

Estudo da variabilidade de parâmetros físicos e biológicos estimados por satélite no Atlântico Sudoeste através de Análises Empíricas Ortogonais

Flavia Tavares Delcourt
Milton Kampel

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil.
{delcourt, milton}@dsr.inpe.br

Abstract. This work studies the variability of the South Atlantic Ocean based on a multivariate methodology of empirical orthogonal functions (EOF) applied to satellite derived chlorophyll concentration (CSM) and sea surface temperature (TSM) data. Those parameters are also analyzed relating its variability to the oceanographic processes, as boundary currents, westward propagating planetary waves and river discharges occurring into specific regions. Results are consistent with those already described in the literature. The strong seasonal cycle is confirmed in the analysis of non-normalized sea surface temperature and chlorophyll time-series and might mask lower signals. There are notable differences between the continental shelf and the offshore. The Rio da Prata and the Lagoa dos Patos seasonal signals are detected in the second EOF and are better characterized in the analysis of anomaly time-series. In the analyses of data, the anomalies indicate interannual variability, probably influenced by the occurrence of low periodicity levels known as Rossby waves. The semiannual periodicity found by spectral analysis suggests an influence of coastal discharges associated with local rainfall. The correlation between TSM and CSM data also reflects a strong relationship with physical driving processes, such as the South Atlantic Convergence Zone displacement, the general surface circulation and coastal discharges in some zones of the ocean.

Keywords: Remote sensing, variability analysis, physical processes, sensoriamento remoto, análise de variabilidade, processos físicos.

1. Introdução

Considerando o padrão de circulação oceânica superficial apresentado por Peterson e Stramma (1991) para a bacia do Oceano Atlântico Sul (OAS), a Corrente Sul-Equatorial (CSE) flui em direção oeste do Giro Sub-Tropical Atlântico (GSA), guiada pelos ventos alísios (Peterson e Stramma, 1991; Silveira et al., 1994). Na latitude de aproximadamente 12°S, a CSE alcança a costa brasileira e divide-se em duas correntes: a Corrente Norte do Brasil (CNB) que flui até o Golfo do México (Reid et al., 1977) e a Corrente do Brasil (CB) fluindo em direção sul contornando a quebra da plataforma continental (Silveira et al., 2000). Em direção oposta e carregada de nutrientes (Olson et al., 1988), a Corrente das Malvinas (CM) banha toda a costa da Argentina, Uruguai e parte do sul do Brasil. Esta é considerada um braço da Corrente Circumpolar Antártica (CCA). Durante os períodos de precipitação associada a eventos *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO), a pluma pouco salina da Lagoa dos Patos no sul do Brasil pode alcançar distâncias de até 130 km offshore, causando um aumento no nível de clorofila nas águas costeiras (Ciotti et al., 1995). Por outro lado, a pluma do Rio da Prata, normalmente sofre uma reflexão em direção norte ao longo da plataforma continental, fertilizando as águas no Uruguai e parte do sul do Brasil (Piola et al., 2005, 2008; Moller et al., 2008). Assim, mudanças sazonais e/ou interanuais nas descargas costeiras podem influenciar mudanças significativas nas taxas de clorofila (e temperatura) na região (Garcia e Garcia, 2008). Liebmann et al. (1999) afirmam que o fenômeno conhecido como ondas de Rossby, também podem ser responsáveis por intensificar a Zona de Convergência Sul Atlântica (ZCSA), dependendo de variações mensais e intrasazonais. Essas propagações, direcionadas ao Equador, podem estar associadas às mudanças nas condições de superfície, especialmente à temperatura (Robertson e Mechoso, 2000) e ao aporte de nutrientes (Cipollini et al., 2001). A diferença entre as características dos parâmetros de circulação, assim como os sistemas hídricos costeiros podem influenciar nos processos físicos encontrados no OAS

(eventos de ressurgência, sistemas de giros e vórtices, assim como as descargas costeiras e propagações de ondas de Rossby).

