

Variabilidade do ciclo anual das feições oceanográficas com imagens de cor do oceano e temperatura na região de Cabo Frio - RJ

Amália Maria Sacilotto Detoni¹
Carlos Alberto Eiras Garcia¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande – FURG
Av. Itália Km 8 – 96201-900 – Rio Grande – RS, Brasil
amaliadetoni@yahoo.com.br
dfsgar@furg.br

Abstract. The coastal region of Cabo Frio presents as main hydrological characteristic the occurrence of the upwelling phenomena where subsurface waters are upwelled towards the euphotic layer. Moreover, cyclonic eddies generated by the Brazil Current (CB) instability induce shelf break upwelling along the Cabo de São Tomé (22°S) and Cabo Frio (23°S) region. In this study, we used chlorophyll concentration and sea surface temperature fields, derived from MODIS-Aqua sensor, and winds data from QuikScat scatterometer, in order to study spatial and temporal variability of thermal and ocean color features from the Cabo Frio region (18°S – 26°S / 035°W – 046°W). The annual cycle of both thermal and ocean color patterns from satellite data were determined in the region using monthly composited images of chlorophyll and sea surface temperature from June 2002 to July 2008 (6 years). The main variability of both thermal and ocean color patterns are associated with the seasonal cycle, as expected, but also with surface Ekman dynamics and Brazil Current meso-scale activity in certain regions.

Palavras-chaves: MODIS-Aqua, upwelling region, temporal series, annual cycle variability, MODIS-Aqua, região de ressurgência, séries temporais, variabilidade do ciclo anual.

1. Introdução

As feições oceanográficas de meso-escala no sudeste brasileiro são decorrentes da dinâmica associada à Corrente do Brasil (CB). Esta é a corrente de contorno oeste que flui ao largo da costa brasileira onde são frequentemente observados meandros e vórtices (Silveira *et al.*, 2000) na região de Cabo Frio (23°S) e Cabo de São Tomé (22°S).

Essa região é também caracterizada pela ocorrência de ressurgência costeira e, devido à estreita plataforma continental, sofre influência da dinâmica da CB, a qual induz ressurgência de quebra de plataforma. Desta forma, a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), massa de água fria, menos salina e rica em nutrientes, ressurgente na costa e em regiões rasas da plataforma (Calado, 2006). Como consequência desta dinâmica, vórtices ciclônicos são gerados que, aliados com a ressurgência costeira gerada pelos ventos de Nordeste e Leste, fertilizam a base da zona eufótica com nutrientes inorgânicos, determinando um enriquecimento das águas costeiras (ressurgência costeira) e modificando temporariamente a típica condição oligotrófica das áreas oceânicas (ressurgência de quebra de plataforma), com respectivo aumento da produtividade primária fitoplanctônica (González-Rodríguez *et al.*, 1992).

A cobertura fornecida pelo sensoriamento remoto orbital tem a capacidade de fornecer dados sinópticos em escala espacial que possibilita investigar a variabilidade temporal e espacial das feições oceanográficas. Esta cobertura é muito maior que qualquer cobertura obtida por outros meios convencionais de obtenção de dados.

Imagens orbitais da cor do oceano e de temperatura da superfície do mar são ferramentas importantes para, conjuntamente com dados *in situ*, determinar os padrões de circulação da CB, monitorar ressurgências costeira e de quebra de plataforma, meandros e vórtices de meso-escala, assim como a intrusão de águas frias, menos salinas e ricas em nutrientes (Kampel,

2003). A combinação entre dados termais e da cor do oceano permite obter informações dessas estruturas em bases diárias, oferecendo a oportunidade de se comparar bi-dimensionalmente e simultaneamente a variabilidade biológica (pigmentos) e física (termal) na superfície do mar (Kampel & Souza, 2005).

Neste trabalho, através de dados de concentração da clorofila *a* e temperatura da superfície do mar derivados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – Aqua* (MODIS-Aqua), tem por objetivo avaliar a variabilidade temporal e espacial das feições oceanográficas de meso-escala e da ressurgência costeira, características da região de Cabo Frio (18°S-26°S / 35°W-46°W). A partir de análise estatística será verificada a ocorrência de uma frequência padrão do ciclo anual dessas estruturas observadas. Para tal, serão analisadas imagens médias mensais e semanais de cor do oceano e imagens médias mensais de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) para o período total de seis anos (junho de 2002 a julho de 2008).

