

Variabilidade espaço-temporal da clorofila-*a* e a relação com processos oceanográficos no Oceano Atlântico Equatorial

Ana Paula Berger¹
Carlos C. Fujita¹
Mauricio M. Mata¹
Carlos A. E. Garcia¹
Virginia M. T. Garcia¹

¹ Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima
Universidade Federal do Rio Grande – FURG
Av. Itália Km 08, Rio Grande (RS), 96201-900 Brasil
{anaberger, oceccyof, mauricio.mata, dfsgar, docvmtg}@furg.br

Abstract. This paper describes the equatorial dynamics of regional process delimited by coefficients of determination R^2 . Ten years of Ocean color image data from SeaWiFS were used to investigate the variability within the Equatorial Atlantic. The sazonal and semi-annual features are estimated by harmonic analysis and these can be recognized along the equator, separating some regions by the known oceanographic structures. Equatorial and coastal upwelling, river discharges and retroflexion of the NBC current are some of them. A description of six choosen pixels as representative of the regionality is presented and a link beetwen the principal processes is exploited. Two of them showed distinct features and presented characteristic periods of mesoescale variability like eddies, and dominant in the retroflexion zone. It provides some information about the possible source of Tropical Instability Waves generated by barotropic instabilities. A Singular Value Decomposition was performed to quantify and confirm the sazonal and semi-annual features. The first three modes explains 47,8% of the total variability, where the first one shows annual signal. The second mode agree with the mean currents from OSCAR suggesting an effect of transport at the distribution of chlorophyll-*a* and the relationship with semi-annual behaviour.

Keywords: remote sensing, equatorial dynamics, sazonalidade sensoriamento remoto, dinâmica equatorial, sazonalidade.

1. Introdução

O sistema equatorial do Oceano Atlântico (OA) é caracterizado por uma complexa estrutura de correntes e contracorrentes e por forte componente de variabilidade em escala sazonal. O conhecimento da sua dinâmica para o entendimento dos efeitos que controlam a variabilidade climática inter-annual e as interações entre trópicos e subtropicais (Schouten et al., 2005) faz-se necessário, já que as trocas entre oceano e atmosfera nesta região estão intimamente relacionadas com processos de mudanças climáticas globais.

Alguns processos bastante estudados e amplamente difundidos na literatura, que fazem parte deste complexo sistema são: a retroflexão da Corrente Norte do Brasil (CNB), ressurgência equatorial e na costa da África, influência da descarga dos rios de grande porte Amazonas e Congo e espalhamento das suas plumas, e interação entre os giros subtropicais do Hemisfério Norte (HN) e Hemisfério Sul (HS) (McClain et al. (2004); Grodsky et al. (2008); Perez et al. (2005)). Instabilidades barotrópicas geradoras de Ondas de Instabilidade Tropical (TIWs) também fazem parte do sistema e são estruturas superficiais facilmente reconhecidas em imagens de cor do oceano e temperatura (Jochum et al., 2004).

Os sinais indicativos do processos físicos equatoriais apresentam-se particularmente em ciclos sazonal e semi-annual, e com variabilidade interannual, que podem influenciar a biomassa fitoplanctônica na região equatorial. Pela análise destes sinais é possível estabelecer padrões de variabilidade que regem o sistema.

Neste contexto, os sensores remotos constituem uma importante ferramenta, pois com seu advento possibilitou-se a amostragem repetitiva e contínua do oceano. Assim, este trabalho

pretende investigar o comportamento da clorofila-*a* relacionando sua variabilidade no espaço e no tempo com processos físicos equatoriais do OAE, analisando dados extraídos de imagens de satélite da cor do oceano. Os objetivos são separar regiões com variabilidade temporal similar e investigar as possíveis origens das frequências dominantes.

1.1. Área de estudo

A área de estudo é a faixa equatorial do oceano Atlântico, englobando a região entre os giros subtropicais dos dois hemisférios, bem como a costa da África e da América do Sul. Os limites de latitude e longitude foram de 55° W a 15° W e 10° N a 10° S pois abrange todos os processos descritos acima.