Muitos autores utilizaram diferentes ferramentas para as análises da variabilidade da clorofila (CSM) e temperatura (TSM) superficial do mar com dados de sensoriamento remoto (Rivas, 1994, 2010; Lentini et al., 2000). Foram realizados estudos sobre a distribuição espacial da CSM (Longhurst et al 1998; Saraceno et al 2005), assim como, sobre a regulação dos blooms fitoplanctônicos pela TSM (Podestá et al. 1991; Provost et al. 1992). Tratando-se então de estudos multivariados em oceanografia, as Funções Empíricas Ortogonais (EOF) permitem uma melhor análise do campo espacial através de componentes temporais. Neste trabalho, o método foi baseado em modos de variabilidade implementados nos dados de CSM e TSM, com a intenção de encontrar áreas mais turbulentas. Esse processo permite também uma análise de anomalias no OAS.

2. Metodologia de Trabalho

Os dados utilizados no estudo compreendem campos mensais captados pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) embarcado no satélite AQUA da NASA. Os dados de TSM e CSM apresentam resolução espacial de 4 km. O conjunto desses produtos compreende um período entre 07/2002-12/2011.

Na análise de EOF a covariância das matrizes é usada para extrair os modos oscilatórios, os quais definem regiões relevantes ao estudo com padrões similares. A análise de variabilidade é realizada utilizando a Decomposição por Valores Singulares para calcular as amplitudes temporais, os modos oscilatórios espaciais e seus autovalores correspondentes (Yoder et al., 2002). As séries temporais associadas aos padrões temporais de cada modo são adimensionais e representam a evolução do espaço no tempo (Wilson e Adamec, 2001; Yoder e Kennelly, 2003). Também se realizou uma análise espectral de Fourier nas séries temporais de cada modo, observando a frequência dos espectros, o que permite uma melhor identificação do período dos fenômenos de influência. Essa abordagem permitiu analisar os processos e suas variabilidades na área de estudo, comparando os resultados com aqueles encontrados na literatura.

As séries iniciais tratadas consistem nos dados brutos de TSM e CSM, transformados a níveis digitais e logaritmo, respectivamente. Pixels espúrios foram filtrados através de uma interpolação por vizinhos mais próximos. A este conjunto foi realizada uma primeira aplicação de EOF, obtendo assim os primeiros resultados do estudo. Posteriormente, a média climatológica foi extraída do ciclo sazonal, resultando em um novo conjunto de anomalias de clorofila e temperatura superficial do mar, denominado ACSM e ATSM, respectivamente. A estes novos dados lhes foi aplicada novamente as técnicas de EOF e Fourier.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análises dos modos de variabilidade e Fourier em dados brutos;

Como visto anteriormente, a EOF permite descompor o campo em componentes espaciais e temporais, baseado na variância estatística do dado. Para as análises de padrões biológicos e físicos, a EOF foi aplicada nos dados mensais de CSM e TSM, respectivamente. A análise de EOF nos campos mensais de CSM mostra que os três modos explicam aproximadamente 77,0% da variância total, enquanto na TSM, explica 95,3% sobre o a soma total. O primeiro modo representa 63,7% da variância explicada em CSM e 91,1% em TSM. A 1ª EOF da CSM mostra que a maior variabilidade está concentrada nas regiões costeiras da plataforma continental. Já na TSM, o 1º modo representa o padrão zonal de distribuição da temperatura. Como esperado, a 1ª EOF corresponde ao ciclo anual da série que pode ser identificado na oscilação de 12 meses do coeficiente do primeiro modo. Outros estudos notaram a dominância do ciclo anual nas séries de clorofila (Longhurst, 1998; Garcia et al., 2004;

Saraceno et al., 2005). Essa hipótese foi confirmada pela análise de Fourier, que acusou um período de 11,3 meses como a de maior frequência para ambas as variáveis analisadas (Figura 1). Confirmando a veracidade da amostra, o erro foi calculado seguindo North et al. (1982) e está representado na Tabela 1 para todas as EOFs aqui calculadas.

