

## Variabilidade temporal da temperatura superficial do mar e vento estimados por satélites e reanálises em áreas de recife de coral no Brasil

Mariana A. Soppa<sup>1</sup>  
Douglas F. M. Gherardi<sup>1</sup>  
Ronald Buss de Souza<sup>1</sup>  
Luciano P. Pezzi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{mariana, douglas, ronald}@ltid.inpe.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC  
12630-000 – Cachoeira Paulista - SP, Brasil  
{luciano}@cptec.inpe.br

**Abstract.** Coral reefs are known to be affected by persistent marine environmental stress from variables such as the sea surface temperature (SST) and calm winds. Long, reliable satellite-derived time series of SST images and meteorological data from reanalysis are available for the global ocean. Possible effects of SST and wind anomalies on the coral reefs occurring in Brazil are yet to be understood. This work investigates space-averaged time series of monthly SST and wind anomalies recorded for nine regions of coral reef occurrence in Brazil over a 1985-2004 time span. Results show that high, positive SST anomalies are found at the coral reef areas during the strongest El Niño events of 1987, 1992, 1998 and 2003. The major mode of variability in both SST and wind anomalies is related to the annual cycle probably because of its strong interannual variability. Mass mortality has already been described for many reef communities in NE Brazil. Series of ocean satellite data, together with reliable meteorological data can be successfully used for future monitoring of coral reef stress conditions along the Brazilian coast.

**Palavras-chave:** coral reefs, sea surface temperature, wind, recifes de coral, temperatura superficial do mar, vento.

### 1. Introdução

Dentre os ecossistemas marinhos, os recifes de coral estão entre os mais produtivos e de maior biodiversidade, abrigando um quarto de todas as espécies marinhas (Kikuchi et al., 2003). Entre os bens e serviços ecológicos relacionados aos recifes de coral estão a pesca, a proteção da linha de costa contra a erosão e o turismo. Em um contexto mais global, os recifes desempenham um importante papel funcionando como sumidouros de carbono e cálcio, e controlando o balanço bio-geoquímico dos oceanos. No Brasil, este ecossistema já mostra sinais de degradação, principalmente por estarem em grande parte localizados próximos à zona costeira, onde se concentra a maior parte da população. Apesar de existirem nove unidades de conservação no país destinadas ao manejo e proteção do ecossistema recifal (SNUC, 2003), ainda há pouca informação sobre estas áreas, principalmente em relação ao estado de conservação.

Como grande parte dos ecossistemas recifais está restrita aos trópicos, onde as condições ambientais são relativamente estáveis, os recifes podem sofrer grandes danos quando afetados por pequenas mudanças ambientais (McClanahan et al., 2002). Em vários pontos do globo, o efeito do estresse provocado pela variabilidade ambiental ultrapassou a capacidade de recuperação, causando sérias mudanças na estrutura destes ecossistemas (Bellwood et al., 2004) e afetando a distribuição das espécies (Walther et al., 2002).

Uma grande preocupação atual relacionada à variabilidade ambiental e aos ecossistemas recifais é o aumento no número de locais com ocorrência de branqueamento. O branqueamento ocorre em função de algum fator estressante, como o aumento anormal da temperatura da superfície do mar (TSM) e outras vezes, embora menos freqüente, a ocorrência de doenças (Brown, 1997). Os eventos de branqueamentos estão fortemente relacionados ao fenômeno *El Niño*. Este se caracteriza pelo aumento anômalo da TSM na região do Pacífico Equatorial próximo à costa do Equador e Peru (Trenberth, 1997). Após o *El Niño* de 1997 a 1998, foi registrada uma maior ocorrência de branqueamento e mortalidade de corais em todo o mundo (AIMS, 2006). Os eventos de branqueamento podem estar associados também a alterações nos padrões de circulação atmosférica, especialmente ao enfraquecimento da intensidade do vento, elevando assim o tempo de residência da água na escala local.

Portanto, para entender os efeitos que estas mudanças podem acarretar sobre os ecossistemas recifais faz-se necessário um melhor conhecimento sobre a variabilidade do meio ambiente marinho. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo principal descrever a variabilidade temporal dos parâmetros ambientais TSM e vento na superfície do mar em áreas de ocorrência de recifes de coral no Brasil.