2. Metodologia de Trabalho

Foram utilizadas imagens Level 3 obtidas pelo sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) com resolução espacial de 9 km e temporal de 30 dias (médias mensais) do produto clorofila-*a*. O período total dos dados foi de dez anos e quatro meses, de outubro de 1997 até dezembro de 2007, com um total de 124 imagens. Dados não válidos ocorrem nas imagens devido à elevada presença de nuvens na região, próxima a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ).

Calcularam-se parâmetros estatísticos básicos como média, desvio padrão e quantidade de pixels com dados válidos para análise. Apenas séries temporais com quantidades maiores que 75% de pixels válidos foram consideradas. As lacunas restantes foram interpoladas linear e espectralmente de acordo com Emery e Thomson (1997) e Andersen (1974).

Das séries dos pixels completas foram removidas as médias temporais de cada uma delas. Os sinais anuais e semi-anuais para cada série temporal em particular foram estimados através do método de análise harmônica (Emery e Thomson, 1997). Coeficientes de determinação (R^2) entre a série das anomalias e os respectivos ciclos foram calculados para averiguar a relação entre eles, verificando-se que ambos os ciclos concentram-se em regiões particulares dentro da área de estudo.

O coeficiente de determinação explica a proporção da variação nos dados que pode ser explicada pela relação linear entre o ciclo anual ou semi-anual e a série de dados (Triola, 2005). Os valores de R^2 podem ser de 0 a 1, sendo os mais próximos de 1 os que apresentam maior correlação com o ciclo em questão.

Os R^2 foram utilizados para escolha de alguns pixels controle na área de estudo, como representativos das zonas onde o ciclo anual é mais evidente, onde o ciclo semi-anual é mais evidente e onde ambos não o são. A escolha destes pixels foi feita baseando-se nas regiões com estruturas oceanográficas conhecidas (como retroflexão, zonas de ressurgência e de bifurcação de correntes). Estes pixels são apresentados com a numeração de 1 a 6 e suas posições são apresentadas nas Figuras 1(c) e (d).

Através da análise espectral foram obtidos espectros com variância preservada (Emery e Thomson, 1997). Este método é utilizado para particionar a variância de uma série temporal em função da frequência.

Finalmente realizou-se uma Decomposição por Valores Singulares (SVD) nas séries dos dados originais. Os modos de variabilidade da SVD e a expansão dos coeficientes destes modos foram utilizados para quantificar os padrões de variabilidade, porém não serão apresentados.

Baseado em Björnsson e Venegas (1997) sobre análises da variabilidade espacial e temporal de campos geofísicos, metodologias muito utilizadas são as *Principal Component Analysis* (PCA) ou *Empirical Orthogonal Functions* (EOF) e a *Singular Value Decomposition* (SVD). A SVD é mais indicada para estudos de campos acoplados, com mais de uma variável, mas no

caso deste trabalho ela foi utilizada devido a limitações computacionais, já que suas operações requerem menor capacidade de processamento que a EOF. Este método decompõe os dados em modos de variabilidade e é essencialmente uma análise linear. A interpretação física dada a eles é, em parte, uma interpretação subjetiva já que não há garantia que os modos estatísticos oriundos das análises são diretamente relacionados com os modos de variabilidade naturais. Os padrões de variabilidade dados pela SVD representam oscilações estacionárias, e não padrões de propagação. Para aplicar o método, remove-se a média dos dados e a matriz das anomalias é então decomposta em valores singulares.

Para complementar a análise, dados do Ocean Surface Current Analysis (OSCAR) também foram utilizados. Obtidos no endereço <http://www.oscar.noaa.gov/>, estes dados constituem-se da média de longo termo (1993-2006) das correntes zonais para a área de estudo.