2. Metodologia

2.1 Imagens de Satélite *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Aqua*

Para análise da variabilidade da concentração de clorofila *a* (em escala logarítmica), foram utilizadas 72 imagens de média mensais e 276 de médias de 8 dias, Level-3, do sensor MODIS-Aqua, com resolução de 4x4 km², cujos dados já processados pela NASA, apresentam-se armazenados no Banco de Dados de imagens do Laboratório de Sensoriamento Remoto da FURG. As 72 imagens mensais da temperatura de superfície do mar (°C) também foram originadas do sensor MODIS-Aqua e capturadas da mesma forma que as imagens de cor do oceano. O conjunto de dados disponibilizados pela NASA corresponde ao período de julho de 2002 a junho de 2008 (6 anos), os quais foram reamostrados em subconjuntos correspondentes à área de estudo de 18-26°S e 35-46°W para posteriores análises.

A partir destes subconjuntos de dados digitais, foram calculadas as imagens média, desvio padrão e número de pixels válidos tanto da concentração de clorofila *a* como da temperatura de superfície do mar, relativo ao período total de 6 anos. Para este mesmo período também foi calculado a climatologia mensal, isto é, as médias e desvios padrões para cada mês, referente aos 6 anos de dados. Os pixels correspondentes a terra ou cobertura de nuvens foram mascarados e convertidos a valores não numéricos.

2.2 Dados de vento de superfície do mar

Os dados de vento de superfície são derivados do radar escaterômetro SeaWinds a bordo do satélite QuikScat da NASA. A resolução espacial é de 0,25° x 0,25° de latitude/longitude e resolução temporal de uma semana. As componentes zonal e meridional do vento foram calculadas para toda a região, mas apenas em locais próximos à Cabo Frio realizamos análises mais detalhadas. Series temporais da componente meridional do vento foram geradas para comparações com as séries temporais do logaritmo da clorofila média de 8 dias. A variabilidade do vento na região de Cabo Frio apresenta forte componente meridional com ventos de nordeste na maior parte de todo o período analisado. Os dados foram filtrados com um filtro de média de 23 semanas (6 meses) a fim de remover as altas frequências e realçar o sinal anual do vento. Da mesma forma que para os dados de vento, os dados das imagens de concentração de clorofila *a* de 8 dias, foram filtrados com um filtro de 23 semanas (6 meses).

2.3 Modelo Empírico do Ciclo Anual

O modelo do ciclo anual da anomalia do logaritmo da concentração de clorofila e temperatura superficial do mar é baseado numa equação cossenoidal de sinal contínuo e periódico, ajustado a cada pixel das imagens obtidas (Garcia et al., 2004). As amplitudes e as fases do modelo para cada pixel da subimagem, assim como os coeficientes de determinação

(r^2) foram calculados para a região sob investigação. Consideramos que o modelo explica o ciclo anual da clorofila somente para coeficientes de determinação (r^2) maiores que 0,4 para todos os pixels das subimagens.

3. Resultados e Discussão

Para o período todo analisado, altas concentrações de clorofila foram observadas ao longo da água costeira da região de estudo, porém concentrações maiores são encontradas aos redores de Cabo de São Tomé (22°S), propagando para baixas concentrações de clorofila em direção à quebra de plataforma com concentrações menores em águas oceânicas oligotróficas. Nos meses de agosto e setembro, observam-se maiores gradientes nas imagens de clorofila *a* de superfície e TSM. As imagens da concentração média bimensal de clorofila *a* e da temperatura superficial do mar, para agosto-setembro e para fevereiro-março, são mostradas na **Figura 1**.