## 2. Materiais e métodos

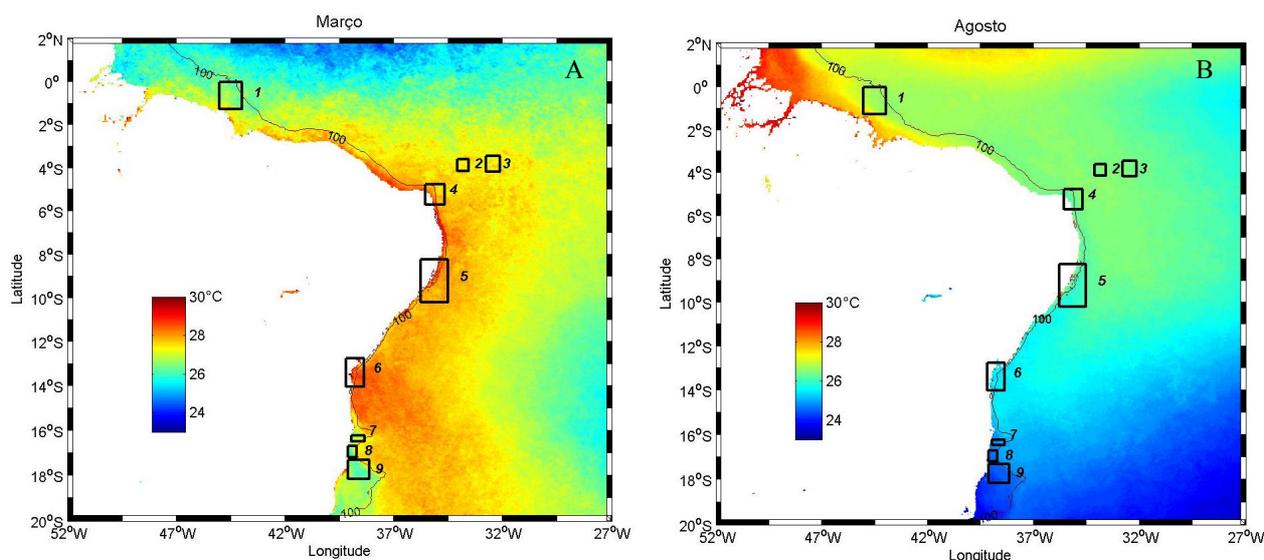
Os dados da TSM (OISST V2 *first-guess SST field*) usados aqui foram obtidos pelo sensor AVHRR a bordo dos satélites da série NOAA. Os dados são referentes à versão mais atual (versão 5) do banco de dados global NODC/RSMAS AVHRR *Pathfinder*. Este banco consiste em uma base de dados do sensor AVHRR, para estudos globais do clima, disponível entre 1985 e 2004. Para este trabalho, foram utilizados os dados mensais e da climatologia de janeiro de 1985 a dezembro de 2004, ambos com resolução espacial de 4 km. Estes dados são processados usando o algoritmo *Non Linear Sea Surface Temperature* (NLSST). Este algoritmo é uma modificação do *Multichannel Sea-surface Temperature* (MCSST), que apresentava estimativas pouco confiáveis para atmosferas muito úmidas ou muito frias e secas (Souza et al., 2005). O NLSST utiliza as temperaturas de brilho dos canais 4 (10.3-11.3  $\mu\text{m}$ ) e 5 (11.5-12.5  $\mu\text{m}$ ) do AVHRR, em três diferentes regimes de vapor da água (Vazquez, 2004), gerando estimativas coerentes e comparáveis com os dados de TSM coletados *in situ* (Souza et al., 2005). Os valores gerados podem variar entre -3 e 35°C, com acurácia de 0.3-0.5°C e nível de quantização de 10 bits.

Os dados de vento na superfície do mar usados aqui fazem parte do banco NCEP-DOE *Reanalysis 2*. Estes dados são determinados a partir de uma combinação de modelos numéricos atmosféricos com dados coletados por diferentes fontes como satélites, estações meteorológicas, bóias de deriva e fundeadas, navios de pesquisa e navios de oportunidade. Foram utilizadas médias mensais de 1985 a 2004 das componentes zonal (u) e meridional (v) na superfície do oceano, com resolução espacial de 2,5° lat/long. A partir das médias mensais foram calculadas as médias climatológicas referentes ao período de estudo.

