

Investigação do produto OSCAR para determinação de feições de circulação oceânica na plataforma continental Sul-Sudeste do Brasil e oceano adjacente

Ricardo Cechet¹
Francisco Palma Travassos Neto¹
Carlos Alberto Eiras Garcia¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/PPGOceano
Caixa Postal – 88.040-900 – Florianópolis – SC, Brasil
ricardocechet, ftravassos@hotmail.com,
garcia.io.furg@gmail.br

Abstract. Satellite-based model Ocean Surface Current Analysis Real-time (OSCAR) provides continuous spatial data sets of global ocean currents with a spatial resolution of a 1/3 degree grid. The validation of OSCAR time series from 2008 to 2015 as inter annual analysis of ocean circulation variability in the Southwestern Atlantic Ocean, was made by math-up with the mean of in-situ currents data from ADCP's mounted in a buoys from PNBOIA. The punctual OSCAR data nearest of the buoy was selected to match-up each section. We also used a data quality control over PNBOIA data-set, removing the short-period records less than 50% of the OSCAR sampling (5 days), and others suspects data. The result of math-up showed a high correlation between ADCP and OSCAR currents model. Furthermore, this model described a seasonal variability of superficial velocities and directions of the superficial currents, as well as, oceanographic features like the Brazilian Current variability plus the Santa Marta Vortex during inter annual seasons.

Palavras-chave: buoys, satellites, ocean surface currents, boias, satélites, correntes superficiais oceânicas

1. Introdução

Com o advento de diferentes tecnologias, sensores instalados em plataformas flutuantes nos oceanos ou embarcados em satélites, possibilitam o avanço no entendimento da circulação oceânica. A circulação nos oceanos ocorre basicamente de duas formas: a circulação profunda e de fundo, onde a água pode fluir lentamente devido aos gradientes termohalinos, distribuindo-se em distintas camadas profundas e de fundo e influenciando diferentes bacias oceânicas; e superficialmente quando é forçada pelos ventos e determinam os grandes giros das bacias oceânicas (Peterson e Stramma, 1991). Os anéis de circulação de larga escala que se formam nos oceanos influenciam tanto na transferência de energia associados a sua formação, como também na mistura de diversas propriedades que compõem suas massas de água (Olson, 1991).

No Atlântico Sul, aproximadamente a 10° S, ocorre a bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE) que dá origem a duas correntes distintas, a Corrente Norte do Brasil (CNB) e Corrente do Brasil (CB), que fluem para norte e sul, respectivamente. A CB é definida como uma corrente de contorno oeste, que na maior parte do tempo tende a fluir ao largo das margens continentais (Silveira et.al., 2000), com direção predominante de NE-SO. A CB tem seu fluxo estreito e raso até a aproximadamente latitude de 20.5° S, onde a Cadeia de Vitória-Trindade forma uma barreira que força a CB sobre a plataforma continental (Evans e Signorini, 1985). Medidas diretas de correntes na Baía de Campos (22.3° S) mostram que as oscilações da CB estão concentradas principalmente nas frequências sub-inerciais, entre 3 e 15 dias (Castro e Miranda, 1998). A região entre Cabo Frio e o Cabo de São Tomé (aproximadamente 23° S) é caracterizada também por meandramentos e formação de vórtices ciclônicos e anti-ciclônicos, podendo inclusive ocorrer inserções da CB sobre a plataforma continental (Evans e Signorini, 1985).

Algumas particularidades ao longo do percurso da CB foram analisadas por Castro e Miranda (1998), tais como os vórtices e meandros que ocorrem ao largo da região de Cabo

Frio (Rio de Janeiro). Os autores descrevem a ocorrência destas feições pelo fato de haver uma brusca mudança na orientação da margem continental (L-O), onde estas feições possuem uma tendência de se afastar da CB, e posteriormente voltam a unir ao fluxo médio da CB, em maiores latitudes.