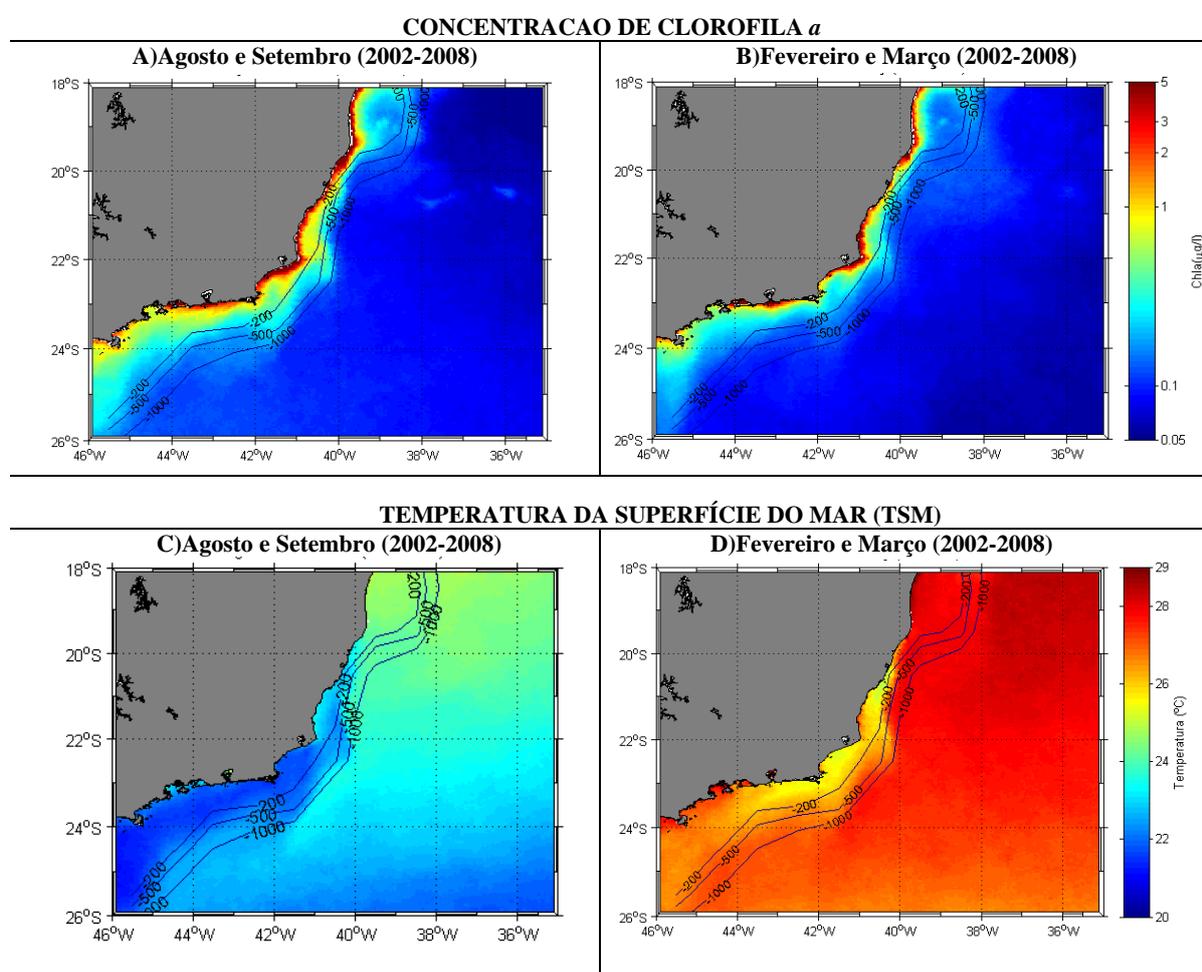


Figura 1. (A) Imagens de concentração média de clorofila *a* superficial nos meses de Agosto e Setembro e (B) clorofila superficial média dos meses de Fevereiro e Março. (C) Temperatura média da Superfície do Mar (TSM) nos meses de Agosto e Setembro e (D) temperatura média nos meses de Fevereiro e Março referente aos anos analisados (Jul/2002-Jun/2008).

Este padrão médio de clorofila segue o padrão inverso observado na imagem de temperatura média da superfície do mar (**Figura 1C e 1D**), onde menores temperaturas estão localizadas nas águas da plataforma continental ao sul da latitude 20°, e maior gradiente de temperatura na imagem correspondente ao final do inverno, equivalente ao encontrado na imagem de clorofila *a* de agosto e setembro. Maiores temperaturas de superfície são observadas em águas oceânicas, correspondentes às águas quentes e salinas da CB.

Valentin (1984 e 1992) e Gonzalez-Rodriguez *et al.*, (1992) observaram que a região costeira de Cabo Frio (23°S) apresenta, como principal característica hidrológica, a ocorrência do fenômeno da ressurgência, com ascensão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) para a camada eufótica. Essa água profunda imprime ao ambiente tropical marinho características subtropicais em razão de sua baixa temperatura (< 18°C) além de transportar para camadas iluminadas uma carga elevada de nutrientes (> 10µg/l de nitrato), proporcionando assim condições favoráveis para o desenvolvimento do plâncton e o enriquecimento da rede trófica.

Para as imagens respectivas aos meses de janeiro e fevereiro, a concentração de clorofila na região de ressurgência é menor (**Figura 1B**), enquanto um aumento na temperatura de aproximadamente 4°C pode ser observado (**Figura 1D**) na região de ressurgência costeira. Esta situação, entre o meio e final do verão, pode estar associada ao fim do processo, cujo ambiente prevalece aos maiores níveis da cadeia trófica, principalmente o zooplâncton.