3. Resultados e Discussão

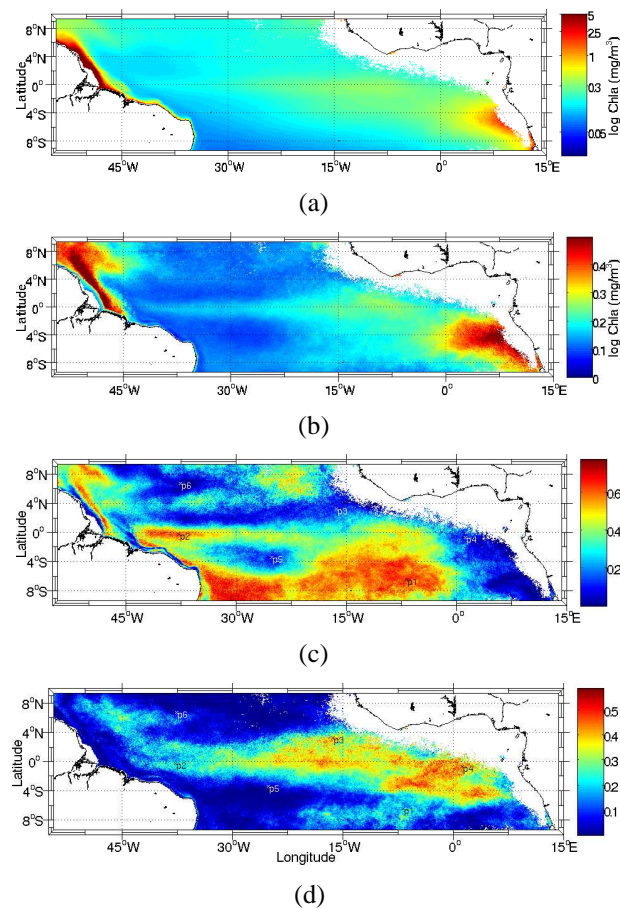


Figura 1: Parâmetros estatísticos básicos: (a) média dos 124 meses por pixel, (b) desvio padrão; e coeficientes de determinação (c) entre série original e o ciclo anual e (d) entre a série com ciclo anual removido e o ciclo semi-anual. Apresentados também os seis pixels controle.

Nas Figuras 1(a) e (b) identificam-se padrões oceanográficos importantes, regiões de maiores concentrações no AE leste - zona de forte ressurgência costeira e equatorial, e descarga do Rio Congo -, no AE oeste acompanhando a costa nordeste brasileira - zona de descarga do Amazonas e, mais acima, da retroflexão - e ao longo da linha do equador, até aproximadamente 30°W - ressurgência equatorial. Os locais com maiores variações são observados nestas mesmas regiões nos mapas de desvio padrão. Zonas com maiores concentrações equivalem às de maior desvio padrão. Estas constatações indicam uma forte relação dos processos oceanográficos

físicos com o comportamento de parâmetros biológicos como a clorofila, destacando entre eles a ressurgência e a retroflexão.

As Figuras 1(c) e (d) dos coeficientes de determinação destacam a regionalidade dos processos no AE. Maiores valores de R^2 na Figura 1(c) (zonas em vermelho) indicam maior correlação da variância dos dados com o modelo do ciclo anual, e o mesmo acontece na Figura 1(d) para um modelo do ciclo semi-anual. As zonas em azul em ambas Figuras indicam que processos nestas frequências pouco representam a variabilidade total da referida área. As posições dos seis pixels escolhidos como representativos da regionalidade caracterizam processos de interesse para explicar a dinâmica equatorial da clorofila. Os pixels 1 e 2 exemplificam locais com ciclo anual, o 3 e o 4 semi-anual, e o 5 e o 6 onde estes padrões não se apresentam, representando a dominância de fenômenos de variabilidade intra-anual ou interanual. Na Tabela 1 encontram-se os valores de R^2 para cada pixel e suas coordenadas.

Nos espectros da variância para as séries originais (Figura 2) os picos representam os períodos dos eventos que ocorrem nestas regiões. O *p1* tem forte ciclo anual e parece ter sua variabilidade determinada por algum processo não relacionado com as ressurgências do AE leste. Esta variabilidade, apesar de anual, aparenta ter relação com o *p5*, que mostrou um pico no espectro em 4 meses (Figura 2(e)), período característico de fenômenos com variabilidade de mesoescala, como vórtices, e também é dominante na retroflexão (Richardson et al., 1994).

Tabela 1: Posição dos pixels e os R^2 para cada um deles. Para o padrão anual os R^2 apresentados tem os valores mais altos quando considerado o ciclo anual, para o padrão semi-anual os mais altos quando considerado o ciclo semi-anual. Para os pixels sem esses padrões os valores de R^2 são os mais baixos quando considerado ambos os ciclos.