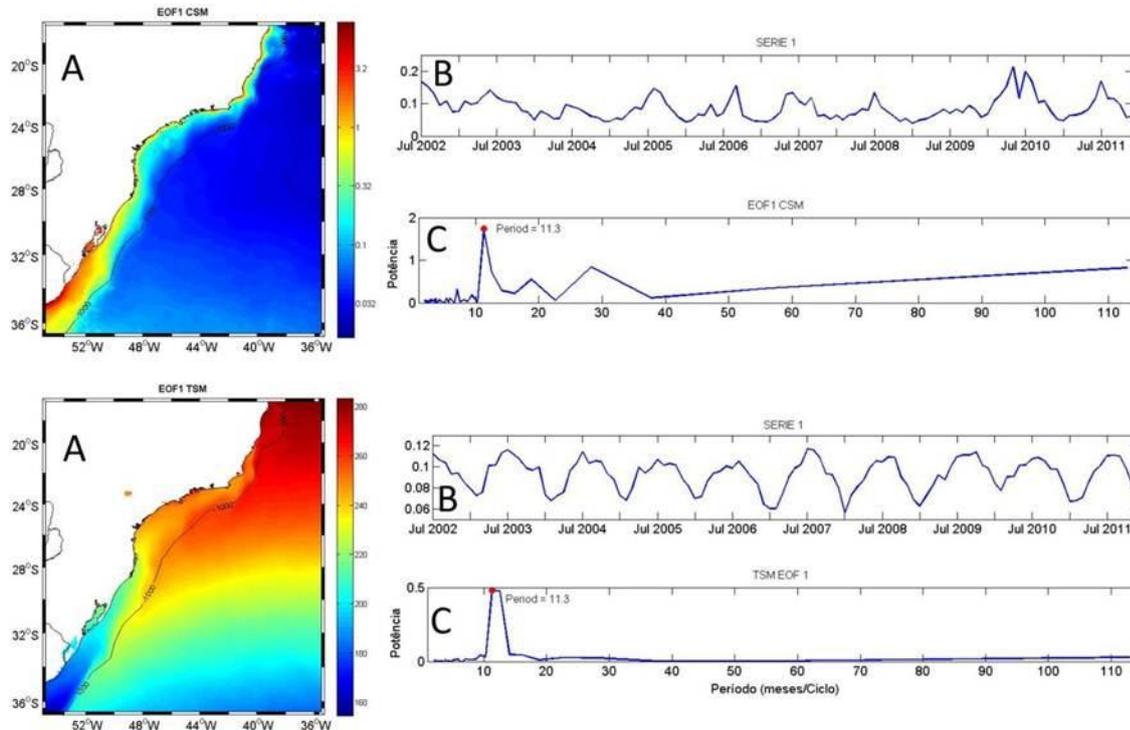


Figura 1. (A) Primeiro modo de oscilação originado da EOF nos dados de CSM e TSM. Padrões espaciais representados em unidades de Log10 (valores finais devem ser expoentes em base 10). Unidades de escala em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; (B) Amplitude temporal adimensional da 1ª EOF; (C) Espectro de Fourier para a serie 1.

O segundo modo da EOF (Figura 2) explica 5,56% da variância total da CSM e 3,7% da TSM. A amplitude temporal apresenta picos no período do inverno austral. No modo espacial estão identificadas algumas regiões de maior variabilidade, especialmente na região costeira do campo de CSM, localizado entre as latitudes 30°S e 36°S. Já na representação da TSM, nota-se uma variabilidade em fase entre a plataforma continental e o oceano aberto. A periodicidade sazonal acusada pelo espectro sugere a influência do sistema hídrico, correspondente ao deságue do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos, assim como a intrusão dessas águas na região que compreende a Bacia de Santos (21°45'S-26°46'S/49°10'-40°51'). Essa influência normalmente é mais alta no inverno (Piola et al., 2000, 2005, 2008; Gonzalez-Silveira et al., 2006; Moller et al., 2008), quando há um maior aporte sazonal de nutrientes (Ciotti et al., 1995).