3.1 Ciclo Anual

As imagens sintéticas do coeficiente de determinação (r^2) caracterizam as áreas que melhor definem a presença de um ciclo anual (**Figuras 2A e 2B**). Valores baixos são observados para a concentração de clorofila *a* (**Figura 2A**), comparado aos altos valores de r^2 da temperatura de superfície do mar (TSM) (**Figura 2B**). Isto mostra que a variabilidade anual da radiação solar incidente nos oceanos é mais determinístico do que os fatores que controlam a produtividade primária dos oceanos.

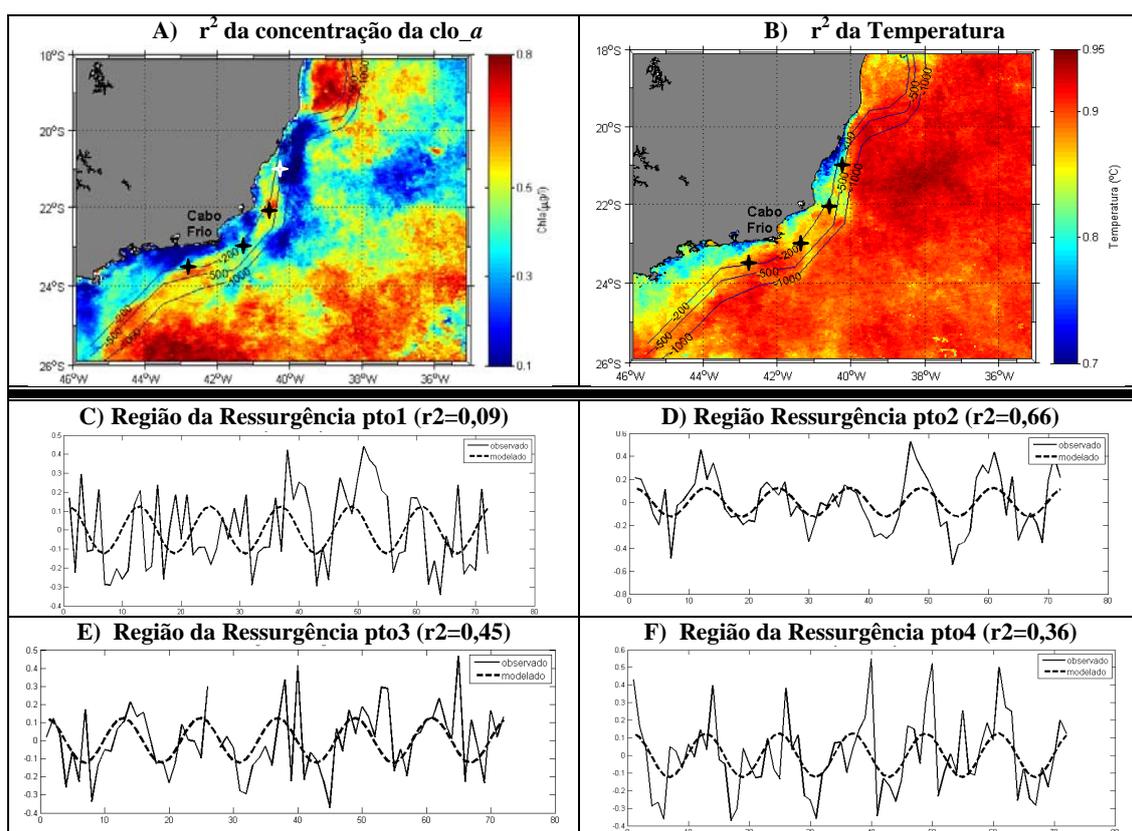


Figura 2. (A) Imagens do coeficiente de determinação (r^2) para concentração de clorofila ($\log[\text{Clo}_a]$) e (B) temperatura da superfície do mar. (C, D, E e F) Resultados da anomalia da concentração de clorofila *a* para o ciclo anual, correspondente aos quatro pontos selecionados na área de estudo apontados pelas estrelas pretas ao longo da plataforma continental, iniciando do ponto norte ao sul.

