	
	16/03/2002	74,81	0,92	139,56	-2,86	-2,98	28,43	-0,12	0,00	
	15/03/2003	2078,43	21,90	140,95	-2,53	-4,53	38,56	0,93	0,80	
	19/05/2011	428,49	10,53	137,39	-3,36	-1,64	25,07	-1,59	-1,40	
Lixa	08/03/2001	147,76	4,82	138,67	-3,81	-3,79	5,05	-0,14	-0,60	
	12/03/2002	235,64	3,42	139,88	-4,43	-3,42	26,35	0,36	0,00	
	15/03/2003	859,65	26,21	142,15	-0,30	-4,46	37,29	0,93	0,80	
	12/05/2010	2090,97	39,25	140,81	-1,52	-2,52	36,42	1,03	0,80	
	19/05/2011	227,69	7,59	138,50	-2,44	-1,84	20,76	-1,59	-1,40	
	11/03/2012	29,64	0,00	136,56	-1,13	-1,58	9,67	-0,46	-0,20	
	06/04/2013	482,00	15,97	139,43	-2,37	-1,54	21,06	0,28	0,40	
	20/03/2014	390,59	17,95	138,45	-2,64	-2,10	38,19	-0,18	-0,30	
	Paredes	15/03/2001	363,71	5,34	138,38	-1,77	-3,46	4,23	-0,24	-0,60
		12/03/2002	36,49	2,38	139,05	-2,46	-3,37	26,63	-0,12	0,00
12/05/2010		1910,19	41,08	140,34	-1,04	-2,81	37,05	1,03	0,80	
20/05/2011		126,80	9,12	137,97	-3,42	-2,56	22,11	-1,59	-1,40	
10/03/2012		28,09	0,00	136,32	-3,35	-1,66	10,10	-0,46	-0,20	
06/04/2013		167,37	14,92	138,75	-1,29	-1,57	21,21	0,28	0,40	
22/03/2014		428,57	17,23	137,83	-7,66	-2,49	40,57	-0,18	-0,30	
Abrolhos	05/04/2000	39,82	16,30	138,94	-1,32	-2,67	14,69	-1,00	-1,00	
	18/03/2001	202,99	7,13	137,45	-3,47	-2,67	3,32	-0,24	-0,60	
	20/03/2002	243,73	5,36	139,12	-3,02	-2,82	21,68	-0,12	0,00	
	14/03/2003	558,82	24,45	140,84	-2,14	-4,79	33,23	0,93	0,80	
	09/05/2010	2679,06	51,52	141,42	-2,64	-3,12	35,08	1,03	0,80	
	15/05/2011	507,14	10,77	137,33	-1,46	-2,38	25,31	-1,94	-1,40	
	15/03/2012	63,82	0,00	135,36	-6,09	-1,29	10,00	-0,46	-0,20	
	05/04/2013	144,41	11,70	138,22	-2,90	-1,44	17,39	0,28	0,40	
	18/03/2014	172,49	11,14	136,93	-4,38	-2,62	39,48	-0,18	-0,30	