O terceiro modo de oscilação (não demonstrado), com um percentual de 3,1% nos campos de CSM e 0,5% nos campos de TSM, provavelmente está associado ao regime de correntes da região, com periodicidades sazonais. Porém, como a porcentagem de variância explicada (P.V.E) encontrada é muito baixa, essas variabilidades podem ser confundidas com ruído da série, sendo melhor analisadas nos campos de anomalias.

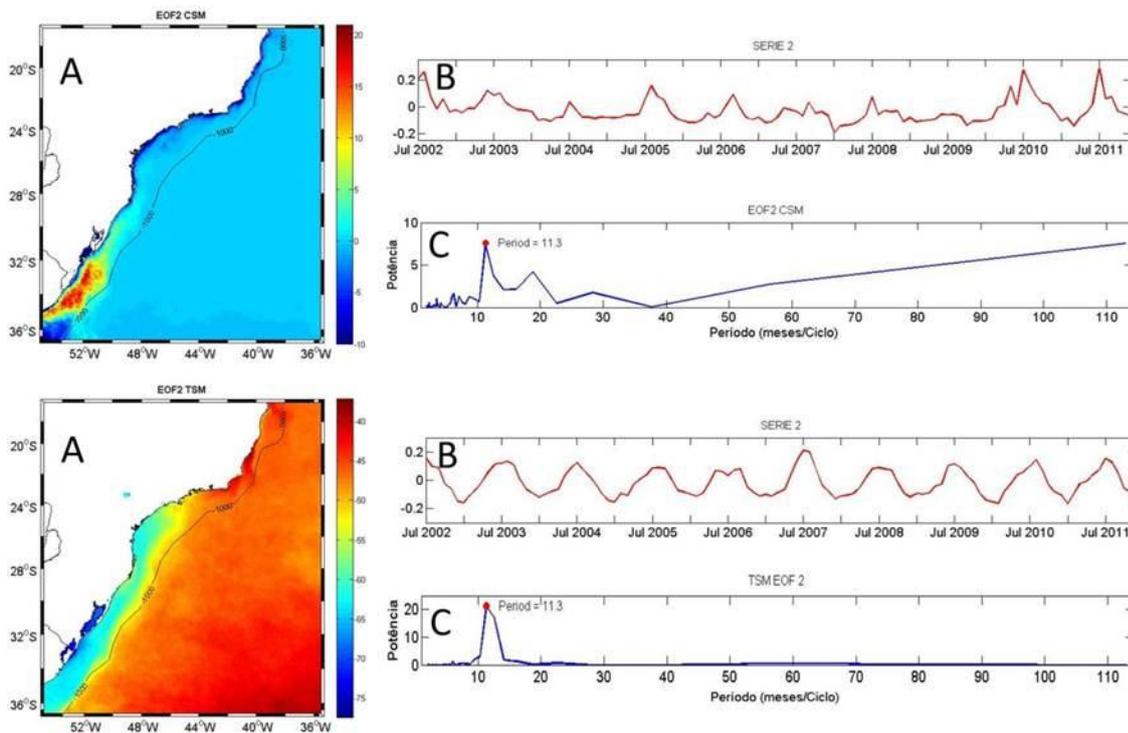


Figura 2. (A) Primeiro modo de oscilação originado da EOF nos dados de CSM e TSM. Padrões espaciais representados em unidades de Log10 (valores finais devem ser expoentes em base 10). Unidades de escala em mg.m^{-3} ; (B) Amplitude temporal adimensional da 2ª EOF; (C) Espectro de Fourier para a serie 2.

Tabela 1. Erro das amostras segundo North et al (1982).