Posteriormente, a partir dos dados mensais e das médias climatológicas foram calculadas as anomalias da TSM (ATSM) e da magnitude do vento das componentes zonal e meridional. A análise destes campos de anomalia permite identificar eventos anormais quando comparados às médias climatológicas (Pezzi e Souza, 2005). Em seguida, os dados de anomalia foram filtrados com um filtro de média móvel de três pontos para suavizar a série e facilitar a interpretação e visualização dos dados. Os resultados das anomalias são apresentados juntamente com o Índice Multivariado de “*El Niño – Oscilação Sul*” (*Multivariate ENSO Index* - MEI). O MEI leva em consideração seis variáveis observadas sobre a região do Pacífico Equatorial, são elas: TSM, pressão ao nível do mar, componente

zonal e meridional do vento na superfície do mar, temperatura do ar na superfície e cobertura de nuvens (NOAA, 2006). O índice existe para o período de 1950 a 2006, e cada valor corresponde a estações bi-mensais ao longo do ano. Os valores positivos representam o fenômeno *El Niño*, enquanto os negativos representam a *La Niña*.

As áreas escolhidas para este estudo representam as áreas de ocorrência da maior parte dos corais do Brasil (MMA/SBF, 2003) e distribuem-se entre a região norte e nordeste do país e, com exceção da Baía de Todos os Santos, todas as demais áreas são Unidades de Conservação. A **Figura 1** mostra a localização e identificação destas áreas.



**Figura 1** - Localização das nove áreas de estudo (caixas) sobrepostas às imagens climatológicas de TSM (°C) representando o verão (A) e o inverno (B). As caixas representam o tamanho de cada área. O nome da área em cada área é apresentado na **Tabela 1**.

O tamanho das áreas de estudo (**Tabela 1**) foi determinado basicamente a partir do Atlas dos Recifes de Coral nas Unidades de Conservação Brasileiras (MMA/SBF, 2003).

**Tabela 1** - Áreas de estudo de norte para sul.

caixa	nome	área (km <sup>2</sup> )
1	Parque Estadual Marinho do Parcel de Manuel Luís	2592
2	Reserva Biológica do Atol das Rocas	576
3	Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha	960
4	Área de Proteção Ambiental Recife dos Corais	1932
5	Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais	5040
6	Baía de Todos os Santos	2088
7	Parque Municipal do Recife de Fora	312
8	Reserva Extrativista de Corumbau	484
9	Parque Nacional Marinho dos Abrolhos	1748

### 3. Resultados e discussão

Examinando os dados mensais de TSM (não apresentados), ATSM e vento, foi possível estabelecer diferenças no comportamento dessas variáveis entre as áreas de estudo, principalmente naquelas localizadas mais ao sul (6, 7, 8 e 9). Desta forma, os resultados por