Calil et al. (2008) analisaram perturbações de meso escala durante o período de setembro e novembro de 2007, utilizando derivadores que foram lançados próximos à quebra da plataforma ao largo da região sul-sudeste do Brasil. Os autores destacaram a CB com fluxo predominante para sudoeste, como já observado por Peterson e Stramma (1991), Castro e Miranda (1998) e Silveira et.al (2000), porém observaram alta instabilidade baroclínica ao largo do fluxo da CB entre as latitudes 26° e 28° S. Feições oceanográficas como vórtices ciclônicos e anti-ciclônicos distantes de até 200 km da costa, cujos diâmetros atingiam até 140 km, foram identificadas por Pereira et al. (2009) analisando imagens de satélite da temperatura superficial do mar (TSM).

Bonjean e Lagerloef (2002) propuseram uma abordagem que utiliza a equação do momento para representar a circulação superficial dos oceanos através das estimativas das componentes de velocidades zonal e meridional. Capaz de reproduzir uma série história desde 1992, o modelo denominado de *Ocean Surface Current Analyses Real-time* (OSCAR) foi configurado para acessar diversos bancos de dados que fornecem produtos satelitais, no qual são utilizados como variáveis de entrada no processamento.

As correntes derivadas do OSCAR foram testadas em primeiro momento na região do Oceano Pacífico Tropical, quando comparações com registros de correntes *in-situ* representaram bem a dinâmica de circulação em meso e larga escala da região. Investigações realizadas por Johnson et al. (2007), com dados de correntes do OSCAR e obtidas *in-situ*, utilizando ADCPs (ADCP - *Acoustic Doppler Current Profile*), em latitudes próximas ao equador observaram uma tendência do OSCAR em superestimar (subestimar) os valores da componente de velocidade meridional (zonal).

Este trabalho tem dois objetivos: (a) comparar as correntes superficiais do OSCAR com as medidas pelas boias do Programa Nacional de Boias (PNBOIA); (b) investigar a circulação superficial na região do Atlântico Sudoeste (21° - 34° S e 36° - 54° W, Figura 1) com dados do OSCAR. Na investigação da circulação, feições de meso e larga escala serão discutidas assim como ênfase será dada à variabilidade da circulação em escalas sazonal e interanual.

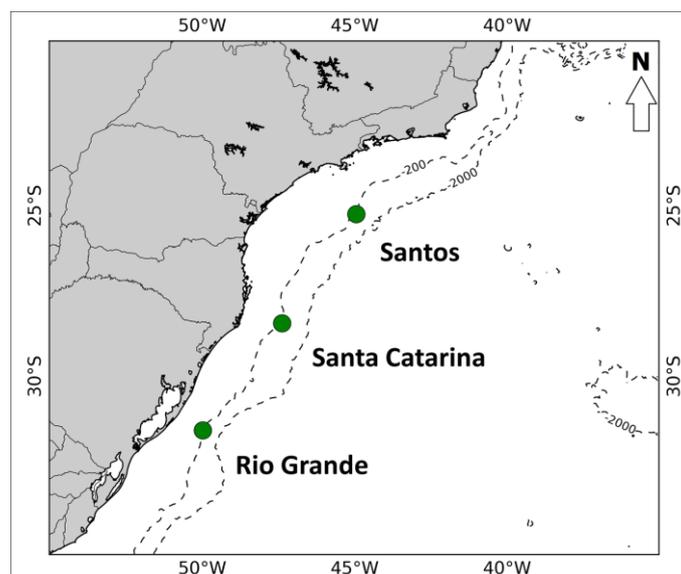


Figura 1: Área de Estudo. Os pontos verdes representam as posições das boias do PNBOIA (Santos, Santa Catarina e Rio Grande). As linhas tracejadas são as isóbatas de 200 e 2000 metros.