	Pixel	Coordenadas	R^2 anual	R^2 semi-anual
padrão anual	<i>p1</i>	06,8°W 6,50°S	0,71	-
	<i>p2</i>	37,7°W 0,25°S	0,68	-
padrão semi-anual	<i>p3</i>	16,4°W 3,25°N	-	0,49
	<i>p4</i>	01,2°E 0,70°S	-	0,51
sem os padrões	<i>p5</i>	25,2°W 3,40°S	0,06	0,02
	<i>p6</i>	37,6°W 6,75°N	0,01	0,01

A região exatamente sob a linha do equador que abrange o *p2* pode indicar ressurgência equatorial mas com padrão anual, em contraposto ao *p3* com ressurgência equatorial semi-anual. Também sugere reversão de corrente, como ocorre com a retroflexão, visto que sua feição assimila-se a esta. É neste ponto o início de uma sequência de reversões entre 0 e 10°N, que podem alterar o campo de clorofila-*a* em escala anual, sendo necessário estudos da variabilidade das correntes para afirmações mais consistentes. Trabalhos anteriores sugerem que a Subcorrente Equatorial (EUC) é alimentada por águas do Hemisfério Sul provenientes da retroflexão da NBC, mas também por águas do Hemisfério Norte que conectam EUC e Subcorrente Norte Equatorial (NEUC), em determinada época do ano (Goes et al., 2005). Este local pode estar altamente relacionado com uma zona de origem de fenômenos como as TIWs, pois é uma região de encontro e de alterações de sentido de correntes propícia à formação de processos turbulentos.

O *p3* e o *p4* situam-se na zona do OAE leste e a dinâmica sazonal do fitoplâncton é controlada por mecanismos físicos. A intensificação sazonal dos ventos alísios no OAT oeste provoca forte inclinação da termoclina (forçante remota estudada por Servain et al. (1982)

e Moore et al. (1978)), que conseqüentemente também apresenta mudanças sazonais na profundidade, bem como na EUC (Monger et al., 1997). A aproximação da termoclina da superfície, que dura do início de julho ao final de agosto, combinado com a mistura provocada por ventos locais pode ser o principal mecanismo de controle dos fluxos verticais de nutrientes e conseqüentemente dos *blooms* de fitoplâncton observados na região (Longhurst, 1993). Como descrito por Grodsky et al.(2008), observam-se dois momentos de *blooms*, um principal no inverno e outro secundário (mais fraco) em dezembro-janeiro, e ambos estão relacionados às variações na termoclina e ventos, o que explica o comportamento semi-anual de *p3* e *p4*. O primeiro faz parte da ressurgência equatorial do Golfo da Guiné e o segundo está incluído numa área de ressurgência costeira, onde tanto o consumo pelo fitoplâncton quanto o aporte de nutrientes é maior, e a variação apresentada da imagem de desvio padrão mostra isso (Figura 1(b)).