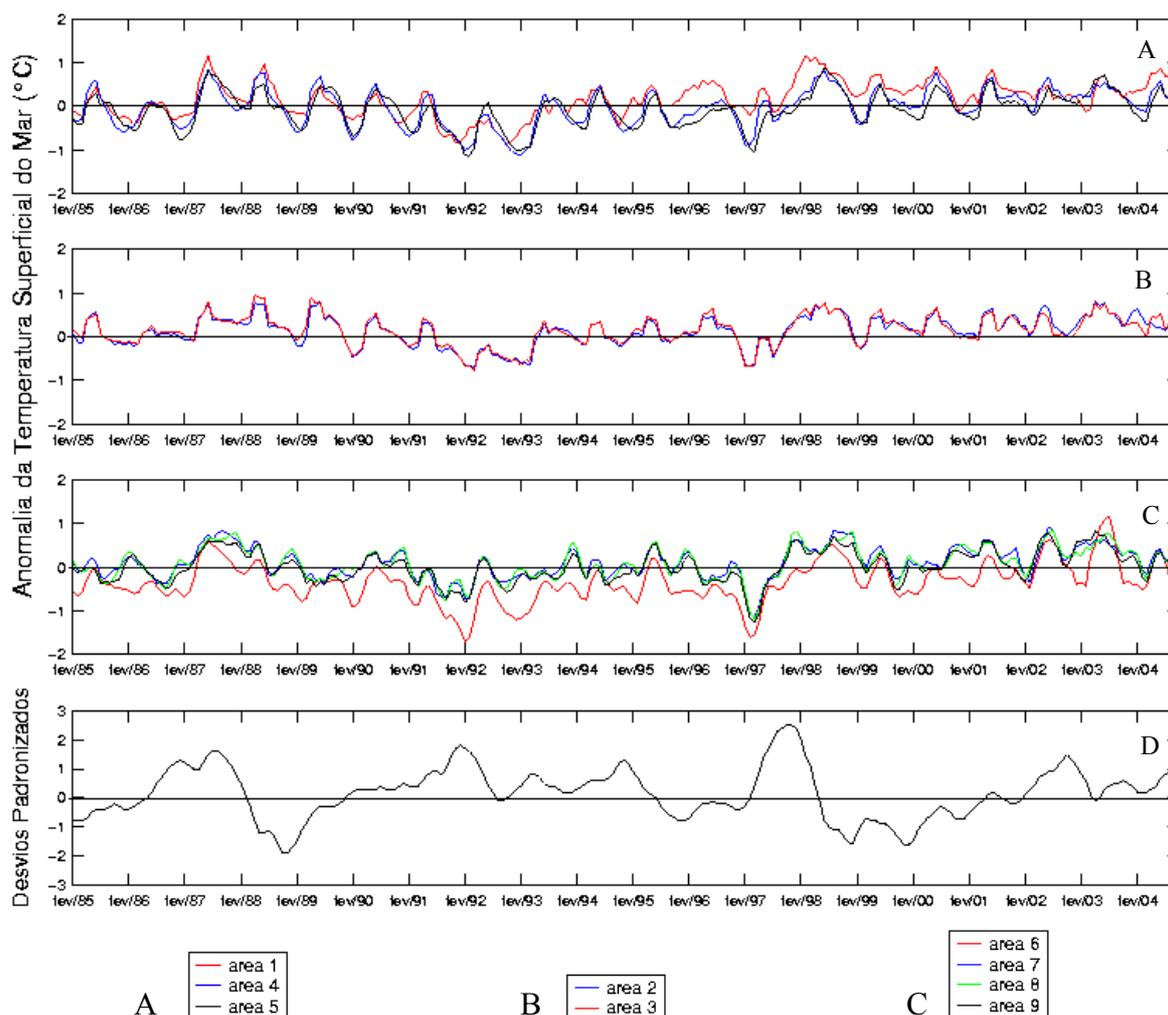
área são apresentados em três gráficos. O gráfico A das **Figuras 2 a 4** apresenta as variáveis para as áreas de estudo 1, 4 e 5, localizadas mais ao norte do Brasil e sobre a plataforma continental. O gráfico B das **Figuras 2 a 4** corresponde às áreas de estudo 2 e 3, localizadas fora da plataforma continental, em região oceânica. O gráfico C nas **Figuras 2 a 4** corresponde às áreas 6, 7, 8 e 9, localizadas mais ao sul e sobre a plataforma continental.

As séries de tempo da ATSM são apresentadas na **Figura 2**, juntamente com o índice MEI. O principal modo de variabilidade encontrado nos dados de ATSM corresponde ao sinal anual, ainda fortemente presente nas séries apesar da maior parte deste modo ter sido retirado dos dados durante o cálculo das ATSMs. Isso é especialmente evidente nas áreas localizadas na região norte (**Figura 2 A**). Já a menor variabilidade é observada para as áreas de estudo 2 e 3, localizadas em região oceânica (**Figura 2 B**) possivelmente sob influência do braço sul da Corrente Sul Equatorial (Lumpkin e Garzoli, 2005).

As áreas de estudo localizadas mais ao sul (**Figura 2 C**) possuem uma maior amplitude de variação ATSM (cerca de 2°C). Essas áreas estão sob influência principalmente das águas da plataforma e da Corrente do Brasil. Percebe-se também que, para o período compreendido entre fevereiro de 1989 e fevereiro de 1997, há um decréscimo nos valores de ATSM, principalmente para a área de estudo 6 (**Figura 2 C**). Dentre as áreas de estudo, a área 6 apresenta os menores valores de ATSM bem como o maior valor de TSM referente a média climatológica de 29,2°C para o mês de abril.