2. Dados e Metodologia

Dados de correntes do OSCAR

O modelo de cálculo das correntes do OSCAR utiliza a equação do momento quase-linear e quase-estacionário (Bonjean e Lagerloef, 2002) negligenciando a aceleração local (Johnson et.al., 2007). O campo de velocidade é o resultado da combinação teórica do balanço geostrófico, de Ekman/Stommel e do vento térmico. Para o cálculo das correntes, o modelo usa três produtos de diferentes sensores satelitais: altura da superfície do mar (SSH, por altímetros), temperatura da superfície do mar (SST, por radiômetros) e vento a 10 metros (W, por escaterômetros). Maiores detalhes podem ser encontrados em Bonjean e Lagerloef (2002).

O resultado gerado pelo OSCAR é disponibilizado ao usuário no formato netCDF (extensão do arquivo – “.nc”), com intervalos de 5 dias (72 arquivos/ano) e resolução espacial de $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$. As variáveis são dispostas no formato de malha (grid), no qual cada posição da malha possui valores das componentes de velocidade zonal e meridional superficial dos oceanos. As correntes do OSCAR representam uma média das correntes superficiais calculadas até uma profundidade limite de 30 metros (OSCAR - Third Degree Resolution User's Handbook, 2009). Os dados de correntes do OSCAR foram obtidos através do site www.esr.org/oscar/index.html, e compreendem o período de 2008 a 2015.

Dados de Correntes das Boias

Os registros de correntes *in-situ* utilizados são de boias fundeadas próximas da quebra da plataforma continental brasileira, pertencentes ao Programa Nacional de Boias (PNBOIA). As boias de Santos ($25,27^{\circ}$ S, $44,92^{\circ}$ W), Santa Catarina ($28,5^{\circ}$ S, $47,3^{\circ}$ W) e Rio Grande ($31,52^{\circ}$ S, $49,81^{\circ}$ W) possuem um ADCP instalado em seus cascos, configurado para perfilar a coluna de água até 60 metros de profundidade, retornando medidas de correntes em cada estrato de 2 metros. Os dados dos ADCPs foram obtidos através do portal do GOOS-Brasil (<http://www.goosbrasil.org/pnboia/>). O GOOS-Brasil disponibiliza os dados de correntes (com certo grau de processamento), no formato de planilhas (extensão do arquivo – “.csv”), no qual estão inclusos os dados horários de velocidades e direções das correntes em profundidades 6 a 8,5; 8,5 a 11 e 11 a 13,5 metros. As correntes do ADCP foram submetidas a um controle de qualidade rígido, com a finalidade de excluir registros espúrios da série temporal. Para que as séries temporais de ambos os registros apresentassem mesmo intervalo temporal (5 dias), utilizamos as datas do produto OSCAR como referencia, a fim de adequar aos registros das boias.

Validação dos Dados de Correntes do OSCAR

Para a validação das correntes do OSCAR, as correntes do ADCP das boias do PNBOIA foram agrupadas de acordo com os intervalos de tempo fornecidos pelo produto do OSCAR, ou seja, valores médios para intervalos de tempo de 5 dias. No critério para o cálculo da média dos 5 dias, o ADCP teria que apresentar, no mínimo, 60 horas de registro. Ou seja, no mínimo 50% ou mais do total de 120 horas (100%) eram necessários para o processo de validação do produto OSCAR.

Pelo fato do produto OSCAR apresentar as médias das componentes de velocidades, integrado da coluna d'água de 0 a 30 m, recorreremos a média das 3 profundidades registradas pelo ADCP do PNBOIA. Após obtermos o valor médio da corrente do ADCP, utilizamos o posicionamento geográfico de cada boia, para que pudéssemos extrair as componentes de velocidades mais próximas em relação ao grid do OSCAR. Em seguida, aplicamos a matriz de rotação de vetores para as componentes de velocidades zonal e meridional, e calculamos as componentes paralela (*along-shore*) e perpendicular (*cross-shore*) à costa.