Variável/ EOF (λ)	1-2	2-3
CSM	0.7	0.1
TSM	3.1	0.05
ACSM	0.3	0.02
ATSM	0.9	0.02

3.2 Análises dos modos de variabilidade e Fourier em dados de anomalia;

O primeiro modo de oscilação (Figura 3) resultante da aplicação da EOF nos dados de anomalia, está representado por 27,5% de P.V.E nos campos de ACSM e 10,5% nos campos de ATSM. Pode existir uma associação da primeira EOF com as propagações das ondas de Rossby. As periodicidades interanuais detectadas estão de acordo com aquelas encontradas em outros estudos (Robertson e Mechoso, 2000), referentes às variabilidades interanuais e entre décadas, na ZCSA. Essas variabilidades podem estar acompanhando o fortalecimento do anticiclone subtropical, que por sua vez, segue a escala de anomalias negativas da TSM abaixo da ZCSA (Venegas et al. 1997). No campo de ACSM, essa teoria também pode ser consistente, já que os desagues costeiros desta região sofrem influência direta da ZCSA (Robertson e Mechoso, 1998).

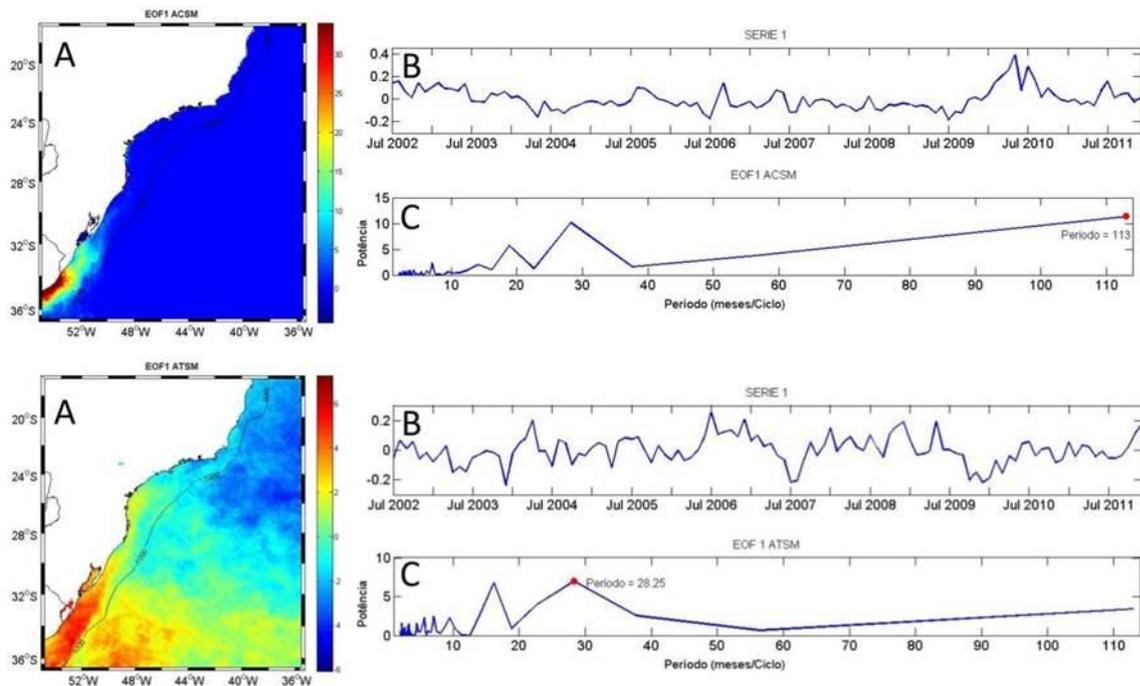


Figura 3. (A) Primeiro modo de oscilação originado da EOF nos dados de ACSM e ATSM. Padrões espaciais representados em unidades de Log_{10} (valores finais devem ser expoentes em base 10). Unidades de escala em mg.m^{-3} ; (B) Amplitude temporal adimensional da 1ª EOF; (C) Espectro de Fourier para a serie 1.