Quatro localidades, escolhidas na região costeira da área de estudo (ver **Figuras 2A e 2B**), mostram como a anomalia, tanto da concentração de clorofila como da temperatura, se

comportam ao longo dos seis anos analisados. A anomalia da temperatura, como esperado, apresentou forte correlação entre os dados observados e os modelados pelo ciclo anual ($r^2 > 0,8$), confirmando forte sinal do ciclo anual referente à bem definida variabilidade da radiação solar. As concentrações da clorofila *a*, mesmo apresentando menor sinal do ciclo anual, (ver **Figuras 2C, 2D, 2E e 2F**) apresentaram grandes variações dos valores da correlação entre os dados observados e modelados para o ciclo anual em direção norte-sul da região. A análise espectral feita pela Transformada de Fourier (não mostrada aqui) revelou nítido sinal da frequência anual por toda a região da ressurgência analisada, com exceção do ponto 1, aproximadamente na latitude 21°, ao norte de Cabo Frio (**Figura 2C**), provavelmente devido à abrupta topografia da região favorecendo à instabilidade da dinâmica da CB. Valores obtidos de produção primária marinha são, de modo geral, maiores em domínio de plataforma (águas costeiras e de ressurgência) e menores em direção ao talude. Valentin (1992) mostra que estas escalas espaciais de variabilidade biológica na área de estudo estão fortemente relacionadas com a dinâmica da circulação oceânica.

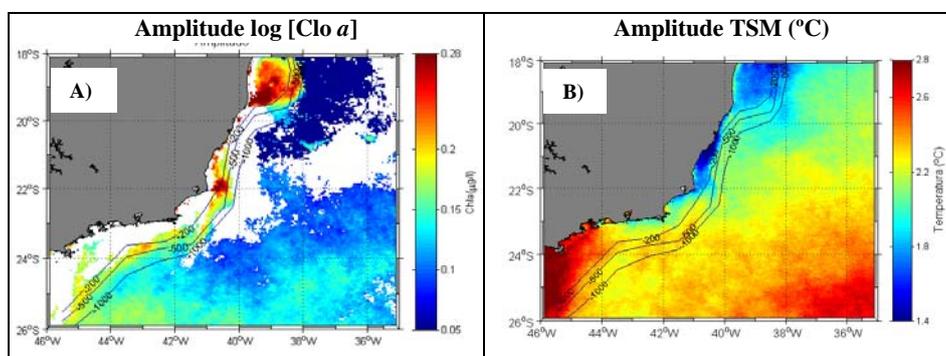


Figura 3.(A) Imagens da amplitude da anomalia de concentração de clorofila *a* e (B) de temperatura da superfície do mar. As áreas em branco mostram regiões onde inexistem ciclos anuais ($r^2 < 0,4$).

As imagens das amplitudes de clorofila *a* e temperatura da superfície do mar (TSM) (**Figuras 3A e 3B**) mostram, em média, o comportamento do modelo do ciclo anual aplicado para toda a região analisada. Os menores valores de amplitude da anomalia no campo da temperatura (**Figura 3B**) são observados ao longo da região costeira, ao norte de Cabo de São Tomé (22°S) e em direção à região oceânica, onde apresenta abrupta mudança na orientação de costa, conseqüentemente alta dinâmica da CB. Nesta região, os valores baixos de amplitude podem ser explicados devido a presença de meandros frontais da CB que ocorrem na região influenciada por processos regionais da topografia de fundo.

Calado (2006) mostra que, apesar do mecanismo dominante no fenômeno da ressurgência costeira ser aquele devido à dinâmica de Ekman causada por ventos de nordeste e leste, a formação de vórtices frontais a Cabo de São Tomé também desempenha mecanismo auxiliar à dinâmica de Ekman no processo de ressurgência costeira na região.

Observa-se que altas amplitudes do log [Clo_a] foram evidenciadas nas regiões de plataforma continental, principalmente à frente de Cabo de São Tomé, onde as imagens registram forte influência da topografia de fundo. Assim como um núcleo de alta amplitude é observado também ao norte na latitude 19°S. Esta região é influenciada pelas feições topográficas Banco de Abrolhos e Cadeia Vitória-Trindade, as quais atuam na instabilidade da CB mais ao norte desta região, onde também parecem estar associadas a valores relativamente altos da concentração de clorofila *a*.

Essas áreas apresentam características da dinâmica hidrológica, onde ocorrem variações oceanográficas como: ressurgência, favorecendo ao aumento da clorofila, normalmente ocorre no verão, ou subsidência, ou seja, a chegada da água quente (água costeira) e o recuo em profundidade da água fria proporcionando a diminuição da clorofila, normalmente no inverno.

Madruga (2003) observou que a ressurgência costeira de Cabo Frio apresenta dois ciclos: um ciclo longo sazonal, associado às variações climáticas sazonais (ocorre com maior intensidade e apresenta maior duração do vento NE durante o verão e maior frequência de passagem da frente fria no inverno); um ciclo de curto período (8-10 dias), ligado à passagem da frente fria, que faz com que o vento mude para SW, provocando, desta forma, o fenômeno inverso de subsidência. Estas feições não podem ser detectadas neste trabalho devido ao fato de que as imagens não promovem resolução temporal adequada.