Os métodos estatísticos empregados derivaram os seguintes parâmetros: correlação de *Person* (r), raiz do erro quadrático médio $RMSE$ e $skill$, sendo que este último está relacionado à acurácia (exatidão) entre as componentes das velocidades paralela e perpendicular à costa.

Os campos médios de correntes superficiais médias em escala sazonal e interanual, durante o período de análise (2008 a 2015), foram calculados para investigar as feições de circulação oceânica na plataforma Sul-Sudeste do Brasil e oceano adjacente, como também um transecto foi traçado para analisar as correntes presentes na latitude de 28° S.

3. Resultados e Discussão

Validação dos Dados - OSCAR x PNBOIA

No total 154 pares de dados das componentes paralela (u - *along-shore*) e perpendicular (v - *cross-shore*) de correntes (OSCAR x ADCP), entre 2008 e 2015, foram utilizados no processo de validação das correntes do OSCAR. Os resultados estatísticos mostraram boa concordância para u ($r = 0,63$, $RMSE = 13,48$ cm/s e $skill = -0,14$) e v ($r = 0,66$, $RMSE = 8,33$ cm/s e $skill = 0,26$). Ou seja, as componentes u e v do produto OSCAR possuem tendência média de subestimar e superestimar, respectivamente, os valores medidos pelos ADCPs das boias.

A Figura 2 mostra os histogramas das componentes (u e v) das correntes derivadas pelo OSCAR e medidas pelos ADCPs das boias. Os valores negativos para u e v implicam no fluxo com sentido sudoeste.