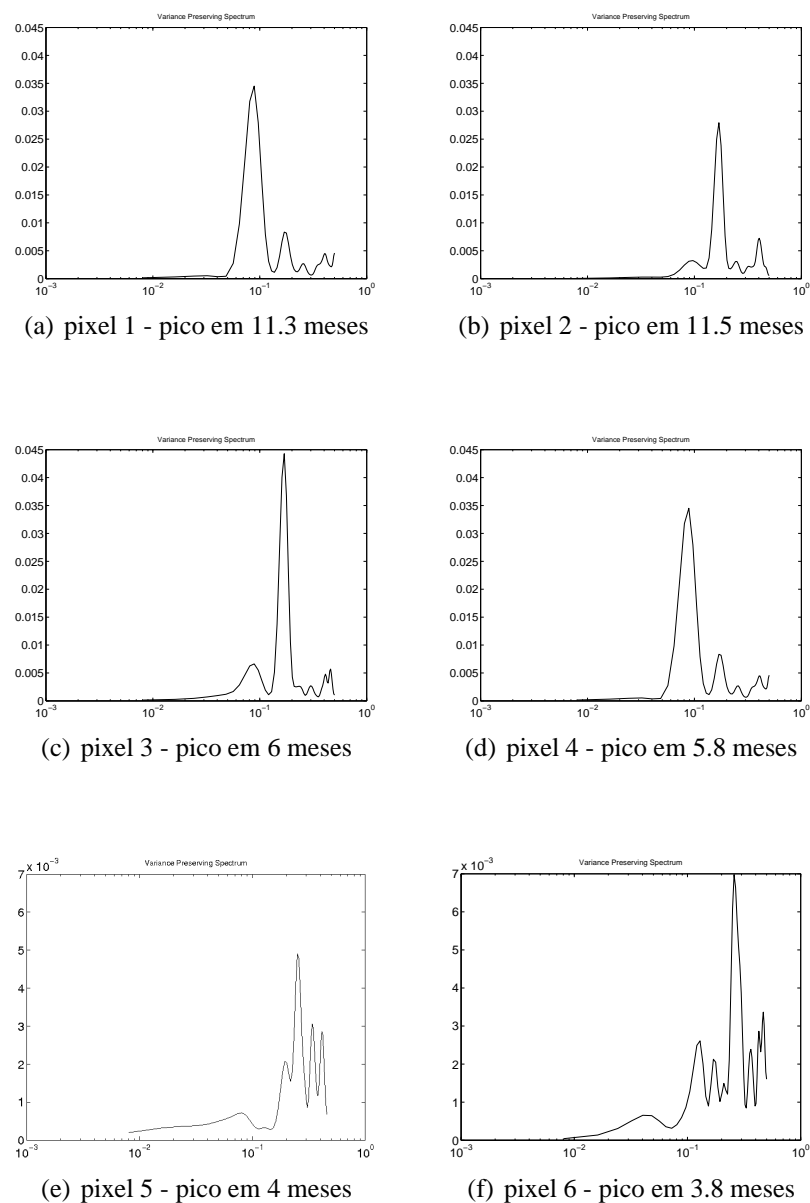


Figura 2: Espectros da variância para as séries originais dos pixels controle.

No *p5* e *p6* não se observaram ciclos anual nem semi-anual. Pela análise dos espectros, ambos apresentam processos com período de 4 meses que se destacam entre outros picos

(Figuras 2(e) e (f)). O $p5$ encontra-se em uma zona que está em concordância com a descrição de Schouten et al., 2005), que verificou que a região equatorial oeste ao sul de 4°S apresenta uma mínima contribuição para o ciclo sazonal. Isto se dá devido a dominância de fenômenos intrasazonais (anéis da NBC (Didden e Schott, 1993)) ou interanuais (variabilidade relacionada ao El Niño-Southern Oscillation, (Arnault e Cheney, 1994)). A região do $p6$ é conhecida pela presença de vórtices provenientes da retroflexão da NBC (Goes et al., 2005). Em imagens da cor do oceano é possível observar que na posição do $p5$ ($25,2^{\circ}\text{W}$ e $3,4^{\circ}\text{S}$) há presença de instabilidades notadas através das cúspides que indicam desenvolvimento das TIWs (Figura 3) (Jochum et al., 2004). A semelhança do ciclo de 4 meses com o ciclo da retroflexão (anticiclones com trajetórias de períodos parecidos com este, 151 e 116 dias, foram observadas por Richardson et al. (1994)), também é indicativo da ação de grandes vórtices na região.

No $p5$ encontra-se menor consumo do fitoplâncton por ser região oceânica, o que reflete no pequeno desvio padrão e na baixa concentração que se mantém (Figuras 1(b) e (a)). Pode ser chamada de uma zona de sombra para a clorofila, porém, nela é possível perceber comportamento ciclônico, podendo ser área de subsidência. Isto poderia estar acoplado à uma feição anticiclônica que pode ser notada nas imediações de $p1$. A configuração observada abaixo do equador em vermelho, respeitando um ciclo anual, aparenta-se com o de uma onda. Estas características apresentam indícios de ondas de baixa frequência, como as de Rossby e de Kelvin (estas últimas guiadas pela linha do Equador).

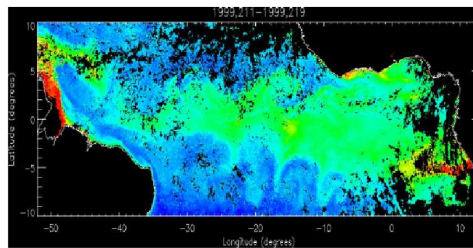


Figura 3: Ondas de instabilidade tropical vistas pelo SeaWiFS. As cúspides aparecem ao longo de 4°S e 4°N . Figura retirada de Jochum et al. (2004).