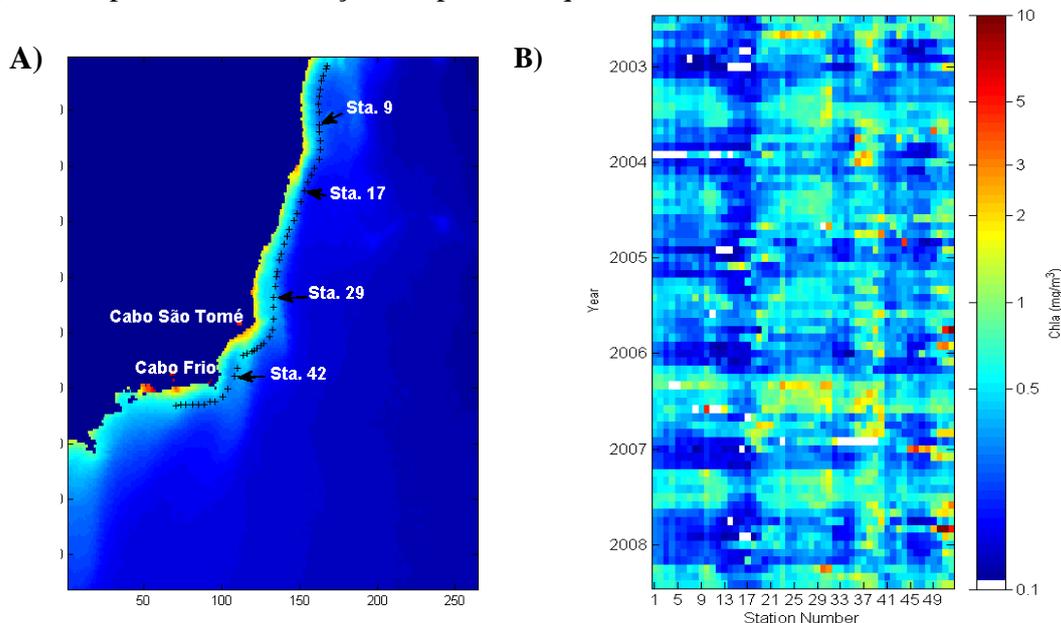


Figura 4. (A) Área referente ao local dos pontos utilizados para construção do diagrama de Hovmöller, iniciando nas estações ao norte, até sul. (B) Variação da concentração da clorofila *a* em escala logarítmica (mg/m^3) ao longo da região de ressurgência costeira (isóbata de 200 metros), para o período de 6 anos (julho de 2002 a junho de 2008), através de imagens mensais MODIS-Aqua representadas num diagrama latitudinal (Hovmöller).

O diagrama latitudinal de Hovmöller (**Figura 4B**) mostra a variabilidade anual dos dados nas áreas ao longo da região de ressurgência costeira (**Figura 4A**). Com base nas observações deste diagrama, é possível verificar forte ciclo anual principalmente nas estações 9 e 29, e sinais mais fracos do ciclo em direção sul (estação 42). As maiores concentrações da clorofila *a* são encontradas durante início da primavera e verão, principalmente no ano de 2006. Não há sinal de ciclo anual na estação 17, onde a clorofila *a* é sempre baixa. Esta área possui largura reduzida da plataforma e uma proximidade desta com o núcleo da CB, favorecendo a entrada de águas oligotróficas (ver **Figura 3**).

Esta variabilidade total dos dados pode estar relacionada à variação sazonal da formação e posição da termoclina na zona eufótica, a qual está relacionada à floração fitoplanctônica para a região de ressurgência (e.g. discrepância entre produção fitoplanctônica e profundidade da água de ressurgência). Durante o início da ressurgência (final de inverno e início da primavera), Valentin (1992) descreve que a biomassa fitoplanctônica atinge sua máxima concentração imediatamente abaixo ou acima da termoclina entre 6 a 8 dias, de acordo com a profundidade alcançada pelas águas de ressurgência (ACAS), cujo fenômeno oceanográfico é resultante do regime de vento local da região.

O campo de vento de superfície derivado dos meses agosto-setembro (**Figura 5A**) mostra ventos predominantes mais intensos na direção nordeste na costa da região de Cabo Frio. Este comportamento do campo de vento fica mais evidente quando se observa a variabilidade das componentes meridional e zonal do ponto destacado ao norte de Cabo Frio (aproximadamente 22°S) (ver **Figura 5B**). Na série temporal desse ponto ao longo dos anos analisados, a

componente meridional do vento é frequentemente negativa, o que indica forte influência do campo de vento norte nesta região, enquanto sua componente zonal apresenta maior amplitude nos dados, mas com maior magnitude do vento leste (**Figura 5B**).