Percebe-se ainda que os dois eventos mais fortes de *El Niño* (1986/1988 e 1997/1998) resultam geralmente em ATSMs positivas em todas as áreas de estudo com um pequeno atraso de tempo (**Figura 2**). Observa-se que para as áreas de estudo 1, 4 e 5 (**Figura 2 A**) a duração do sinal na ATSM foi menor, porém com valores mais elevados. No Brasil, foram registrados branqueamentos em decorrência do *El Niño* de 1997/1998 no litoral norte do Estado da Bahia (Dutra, 2000; Kelmo et al., 2003), próximo à área de estudo 6, como também no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (área 9) (Leão, comunicação pessoal). Nesta área cerca de 50% das espécies de coral *Mussismilia hispida*; 91% de *Agaricia agaricites*; e 25% de *Siderastrea stellata* sofreram branqueamento (AIMS, 2006). Kelmo (2004, 2006) reportou também a mortalidade em massa de ascídias e briozoários na região norte do Estado da Bahia. A duração do *El Niño*, segundo o índice MEI, foi de aproximadamente 12 meses, entre janeiro de 1998 a janeiro de 1999 (**Figura 2 C**).

Observa-se ainda na **Figura 2** o *El Niño* de 2003, embora com menor intensidade e uma maior defasagem no tempo, foi registrado também branqueamentos nos corais das áreas de estudo 6 e 9 (Kikuchi et al, 2003). Anomalias negativas de TSM podem também ser observadas, principalmente durante o período entre o inverno de 1991 e verão de 1993 e verão de 1997.



**Figura 2** - Séries de tempo de ATSM (painéis superiores) e índice MEI (painel inferior).

Os campos de anomalia da componente zonal e meridional do vento são apresentados nas **Figuras 3** e **4**, respectivamente. Em função da resolução espacial dos dados de reanálises, as áreas de estudo 7, 8 e 9 referem-se à mesma posição geográfica. Desta forma os resultados mostrados apresentam apenas da área 9 como representante das áreas 7 e 8.

Novamente, a maior variabilidade das séries está relacionada ao modo anual, corroborando as observações descritas por Baptista (2000) em estudo sobre a variabilidade do vento no Oceano Atlântico Tropical e Sul utilizando dados do escaterômetro a bordo do satélite ERS. A variabilidade anual foi determinada por meio de análise harmônica e está associada a máxima migração meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Ainda de acordo com este estudo, as maiores variações anuais na amplitude da magnitude do vento ocorrem na região do Atlântico Tropical. Este padrão de variação foi também observado no presente estudo, com maior amplitude da componente zonal do vento (3 m/s) na área de estudo 2 e da componente meridional (4 m/s) na área de estudo 3 (**Figuras 3** e **4**).