A segunda EOF (Figura 4) apresenta comportamentos similares entre os campos de ATSM e ACSM, com P.V.E de 7,4% e 7,5%, respectivamente. Tanto o campo de ACSM, como ATSM apresentam variabilidades negativas na zona costeira, de maior magnitude sobre as outras, que não sofrem uma estratificação sazonal (Rivas, 2010). A periodicidade semianual encontrada pela análise espectral sugere uma influência dos deságues costeiros associados às precipitações locais. A intensificação dos sinais provenientes da região do Rio da Prata pode dificultar a detecção de sinais menores, influenciados por outros eventos oceanográficos.

Gonzalez-Silvera et al. (2006), mostraram que a maior concentração de valores de clorofila (maiores que $0,06 \text{ mg.m}^{-3}$) aparecem abaixo das regiões de frentes meteorológicas, começando aproximadamente em 30°S , coincidindo com o limite norte da ZCSA (Castello e Möller, 1977).

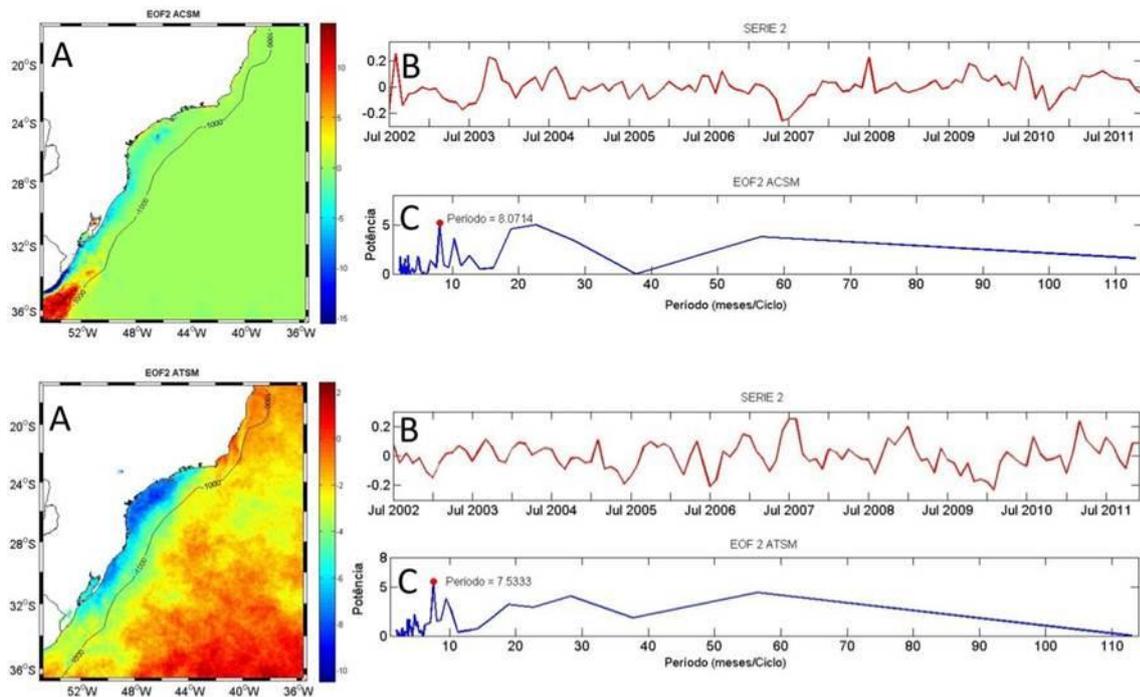


Figura 4. (A) Primeiro modo de oscilação originado da EOF nos dados de ACSM e ATSM. Padrões espaciais representados em unidades de Log10 (valores finais devem ser expoentes em base 10). Unidades de escala em mg.m^{-3} ; (B) Amplitude temporal adimensional da 2ª EOF; (C) Espectro de Fourier para a serie 2.

4. Conclusões

Neste trabalho, foi analisada a variabilidade dos produtos de satélite referentes aos dados de clorofila e temperatura de superfície do mar ao longo de ~10 anos na região sudoeste do oceano Atlântico Sul. Observaram-se periodicidades relativas aos ciclos anual, semi anual e interanual.