Comparando-se os valores de concentração da clorofila *a* com as componentes meridional e zonal do vento, é possível observar um padrão semelhante, mas com uma pequena discrepância de tempo (**Figura 5B**). Entretanto, a correlação entre a componente zonal e a anomalia do log da clorofila *a* é maior ($r = 0,61$), comparado à correlação entre a componente meridional do vento e a clorofila ($r = 0,44$) para o ponto analisado (**Figura 5B**). Isso indica que neste ponto (região da latitude 22°S), provavelmente exista uma tendência cuja componente zonal do vento possa ser a variável responsável pela variabilidade do campo de vento acompanhada com a variação da clorofila *a* superficial.

Estas observações podem dar subsídios para explicar a dinâmica do processo de ressurgência observado na **Figura 1B** de média da concentração de clorofila *a* nos meses de fevereiro-março, onde o menor gradiente, tanto no campo da clorofila como da TSM, pode estar representando uma situação de pós-ressurgência, cujo vento nordeste apresenta menor intensidade e duração. Assim, concentrações menores de nutrientes ressurgem e a biomassa fitoplanctônica se torna limitada por nutrientes disponíveis na zona eufótica e/ou intensa pastagem.

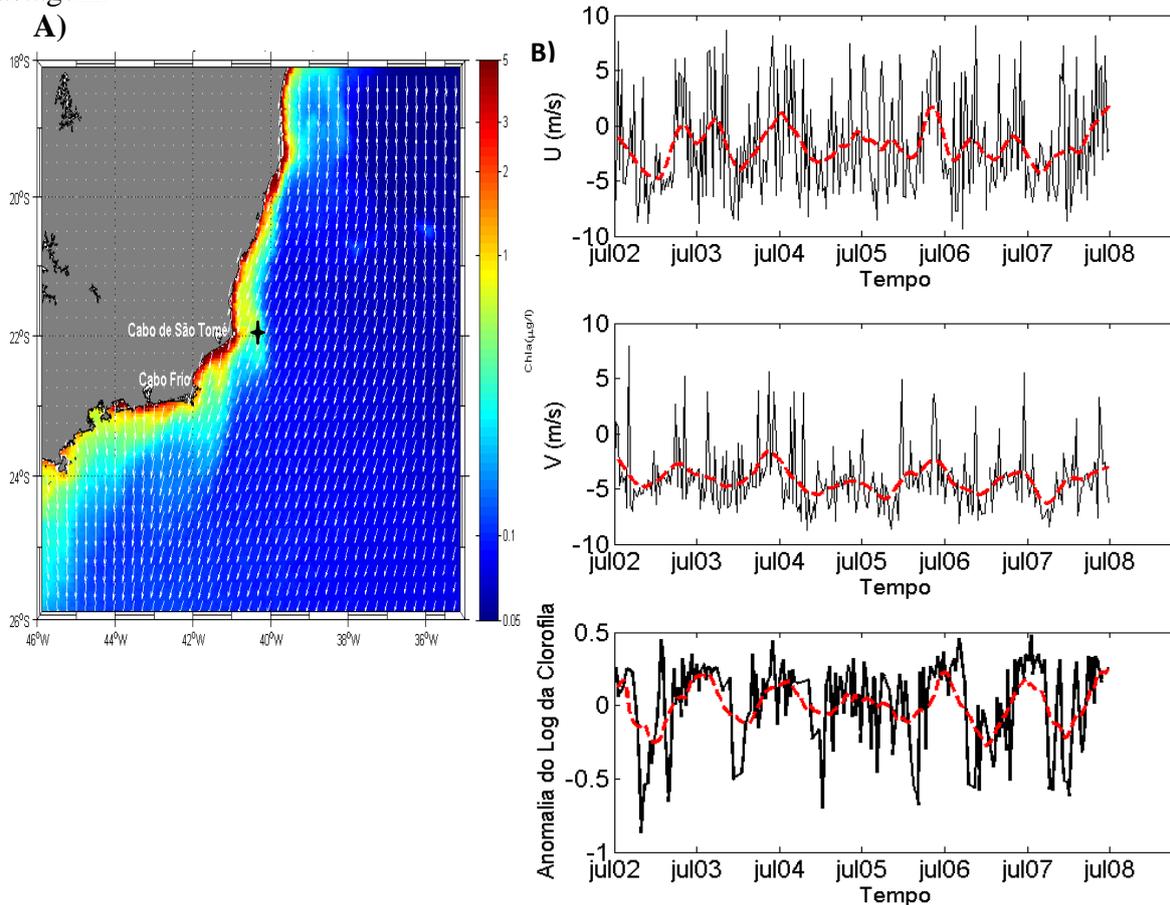


Figura 5. (A) Imagem bimestral de concentração de clorofila *a* dos meses de Agosto-Setembro com os vetores de direção do campo de vento regional médio (dados climatológicos semanais) para estes mesmos meses. (B) Séries temporais das componentes zonal (*u*) e meridional (*v*) do vento superficial ($m.s^{-1}$) (dados semanais) e série temporal da anomalia da concentração de clorofila *a* média ($\log [clo] mg.m^{-3}$) (dados de 8 dias) referente ao ponto destacado em preto na imagem, para o período total (seis anos). Os dados originais estão em cinza e os sinais filtrados para 6 meses estão em vermelho.

4. Conclusões

Nas imagens referentes a agosto e setembro observam-se maiores concentrações de clorofila *a* e menores temperaturas localizadas na região da ressurgência costeira. Isto pode representar uma situação de ressurgência parcial (final de inverno e início de primavera), onde a ACAS promove a formação e posição da termoclina, favorecendo ao aumento da biomassa fitoplanctônica em sub-superfície. As imagens da temperatura de superfície do mar apresentaram forte ciclo anual acompanhando a variabilidade anual climática da radiação solar, tanto em regiões oceânicas como de ressurgência. Nas imagens de clorofila *a*, as regiões de ressurgência apresentaram moderado sinal do ciclo anual e esta variabilidade pode ser explicada devido à variação do regime de ventos que