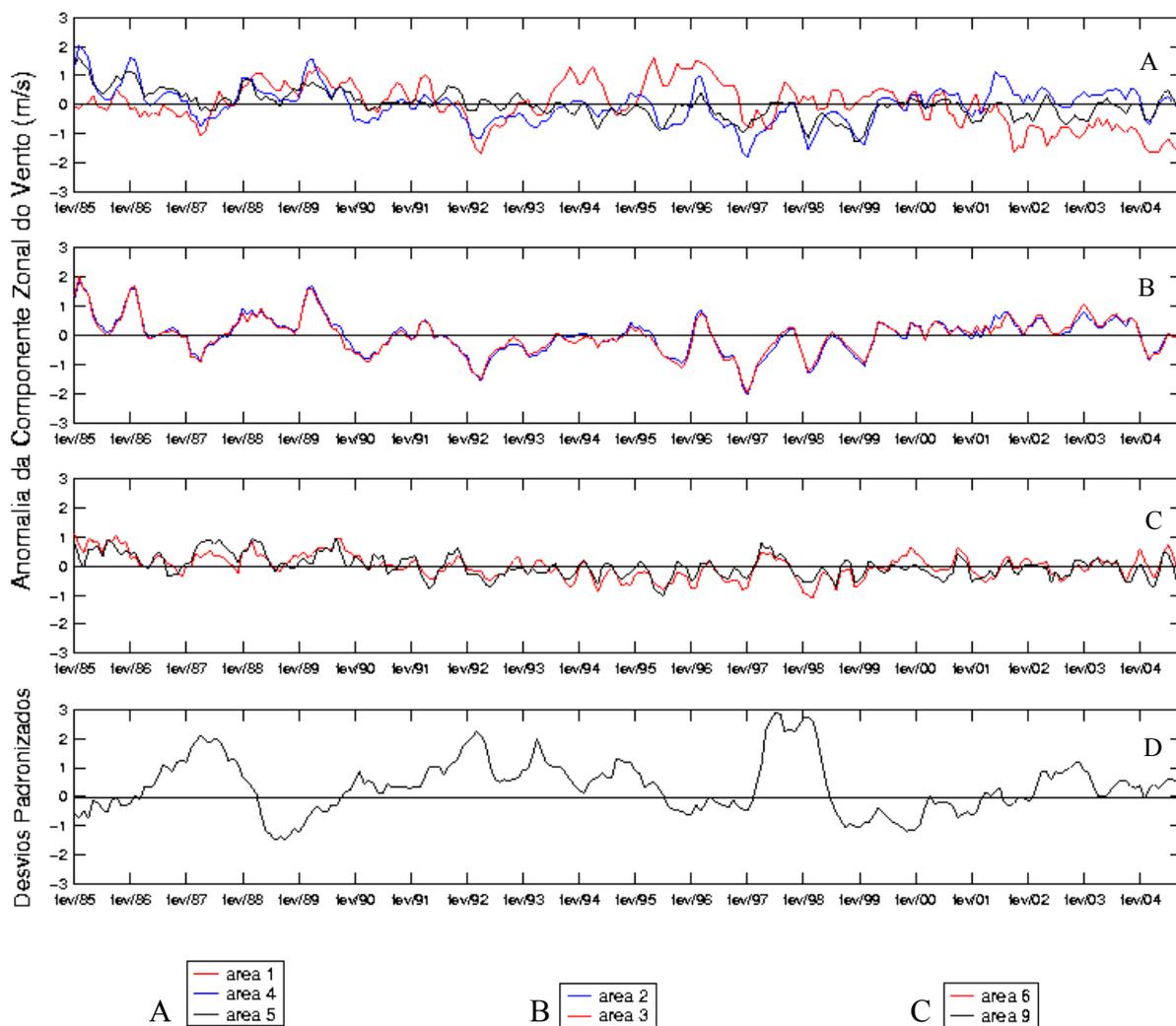
A análise dos dados de vento mostra também uma maior variação da componente meridional em relação à componente zonal em praticamente todas as áreas de estudo. Não foi observada uma relação visual entre as anomalias dos campos de vento e o índice MEI.

Para a região norte e sobre a plataforma continental (**Figuras 3 A** e **4 A**) observa-se uma maior consistência na variabilidade da componente meridional do vento em relação à zonal. A amplitude de variação das componentes pouco se diferencia entre as regiões. Destaca-se na