A excitação destas ondas pelos ventos resultam em ajustes de diversas escalas de tempo. O ajuste oceânico às variações do *stress* do vento local, por exemplo, ocorre com um lapso temporal de cerca de um mês, tempo necessário para uma onda de Kelvin Equatorial cruzar a bacia Atlântica. O ajuste aos ventos extra-equatoriais (por exemplo às mudanças norte-sul da ITCZ), entretanto, leva mais tempo, já que também envolve a propagação de ondas de Rossby com número de onda crescente meridionalmente, e com isso velocidade de fase decrescente (Cane e Sarachik, 1977). A onda de Rossby do primeiro modo baroclínico necessita de quase três meses para cruzar a bacia de leste para oeste, e aproximadamente 5 meses para o segundo modo baroclínico. As características superficiais dos sinais de propagação, entretanto, são usualmente mascaradas por efeitos locais (bombeamento de Ekman) (Thierry et al., 2004).

A região do $p5$ pode ainda sofrer influência da separação das correntes (Sul Equatorial (SEC) em NBC e Corrente do Brasil (BC)) ou mesmo daquela zona vizinha, turbulenta com reversões de fluxo, onde o $p2$ encontra-se. Como a SEC muda sua direção de leste-oeste para norte (NBC) quando encontra uma barreira (proximidades da plataforma), esta desestabilização da corrente pode ter relação com formação de instabilidades. Em 10°S temos a região de formação da NBC, onde as águas fluindo para oeste com a SEC primeiramente começam a se concentrar numa corrente de contorno com direção norte (Johns et al., 1998).

Os três primeiros modos da SVD para os dados originais explicam 47,8% do total da variabilidade para os padrões de distribuição espacial da clorofila-*a*, sendo todos dominados

por ciclo anual e semi-anual. Dentre eles destaca-se o modo 2 (Figura 4), que apesar da baixa contribuição na variabilidade (8,4%) apresentou uma ligação entre os dois extremos do AE no Hemisfério Norte. Plotando os vetores da corrente média obtidos do OSCAR sobre o modo 2 é visível que esta conexão, reconhecida pela extensa área em amarelo, relaciona-se com transporte por correntes superficiais de oeste para leste. A interação dos vetores mais intensos com as áreas em amarelo permite essa afirmação e sugere que a sazonalidade das correntes, no caso a Contra Corrente Norte Equatorial (NECC), determina a variabilidade da clorofila nesta extensão do Atlântico.

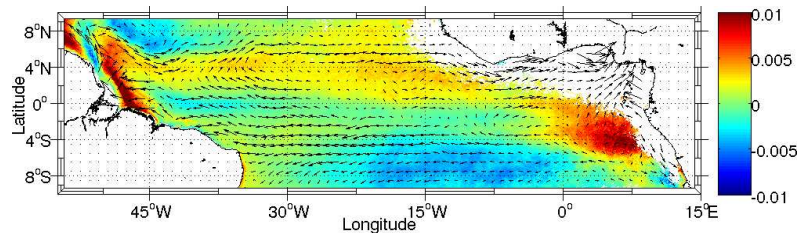


Figura 4: Correntes superficiais médias do OSCAR plotadas sobre o modo 2 da SVD.

4. Conclusões

A regionalidade dominante nos processos equatoriais foi analisada, separando o OAE em regiões com padrões de variabilidade distintos, através do pixels controle e a associação com os processos físicos locais e as possíveis interações entre eles foi realizada.

Nas proximidades de $p1$ verificou-se forte ciclo anual e sua variabilidade pode ter relação com o $p5$. O $p2$ indica ressurgência com padrão anual, diferentemente de $p3$ e $p4$, que têm padrão semi-anual. Ambos $p5$ e $p6$ são relacionados com variabilidade de mesoescala e instabilidades barotrópicas.

O sinal anual não é tão bem explicado pelo primeiro modo da SVD (33,7%), nem o segundo (8,4%), apesar deste ciclo ainda ser dominante na região equatorial.