podem influenciar na posição e/ou presença da termoclina, favorecendo o enriquecimento da camada eufótica com conseqüências na biomassa fitoplanctônica dessa região. Adicionalmente, o ciclo anual tanto para clorofila como para temperatura, está associado à dinâmica da CB e à formação de meandros e vórtices ciclônicos, principalmente na região de Cabo de São Tomé, onde ocorrem formações de vórtices e meandros frontais, decorrentes da instabilidade da CB, o que provavelmente, junto ao vento regional predominante de nordeste, intensifica o fenômeno da ressurgência costeira.

Referências Bibliográficas

- Calado, L. Dinâmica da interação da atividade de meso-escala da Corrente do Brasil com o fenômeno da ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ. **Tese de Doutorado**. Instituto Oceanográfico. São Paulo, Universidade de São Paulo. 184p. 2006.
- Garcia, C. A. E.; Sarma, Y. V. B.; Mata, M. M.; Garcia, V. M. T., Chlorophyl, Variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence Region. **Deep-Sea Research Part II**, v. 51, p. 159-172. 2004
- Gonzalez-Rodriguez, E.; Valentin, J. L.; André, D. L.; Jacob, S. A. Upwelling and downwelling at Cabo Frio (Brazil): comparison of biomass and primary production responses. In **Journal of Plankton Research**, v. 14, p. 289-306. 1992.
- Kampel, M. Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor o oceano e dados *in situ* na costa sudeste brasileira. **Tese Doutorado**. Instituto Oceanográfico. São Paulo, Universidade de São Paulo. 311p. 2003.
- Kampel, M.; Souza, R. B. Observação por satélite de um vórtice de núcleo quente na Zona de Confluência Brasil-Malvinas durante a Operação Antártica XXI. In **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia: ANPEC, 16-21, abril 2005, Anais XII Simpósio de Sensoriamento Remoto p. 3643-3650.
- Madruça, L. J. Avaliação da influência da radiação sola na variabilidade da biomassa fitoplanctônica superficial do oceano Atlântico Sudoeste. **Tese Doutorado**. Instituto de Biociências. São Paulo, Universidade de São Paulo. 2003.
- Silveira, I. C. A.; Schmidt, A. C. K.; Campos, E. J. D. ; Godoi, S. S. ; Ikeda, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. Instituto Oceanográfico. São Paulo, Universidade de São Paulo. **Revista Brasileira de oceanografia**. V. 48(2), p. 171-183. 2000.
- Valentin, J. L. Spatial structure of zooplankton community in the Cabo Frio region (Brazil) influenced by coastal upwelling. In **Hydrobiologia**, v. 113, p. 183-199. 1984.
- Valentin, J. L. Modeling of the vertical distribution of marine primary biomass in the Cabo Frio upwelling region. In **Ciência e Cultura**, v. 44 (2/3), p. 178-183. 1992.