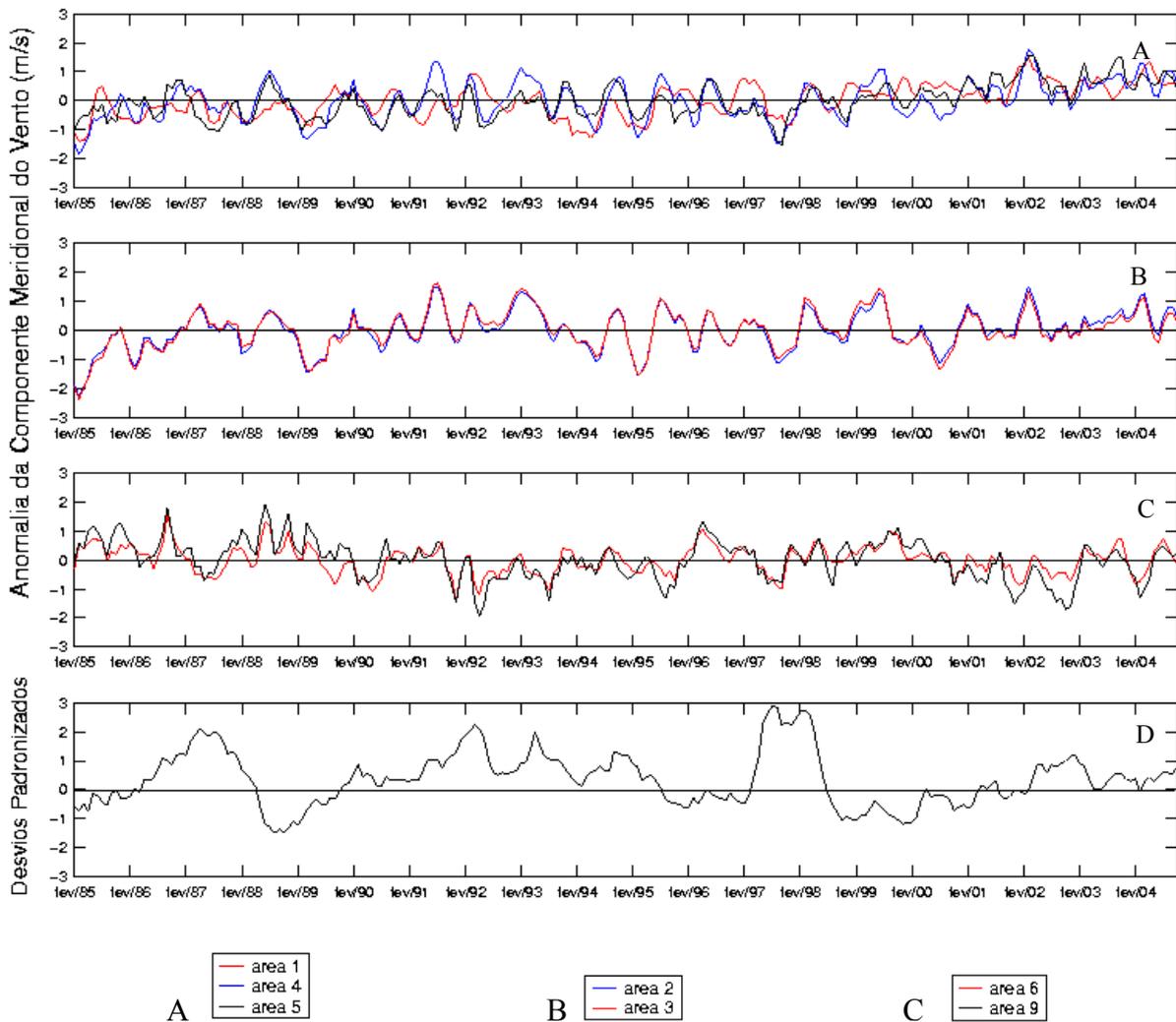
análise da componente zonal da área 1 (extremo norte do Brasil) que essa apresenta os maiores valores de anomalia positiva em relação as demais áreas de estudo.

As áreas de estudo 2 e 3 apresentam o mesmo comportamento tanto para a componente zonal quando meridional do vento (**Figuras 3 B e 4 B**). A variabilidade da componente meridional parece ser um pouco maior do que da componente zonal, principalmente para o período entre fevereiro de 1990 e fevereiro de 1995. Nesse período, as componentes parecem ter comportamento inverso, com anomalias negativas para o vento zonal e positivas para o vento meridional. Contudo, os valores de amplitude das anomalias são praticamente iguais.

A região mais ao sul apresenta as menores anomalias do vento, sendo que a componente meridional possui maior amplitude (chegando a 4 m/s) para as áreas de estudo 7, 8 e 9 (**Figura 3 C e 4 C**).



**Figura 3** - Séries de tempo da anomalia da componente zonal do vento (painéis superiores) e índice MEI (painel inferior).



**Figura 4** - Séries de tempo da anomalia da componente meridional do vento (painéis superiores) e índice MEI (painel inferior).

#### 4. Conclusões

Neste estudo, séries de tempo de vinte anos de ATSM e vento foram analisadas com o objetivo de caracterizar suas variabilidades em áreas de recifes de coral no Brasil. Foi possível identificar uma coerência entre os dados de ATSM e os eventos mais extremos de *El Niño* de 1986/1988 e 1997/1998. O evento de 1998 acarretou mortalidade em massa das espécies ligadas às comunidades de coral no nordeste do Brasil conforme descrito por Kelmo (2003, 2004, 2006). Tanto para ATSM como para o vento, o principal modo de variabilidade encontrado está relacionado ao ciclo anual. Esse ciclo está presente nos dados de anomalia devido a sua variabilidade interanual. Para trabalhos futuros sugere-se o tratamento das séries de tempo de variáveis ambientais com técnicas estatísticas como correlações cruzadas, espectro cruzado e funções ortogonais empíricas, e a utilização de dados biológicos disponíveis para as áreas de ocorrência de coral no período estudado.

**Agradecimentos.** A primeira autora agradece o suporte financeiro da CAPES. Esse trabalho é uma contribuição ao projeto PRO-ABROLHOS (CNPq No. 420219-2005-6). Os dados usados aqui foram fornecidos pelo programa NOAA *Pathfinder* e pelo NCEP-DOE.