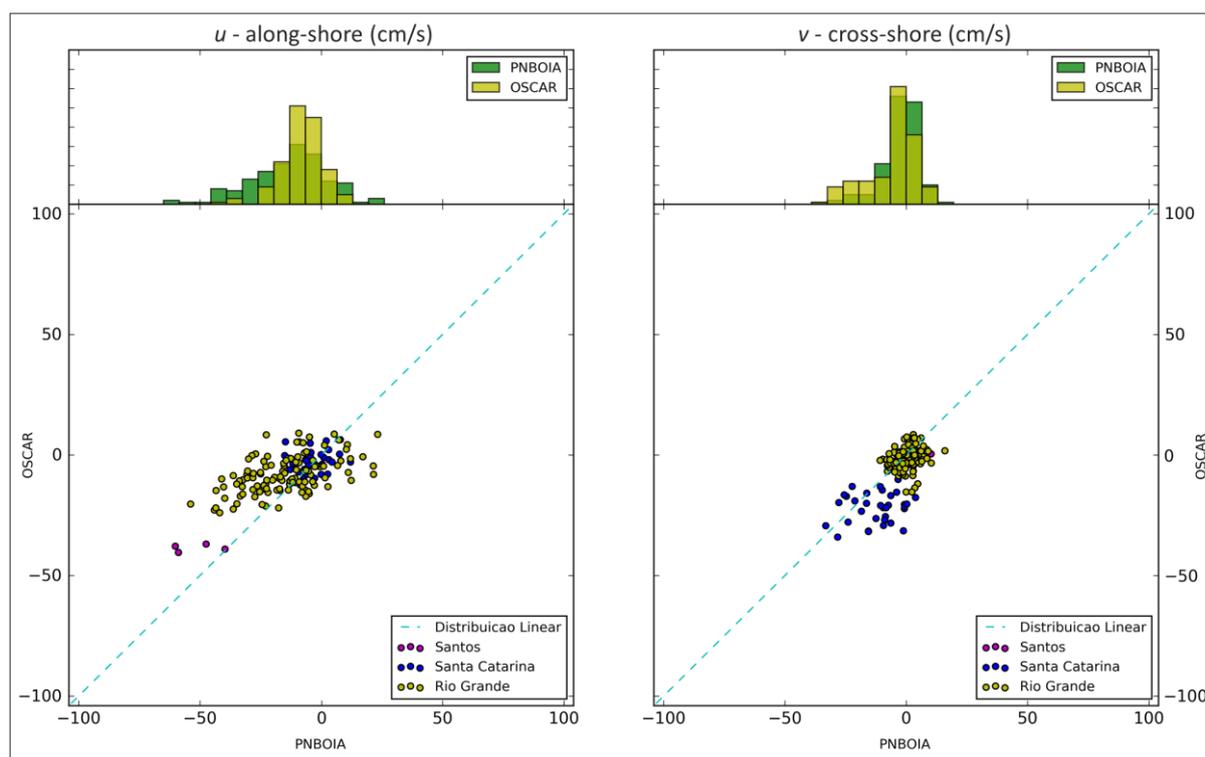


Figura 2: (Em cima) Frequência acumulada (histogramas) das componentes u (esquerda) e v (direita) de velocidades do OSCAR e do PNBOIA. (Abaixo) Comparação entre as componentes (u e v) das velocidades do OSCAR e PNBOIA. Os pontos magentas, azuis e amarelos referem-se às boias de Santos, Santa Catarina e Rio Grande, respectivamente.

Os máximos valores de u de OSCAR e do PNBOIA (Figura 2) foram de -40,45 cm/s e -60,18 cm/s, respectivamente, próximos da posição da boia de Santos (9,25 Km de distância), enquanto que para v , as máximas velocidades encontradas foram de -34,04 cm/s (OSCAR) e -33,23 cm/s (PNBOIA) próximo da boia de Santa Catarina (12,75 Km de distância).

Identificação das feições oceanográficas (OSCAR)

Os padrões médios sazonais das correntes superficiais estão mostrados na Figura 3. Em todas as estações, o fluxo médio fluiu predominante para sudoeste, entre as isóbatas de 200 a 2000 metros paralelo à margem continental sul-sudeste brasileira. Este fluxo, denominado de Corrente do Brasil, apresentou maiores valores de velocidades médias durante a estação de verão, na região ao largo da margem continental de Cabo Frio (Rio de Janeiro). A CB se desloca contornando a margem continental, e nas proximidades da latitude 24° S, algumas instabilidades em seu fluxo são notadas (Figura 3, entre as longitudes 42° e 44° O), mesmo na média sazonal, o que implica que se tratam de feições quase-permanentes na região.