Assim como outros trabalhos já descreveram (Podestá et al. 1991; Provost et al. 1992; Rivas, 1994, 2010; Lentini et al., 2000), o estudo demonstra que o ciclo sazonal é responsável por mais de 90% da variância de TSM na região. Áreas de afloramento e confluência de correntes foram detectadas, também em concordância com resultados anteriores (Ciotti e Kampel, 2001; McClain et al, 2004;. Cirano et al, 2006;. Matano et al. , 2010). Foi mostrada uma relação praticamente constante e inversamente proporcional entre os sinais de clorofila e de temperatura da superfície do mar. Também se identificaram as regiões de influência direta dos deságues do Rio da Prata, assim como da Lagoa dos Patos. Os sinais provenientes dessas regiões podem ser responsáveis por mascarar sinais de menor comprimento de onda como, por exemplo, os eventos de ressurgência.

Valores de anomalias de temperatura e clorofila superficial do mar estão provavelmente associados às variabilidades interanuais da Zona de Convergência Sul Atlântica e às propagações das ondas de Rossby.

As análises espectrais aplicadas permitiram um melhor entendimento das variabilidades encontradas. No entanto, seria recomendável uma análise conjunta dos dados utilizados para este estudo com dados de precipitação e vento, para melhor relacionar processos atmosféricos e oceanográficos. Uma maior escala espacial será utilizada em projetos futuros para melhor identificar estruturas associadas a eventos locais.

Agradecimentos. Dados orbitais foram fornecidos pelo MODIS/AQUA/NASA (<http://www.modis.gsfc.nasa.gov/>). Delcourt, F.T. é bolsista FUNCATE-PETROBRAS/TC-0050.0066309.11.9.

Referências bibliográficas

Castello, J.P.; Möller, O.O. Sobre as condições oceanográficas no Rio Grande do Sul. **Atlântica** 2 (2), 25–100, 1977

Ciotti, A.M.; Odebrecht, C.; Fillmann, G.; Moller, O.O. Fresh-water outflow and subtropical convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental-shelf. **Continental Shelf Research** 15, 1737-1756, 1995.

Ciotti, A.M.; Kampel, M. Concurrent Observations of Ocean Color and Sea Surface Temperature between Cabo Frio e Sao Tomé. **Anais X SBSR**, Foz do Iguaçu, 21-26, INPE, p. 785-791, 2001.

Cipollini, P., Cromwell, D. Challenor, P. G. and Raffaglio, S. Rossby waves detected in global ocean colour data. **Geophys. Res. Lett.**, 28(2), 323–326, 2001.

Cirano, M.; Mata, M.M.; Campos, E.J.D.; Deiro, N.F.R. A Circulação Oceânica de Larga-Escala na Região Oeste do Atlântico Sul com Base no Modelo de Circulação Global OCCAM. **Rev. Brasileira de geofísica**, 24(2): 209-230, 2006.

Garcia, C.A.E.; Garcia, V.M.T. Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. **Continental Shelf Research** 28 1568-1578, 2008.

Gonzalez-Silvera, A.; Santamaria-Del-Angel, E.; Millan-Nunez, R.. Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWiFS and AVHRR Imagery. **Journal of Geophysical Research – Oceans** 111, 2006.

Lentini, C.A.D.; Campos, E.J.D.; Podestá, G.P. The annual cycle of satellite derived sea surface temperature on the western South Atlantic shelf. **Brazilian Journal of Oceanography** 48(2), 93–105. 2000

Liebmann, B.; Kiladis, G.N.; Marengo, J.A.; Ambrizzi, T; Glick, J.D. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **J.Climate**, 12, 1877-1891. 1999.

Longhurst, A. **Ecological Geography of the Sea**. Academic, San Diego, California, 1998.

Matano, R. P.; Palma, E. D ; Piola, A. R. The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. **Ocean Sci.**, 6, 983–995, 2010.

