

Mapeamento da frente interna da Corrente do Brasil com o uso de imagens orbitais de temperatura da superfície do mar e concentração de clorofila-*a*

Gustavo Prouvot Ortiz¹
Milton Kampel¹

1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gustavo.ortiz, milton.kampel}@inpe.br

Abstract. The article presents a dataset comprehending 1,094 Brazil Current inner fronts mapped from January-2011 to September-2015, using Sea Surface Temperature (SST) and Chlorophyll-*a* (Cl-*a*) orbital images, over the Espírito Santo, Campos, Santos and northern Pelotas Basins, SW Atlantic. 319 fronts were mapped in Summer, 264 in Autumn, 308 in Winter and 203 in Spring. The resulting frontal density fields indicate higher frontal spatial stability over three areas under the influence of semi-permanent eddies: (i) São Tomé Eddy, (ii) Cabo Frio Eddy and (iii) Shelf break eddy near São Sebastião Island. The Vitória Eddy signal was observed at the Winter frontal density field. The frontal occurrence distribution profiles, extracted from four radial transects, show different variability and position patterns over the study area. That present extensive Brazil Current fronts dataset can be used to feed descriptive statistical models or as a training dataset for a machine learning algorithm in order to improve the knowledge about the Brazil Current characteristics.

Palavras-chave: oceanic fronts, Brazil Current, SST, Chlorophyll-*a*, frontal density.

1. Introdução

As frentes oceânicas são faixas relativamente estreitas que separam zonas mais largas com diferentes tipos de estratificação e/ou massas d'água. Segundo Fedorov (1986), as frentes são normalmente caracterizadas por gradientes horizontais amplificados de temperatura, salinidade, densidade, nutrientes ou outras propriedades, como a concentração de clorofila-*a*. As frentes e correntes associadas são de suma importância para o transporte de calor e sal, para a interação oceano-atmosfera e para o funcionamento dos ecossistemas (Belkin e Cornillon, 2003). Neste contexto, o mapeamento de frentes é realizado com o uso de imagens orbitais desde a década de 70 para a identificação de processos oceanográficos. Destaca-se o trabalho de Belkin et al. (2009) que utilizou algoritmos automáticos de extração de frentes termais com o intuito de mapear globalmente as frentes oceânicas.

A Corrente do Brasil (CB) é uma corrente oceânica de contorno associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul que, de forma análoga à Corrente do Golfo no hemisfério norte (Evans e Signorini, 1985), possui papel fundamental no transporte de calor meridional e contribui para os processos climáticos globais. A CB origina-se na bifurcação da Corrente Sul Equatorial próxima a 10°S e flui para sul bordejando a plataforma continental brasileira até a região de confluência com a Corrente das Malvinas, entre 33-38°S (Silveira et al., 2000). Em sua camada mais superficial, a CB transporta Água Tropical (AT), caracterizada por salinidade acima de 36 *psu* e temperatura acima de 20° C ao longo da costa brasileira (Emílsson, 1961). A estrutura vertical da CB e mudanças de orientação na direção da costa são favoráveis ao crescimento de meandros e desenvolvimento de vórtices (Campos et al. 1995, Silveira et al. 2008).

Com o objetivo de estudar a variabilidade da posição da CB em relação à costa e à dinâmica de seus meandramentos, o mapeamento de sua frente interna foi realizado por Sartori Neto et al. (2005), onde 105 frentes termais no período 1993-2001 foram digitalizadas manualmente. Lorenzetti et al. (2009) também mapearam manualmente 199 frentes termais no período 2000-2002.

Visando contribuir para o estudo da variabilidade da CB, este trabalho apresenta uma extensa base de dados de frentes digitalizadas da CB extraídas não somente de imagens

termais como também de imagens de cor do oceano. É importante observar que a AT está associada a um ambiente oligotrófico que pode contrastar com a maior biomassa fitoplanctônica no domínio de plataforma continental (Gaeta e Brandini, 2006).

2. Metodologia

2.1 Dados orbitais

As imagens de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) são oriundas do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo dos satélites NOAA-15, 16, 18 e 19, com resolução espacial nominal de 1,1 km, e do sensor *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) a bordo do satélite MSG, com resolução espacial de ~4 km. As imagens de Concentração de Clorofila-*a* (Cl-*a*) são oriundas do sensor MODerate Resolution Imaging Spevctroradiometer (MODIS), a bordo do satélite Aqua.

Todos os dados foram recebidos em tempo-real nas instalações do INPE em Cachoeira Paulista-SP e Cuiabá-MT. As antenas receberam os dados brutos diretamente das plataformas orbitais, que foram então, processados com algoritmos específicos com o objetivo de estimar a TSM e Cl-*a* (TSM/AVHRR - McClain et al. 1983; TSM/SEVIRI - Romaguera et al. 2006; Cl-*a*/MODIS - O'Reilly et al., 1998). Por fim foram gerados mosaicos diários, acumulando todas as passagens do dia na região. Foi calculada a média simples nos *pixels* onde houve sobreposição de dados de Cl-*a* e foi mantido o *pixel* mais quente nos mosaicos de TSM

2.2 Área e período de estudo

As imagens orbitais foram analisadas na região limitada entre as latitudes de 30°S-18°S e longitudes de 49°W-35°W. Esta região engloba as Bacias do Espírito Santo, Campos, Santos e o norte de Pelotas. O período analisado foi de 01/jan/2011 a 30/set/2015, totalizando 57 meses.