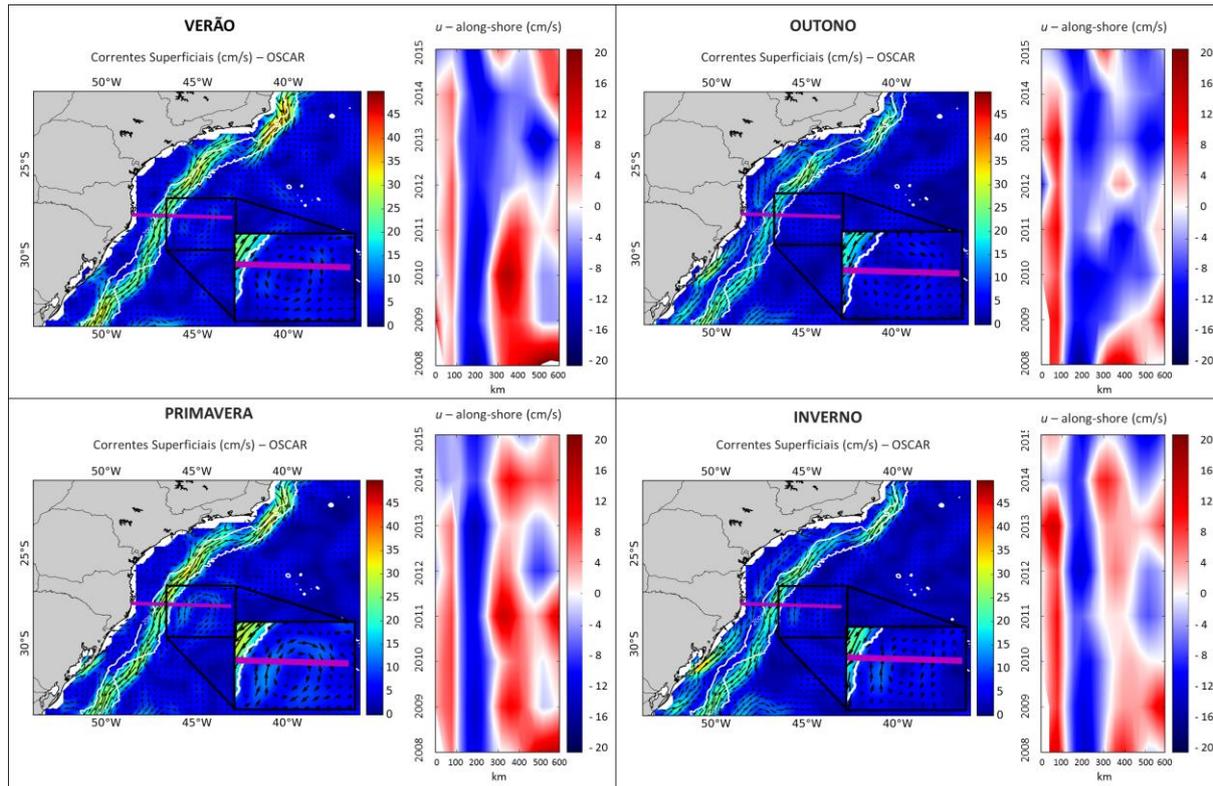


Figura 3: Climatologia sazonal (de 2008 a 2015) das correntes superficiais oceânicas na região sul-sudeste do Brasil derivadas do OSCAR. O Vórtice de Santa Marta (VSM) é mostrado no detalhe (retângulo preto). As linhas brancas representam as isóbatas de 200 e 2000 metros de profundidade. A linha magenta representa uma seção perpendicular ao estado de Santa Catarina. Os diagramas de *Hovmöller*, para cada estação do ano, da componente *u* (*along-shore*) são mostrados na figura para o período de 2008 a 2015 para cada estação do ano.

Para uma análise relacionada ao fluxo predominante da CB traçamos um transecto perpendicular à linha de costa durante as análises da climatologia sazonal (Figura 3, linha com cor magenta sobre a posição 28° S). O transecto se estendeu de 0 km (região costeira) até 600 km adentro do Atlântico Sudoeste. Diagramas de *Hovmöller* foram gerados para cada estação do ano para o período de 2008 a 2015. O fluxo da CB aparece paralelo à margem costeira sudeste do Brasil (em azul nos diagramas de *Hovmöller*), aproximadamente a 200 km de distância da costa de Santa Catarina.

Outra feição predominante nos diagramas de *Hovmöller* é o vórtice ciclônico que ocorre aproximadamente a 442 km de distância da ilha de Santa Catarina na primavera e verão (Figura 3). Este vórtice possui uma tendência de deslocamento entre latitudes durante as estações, porém em média mantém seu giro centrado em aproximadamente 28° S e 45° W e

diâmetro de 246 km, em média. Esta região possivelmente está relacionada com as instabilidades baroclínicas descritas por Calil et al. (2008) e também verificadas por Pereira et al. (2009) que destacou a presença de vórtices ciclônicos durante diferentes períodos do ano nesta região. Classificada como Vórtice de Santa Marta (VSM) por Pereira et al. (2009), porém o mesmo fica mais evidente nas estações de primavera durante os anos de 2009, 2012 e 2015 e nos verões de 2010 e 2013. Também foi possível observar que no inverno de 2011 o VSM esteve mais intenso se comparado aos outros anos desta mesma estação.