Mcclain, C. R. ; Signorini, S. R. ; Christian, J. R. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites. **Deep Sea Res.**, Part II. 51, 281– 301, 2004.

Moller, O.O.; Piola, A.R.; Fretas, A.C.; Campos, E.J.D. **The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf of the southeastern South America. Continental Shelf Research.** 2008.

Peterson, R.; Stramma, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progr.Ocean.**, 26(1): 1-73, 1991.

Olson, D.B.; Podestá, G.P.; Evans, R.H. ; Brown, O.B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas Currents. **Deep-Sea Res.**, 35, 1971-1990, 1988.

Piola, A.R.; Campos, E.J.D.; Moller, O.O.; Charo, M.; Martinez, C. Subtropical Shelf front off eastern South America. **J. Geoph. Res. – Oceans** 105, 6565-6578. 2000

Piola, A.R.; Matano, R.P.; Palma, E.D.; Moller, O.O.; Campos, E.J.D. The influence of the La Plata River discharge on the western South Atlantic. **Geophysical Research Letters** 32 (1). L01603. 2005

Piola, A.R.; Romero, S.I., Zajaczkovski, U. Space-time variability of the La Plata plume inferred from ocean color. **Continental Shelf Research**, this issue. 2008

Podestá, G.P.; Brown, O.B.; Evans, R.H. The Annual Cycle of Satellite-derived Sea Surface Temperature in the Southwestern Atlantic Ocean. American Meteorological Society. **Journal of Climate**. 457-467, 1991.

Provost, C., Garcia, O; Garçon, V. Analysis of satellite sea surface temperature time series in the Brazil-Malvinas current confluence region: dominance of the annual and semiannual periods. **Journal of Geophysical Research**, 97(11):17841-17858, 1992

Reid, J.L.; Nowlin, Jr. W.D.; Patzert, W.C. On the Characteristics and Circulation of the Southwestern Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, 7, 62-91 p, 1977.

Rivas, A.L. Spatial variation of the annual cycle of temperature in the Patagonian shelf between 40 and 50 of south latitude. **Continental Shelf Research** 14(13/14), 1539-1554, 1994

Rivas, A.L. Spatial and temporal variability of the satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean. **Cont.Shelf Resear.**, 30, 752-760. 2010.

Robertson, A.W; Mechoso, C.R. Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America. **J.Climate**, 11, 2570-2581. 1998.

Robertson, A.W; Mechoso, C.R. Interannual and Interdecadal variability of the South Atlantic convergence zone. **Am. Meteor.Soc.**, 128, 2947-2957. 2000.

Saraceno, M.; Provost, C.; Piola, A.R. On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. **Journal of Geoph. Res. – Oceans**, 110, 2005.

Silveira, I.C.A. ; Schmidt, A.C.K. ; Campos, E.J.D, Godói, I.S.S. ; Ikeda, Y. A Corrente de Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Rev. Bras. Oceanogr.**, 48(2): 171-183 pp, 2000.

Silveira, I.C.A. DA ; Miranda L.B. DE; Brown, W.S. On the origins of the North Brazil Current; **J. Geophys. Res.**, 99, 22501-22512, 1994.

Wilson, C., and Adamec, D. Correlations between surface chlorophyll and sea surface height in the tropical Pacific during the 1997-1999 El Niño-Southern Oscillation event. **J. Geophys. Res.**, 106 (12), 31,175-31,188, 2001.

Yoder, J.A.; Hawke, N.A.; Eason, D.D. ; Mueller, M.G. ; Davids, B.J. ; Gillin, F.D. ; Litman, G.W. BIVM, a novel gene widely distributed among Deuterostomes, shares a core sequence with an unusual gene in *Giardia lamblia*. **Genomics** 79(6): 750-755, 2002.

Yoder, J.A.; Kennely, M.A. Seasonal and ENSO variability in global ocean phytoplankton chlorophyll derived from 4 years of SeaWiFS measurements. **Global Biogeochemical Cycles**, 17(4), 1112, 2003.