A SVD poderia ser aplicada às regiões delimitadas a partir das figuras do R^2 . Uma análise apenas da descarga do Amazonas provavelmente mostraria padrões de variabilidade anuais relacionados com a pluviosidade e descarga e que quando removidos indicariam sinais referentes ao El Niño. Analisando-se também somente a região da formação das instabilidades, $p5$, mais evidências poderiam ser encontradas a respeito das TIWs.

Constatou-se a provável ocorrência das TIWs, confirmando estudos pretéritos, porém análises mais aprofundadas são necessárias, com o uso de outros tipos de dado como altimetria, TSM e de correntes.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 558471/2005-6, Edital Arquipélago e Ilhas Oceânicas, cujos recursos financiaram as atividades deste trabalho.

Referências

Andersen, N. On the calculation of filter coefficients for maximum entropy spectral analysis.

Geophysics, v. 39, n. 1, p. 69–72, 1974.

Arnault, S.; Cheney, R. E. Tropical atlantic sea level variability from geosat (1985-1989). **Journal Of Geophysical Research**, v. 99, p. 18207–18224, 1994.

- Björnsson, H.; Venegas, S. A. **A Manual for EOF and SVD analyses of Climatic Data**. Montréal, Québec, 1997.
- Cane, M. A.; Sarachik, E. S. Forced baroclinic ocean motions, ii. the linear equatorial bounded case. **Journal of Marine Research**, v. 35, p. 395–432, 1977.
- Didden, N.; Schott, F. Eddies in the north brazil current retroflection region observed by geosat altimetry. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 98, n. C11, p. 20121–20131, 1993.
- Emery, W. J.; Thomson, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. 1^a. ed. [S.l.]: Pergamon, 1997.
- Goes, M.; Molinari, R.; da Silveira, I.; Wainer, I. Retroreflections of the North Brazil Current during february 2002. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 52, n. 4, p. 647–667, 2005.
- Grodsky, S. A.; Carton, J. A.; McClain, C. R. Variability of upwelling and chlorophyll in the equatorial Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 3, 2008.
- Jochum, M.; Malanotte-Rizzoli, P.; Busalacchi, A. J. Tropical instability waves in the Atlantic Ocean. **Ocean Modelling**, v. 7, p. 145–163, 2004.
- Johns, W. E.; Lee, T. N.; Beardsley, R. C.; Candela, J.; Limeburner, R.; Castro, B. Annual cycle and variability of the North Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, n. 1, p. 103–128, 1998.
- Longhurst, A. Seasonal cooling and blooming in tropical oceans. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research**, v. 40, p. 2145–2165, 1993.
- McClain, C. R.; Signorini, S. R.; Christian, J. R. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites. **Deep-Sea Research Part II-Topical Studies In Oceanography**, v. 51, n. 1-3, p. 281–301, 2004.
- Monger, B.; McClain, C.; Murtugudde, R. Seasonal phytoplankton dynamics in the eastern tropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 12389–12412, 1997.
- Moore, D.; Hisard, P.; McCreary, J.; Merle, J.; O'Brien, J.; Picaut, J.; Verstraete, J. -M.; Wunsch, C. Equatorial adjustment in the eastern Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 5, p. 637–640, 1978.
- Perez, V.; Fernandez, E.; Maranon, E.; Serret, P.; Garcia-Soto, C. Seasonal and interannual variability of chlorophyll-*a* and primary production in the equatorial Atlantic: *in situ* and remote sensing observations. **Journal of Plankton Research**, v. 27, n. 2, p. 189–197, 2005.
- Richardson, P. L.; Hufford, G. E.; Limeburner, R.; Brown, W. S. North Brazil Current retroflection eddies. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 5081–5094, 1994.
- Schouten, M. W.; Matano, R. P.; Strub, T. P. A description of the seasonal cycle of the equatorial Atlantic from altimeter data. **Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers**, v. 52, n. 3, p. 477–493, 2005.
- Servain, J.; Picaut, J.; Merle, J. Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 12, n. 5, p. 457–463, 1982.
- Thierry, V.; Treguier, A.; Mercier, H. Numerical study of the annual and semi-annual fluctuations in the deep equatorial Atlantic Ocean. **Ocean Modelling**, v. 6, p. 1–30, 2004.
- Triola, M. F. **Introdução à estatística**. 9^a. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2005.