## Referências

- Australian Institute of Marine Science - AIMS. **The 1997-1998 mass bleaching event around the world**. Disponível em: <<http://www.aims.gov.au/pages/research/coral-bleaching/1997-98-mbe/mbe-03.html>>. Acesso em: 7 Nov. 2006.
- Baptista, G. A. **Uma análise dos campos de vento de superfície sobre o Oceano Atlântico Tropical e Sul usando dados do escaterômetro do ERS**. 2003. 129 p. (INPE- 9607-TDI/840). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.
- Bellwood, D. R.; Hughes, T. P.; Folke, C.; Nyström, M. Confronting the coral reef crisis. **Nature**, v. 249, p. 827-833, June 2004.
- Brown, B. E. Coral bleaching: causes and consequences. **Coral Reefs**, v. 16, p. 129-138, 1997.
- Dutra, L. X. C. **O branqueamento de corais hermatípicos no litoral norte da Bahia associado ao evento El Niño 1998**. 2000. 78p. Monografia (Bacharelado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2000.
- Kelmo, F.; Attrill, M. J.; Jones, M. B. Effects of the 1997–1998 El Niño on the cnidarian community of a high turbidity coral reef system (northern Bahia, Brazil). **Coral Reefs**, v. 22, p. 541-550, 2003.
- Kelmo, F.; Attrill, M. J.; Gomes, R. C. T.; Jones, M. B. El Niño induced local extinction of coral reef bryozoan species from Northern Bahia, Brazil. **Biological Conservation**, v. 118, p. 609–617, 2004.
- Kelmo, F.; Attrill, M. J.; Jones, M. B. Mass mortality of coral reef ascidians following the 1997/1998 El Niño event. **Hydrobiologia**, v. 555, p. 231–24, 2006.
- Kikuchi, R. K. P.; Leão, Z. M. A. N.; Oliveira, D. M.; Dutra, L. X. C.; Cruz, I. C. **Branqueamento de corais nos recifes da Bahia associado aos efeitos do El Niño 2003**. Disponível em: <[http://www-personal.une.edu.au/~lximenes/publications/Abequa\\_Kikuchi\\_et\\_al\\_2003.pdf](http://www-personal.une.edu.au/~lximenes/publications/Abequa_Kikuchi_et_al_2003.pdf)>. Acesso em: Fev. 2006.
- Lumpkin, R.; Garzoli, S. L. Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean. **Deep-Sea Research I**, v. 52, p. 495–518, 2005.
- McClanahan, T.; Polunin, N.; Done, T. **Ecological states and the resilience of coral reefs**. Disponível em: <<http://www.consecol.org/vol6/iss2/art18>>. Acesso em: 28 Fev. 2006.
- National Oceanographic Data Center (NOAA). **Multivariate ENSO Index (MEI)**. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/>>. Acesso em: 8 Nov 2006.
- Pezzi, L. P.; Souza, E. B. O uso da temperatura da superfície do mar em estudos climáticos. In: Ronald Buss de Souza. (Org.). **Oceanografia por Satélites**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, v. 1, p. 118-133.
- Ministério do Meio Ambiente/ Secretaria de Biodiversidade e Florestas - MMA/SBF. **Atlas dos Recifes de Coral nas Unidades de Conservação Brasileiras**. Brasília, 2003. 47 p. Contém 38 mapas.
- Souza, R.B.; Lorenzetti, J.A.; Lucca, E.V.D. Estimativas da temperatura da superfície do mar através do sensoriamento remoto no infravermelho. In: Ronald Buss de Souza. (Org.). **Oceanografia por Satélites**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, v. 1, p. 102-116.
- Trenberth, M. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 2771-2777, 1997.
- Vazquez, J. **AVHRR Oceans Pathfinder Sea Surface Temperature Data Sets**. Disponível em: <[http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/DATASET\\_DOCS/avhrr\\_pathfinder\\_sst.html](http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/DATASET_DOCS/avhrr_pathfinder_sst.html)>. Acesso em: Fev. 2006.
- Walther, G. L.; Post, E.; Convey, P.; Menzel, A.; Parmesan, C.; Beebee, T. J. C.; Fromentin, J. M.; Hoegh-Guldberg, O.; Bairlein, F. Ecological responses to recent climate change. **Nature**, v. 416, p. 390-395, Mar. 2002.