Próximo da região costeira e a oeste da CB e durante todas as estações nota-se um fluxo para norte (Figura 3 - diagramas de *Hovmöller*). Essa corrente costeira ocorreu até uma distância máxima de 100 km da costa de Santa Catarina. Nas estações de outono e inverno, quando esta corrente para norte está mais intensa, este fluxo alcançou a latitude de 24° S, dirigindo-se para leste e unindo-se posteriormente com a CB (Figura 3). As menores intensidades desta corrente costeira ocorreram durante o ano de 2014 no inverno e outono de 2015.

4. Conclusão

Os dados das componentes da velocidade do OSCAR foram validados com correntes obtidas por ADCPS nas boias do PNBOIA. Boas correlações foram encontradas, sendo que a componente paralela à costa apresentou melhores resultados. A circulação superficial derivada pelas correntes apresentou um fluxo predominante para sudoeste (Corrente do Brasil), próximo a isóbata de 200 m de profundidade. As boias do PNBOIA utilizadas para comparação foram fundeadas próximas da margem continental sul-sudeste do Brasil, captando os fluxos da CB.

Os campos de correntes do OSCAR foram capazes de caracterizar, em escala sazonal, as principais feições residentes na região de estudo como a CB, VSM e circulação inversa a CB fluindo próximo à costa. Foram notadas diferenças significativas entre as estações do ano, no qual a CB se intensifica nas estações de primavera e verão. Também foi observado indícios de instabilidades do fluxo médio da CB ao largo do estado do Rio de Janeiro, aproximadamente em 24° S (entre 42° e 44° W). Foi evidente uma atividade vorticial bastante intensa e aparentemente permanente, centrado nas coordenadas 28° S e 45° W, denominado por diferentes autores com VSM. As correntes do OSCAR também conseguiram caracterizar uma corrente que flui ao longo da costa e com largura de até 100 km, com sentido oposto ao da CB durante todas as estações do ano, porém durante o outono e inverno ela se intensifica podendo alcançar a latitude de 24° S, unindo-se à CB nesta mesma posição zonal.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Mar Centro de Oceanografia Integrada (INCT-Mar COI - Projeto: 400551/2014-4), que conta com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processo: 381408/2016-7, 381407/2016-7). GOOS-Brasil/PNBOIA por disponibilizar os dados *in-situ*, a NASA/PO.DAAC pelos dados do modelo OSCAR.

Referências Bibliográficas

Bonjean, F. ; Lagerloef, G.S.E. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean. **Journal of Physical Oceanography**. v. 32, n. 10, p. 2938-2954, 2002.

Calil, L. M.; Candella, R. N.;Fragoso, M. R. Estudo do fluxo da corrente do Brasil a partir de derivadores oceânicos. **Congresso Brasileiro de Oceanografia**. 2008.

Castro, B.M. ; Miranda, L.B. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4 N and 34 S . **The sea**, v. 11, n. 1, p. 209-251, 1998.

Haidvogel, D. B.; McWilliams, J. C.; Gent, P. R. Boundary current separation in a quasigeostrophic, eddy-resolving ocean circulation model. **Journal of physical oceanography**, v. 22, n. 8, p. 882-902, 1991.

Johnson, E.S.; Bonjean, F.; Lagerloef, G. S.; Gunn, J. T.; Mitchum, G. T. Validation and error analysis of OSCAR sea surface currents. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 24, n. 4, p. 688-701, 2007.

Olson, D. B. Rings in the ocean. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**. v. 19, p. 283, 1991.

OSCAR Third Degree Resolution User's Handbook, (2009). **Ocean Surface Current Analysis (OSCAR) Third Degree Resolution User's Handbook**. Disponível em: <<http://apdrc.soest.hawaii.edu/doc/oscarthirdguide.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2016.

Pereira, M. D.; Schettini, C.A.F.; Omachi, C.Y. Caracterização de feições oceanográficas na plataforma de Santa Catarina através de imagens orbitais. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 27, n. 1, p. 81-93, 2009.

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