2.3 Mapeamento da frente interna da CB

Foram utilizados os mosaicos diários de TSM e Cl-*a* realçados por manipulações de histograma das imagens para salientar as feições de interesse. De forma geral, nas imagens de TSM procurou-se realçar os maiores gradientes próximos à quebra de plataforma, enquanto nas imagens de Cl-*a* procurou-se a transição do ambiente oligotrófico oceânico para o ambiente mais rico na plataforma. As informações de diferentes sensores foram utilizadas de forma sinérgica, complementando-se em áreas onde pudessem ocorrer incertezas, ruídos ou falhas na aquisição dos dados.

Todo o processo foi realizado por analistas intérpretes experientes, que analisaram as imagens diariamente de forma operacional. Isto contribuiu sobremaneira para a delimitação das frentes, pois o acompanhamento diário das feições oceanográficas permitiu que as informações de dias anteriores pudessem auxiliar efetivamente no mapeamento. Algoritmos de detecção de bordas foram testados mas a análise visual se mostrou mais eficiente”

2.4 Densidade frontal

Através de técnicas de geoprocessamento, os arquivos vetoriais diários com a frente interna da CB digitalizada foram transformados em grades com células de 10km x 10km. As grades foram acumuladas com o objetivo de gerar um mapa de densidade frontal, de acordo com o processamento realizado por Lorenzetti *et al.* (2009).

2.5 Extração de transectos

Quatro transectos de dados perpendiculares à costa foram extraídos dos mapas de densidade frontal. Cada transecto foi gerado com resolução amostral de 0,1°, com a utilização

de interpolação bicúbica e janela de busca de 4x4 pixels na imagem original de TSM ou Cl-a para cada nó do transecto (vide a localização na Figura 1A).

Dadas as limitações por cobertura de nuvens e outros mascaramentos de dados, cada transecto apresentou diferentes números de observações ou mapeamento das frentes válidos em todo o período de estudo. Para corrigir essas diferenças e auxiliar na interpretação dos resultados, os dados foram normalizados pelo número de observações válidas em cada transecto, respectivamente.

3. Resultados e Discussão

3.1 Mapa de densidade frontal

As frentes oceânicas digitalizadas são apresentadas em forma de mapas de densidade frontal (Figura 1). Ao longo do período de 58 meses foram digitalizadas 1.094 frentes internas da CB. O mapa acumulado da densidade de frentes em todo período (Figura 1A) indica a presença de três segmentos com maior estacionariedade espacial: (i) associado ao meandro ciclônico no Cabo de São Tomé, (ii) ao meandro ciclônico em Cabo Frio e (iii) a um meandro ao largo da Ilha de São Sebastião. A maior estacionariedade em (i) e (ii) corroboram os resultados obtidos por Lorenzetti et al. (2009). No entanto, o resultado em (iii) não foi observado em trabalhos anteriores. Apenas Garfield (1990), citado por Rocha et al. (2014), apresenta este meandro ciclônico associado à frente da CB, indicando sua persistência temporal.

Nota-se que a maior variabilidade espacial ocorreu na Bacia de Santos, ao largo do RJ, entre os transectos em Cabo Frio e São Sebastião, onde a posição da frente da CB variou em uma faixa de 340 km transversalmente à costa. Esta alta variabilidade também foi observada por Silveira et al. (2008), onde foi atribuída à propagação de trem de ondas de vortacidade relacionada à CB nesta região.

Maiores detalhes sobre a variabilidade da frente da CB podem ser observados nos mapas de densidade frontal sazonais. No período de verão ‘Jan/Fev/Mar’ (Figura 1B), quando foram digitalizadas 319 frentes, nota-se, além dos meandros (i) e (ii), o sinal persistente de um meandro anti-ciclônico ao largo da Restinga da Marambaia, no RJ, associado ao já citado trem de ondas de vortacidade (Silveira *et al.*, 2008). Durante o verão a frente da CB mais se aproximou da costa no RJ ficando a apenas 20 km de distância.

Durante o período de outono ‘Abr/Mai/Jun’ (Figura 1C), quando foram mapeadas 264 frentes, nota-se uma maior permanência da frente interna da CB sobre a isóbata de 200m entre os meandros (ii) e (iii). Já no período de inverno ‘Jul/Ago/Set’ (Figura 1D), quando foram digitalizadas 308 frentes, são notáveis o sinal realçado da borda externa do vórtice de Vitória (Schmid et al. 1995), ao norte de 21°S, e o sinal de um meandro ciclônico no norte da Bacia de Pelotas, em 29°S. Por fim, no período de primavera ‘Out/Nov/Dez’ (Figura 1E), quando foram digitalizadas 203 frentes, o sinal de densidade frontal da CB é similar ao comportamento acumulado em todo o período (Figura 1A).

3.2 Transectos

Os dados extraídos de quatro transectos do mapa de densidade frontal estão apresentados na Figura 2. Nota-se que em “Cabo de São Tomé”, “Cabo Frio” e “Ilha de São Sebastião” a frente da CB esteve presente a maior parte do tempo a cerca de ~100 km da costa. Apresentou menor variabilidade em “Cabo Frio” com pico de distribuição de ocorrência atingindo 32%, enquanto na “Ilha de São Sebastião” a distribuição apresentou pico de 13% e maior variabilidade ao longo do período. Esta maior variabilidade também foi atribuída à propagação de trem de ondas de vortacidade relacionada à CB nesta região (Silveira et al., 2008).

Já no transecto “Cabo de Santa Marta”, a distribuição indica que a frente da CB esteve mais tempo posicionada entre 175-200 km da costa. Neste transecto, a frente da CB também apresentou grande variabilidade, com o perfil de distribuição similar ao da “Ilha de São Sebastião”.

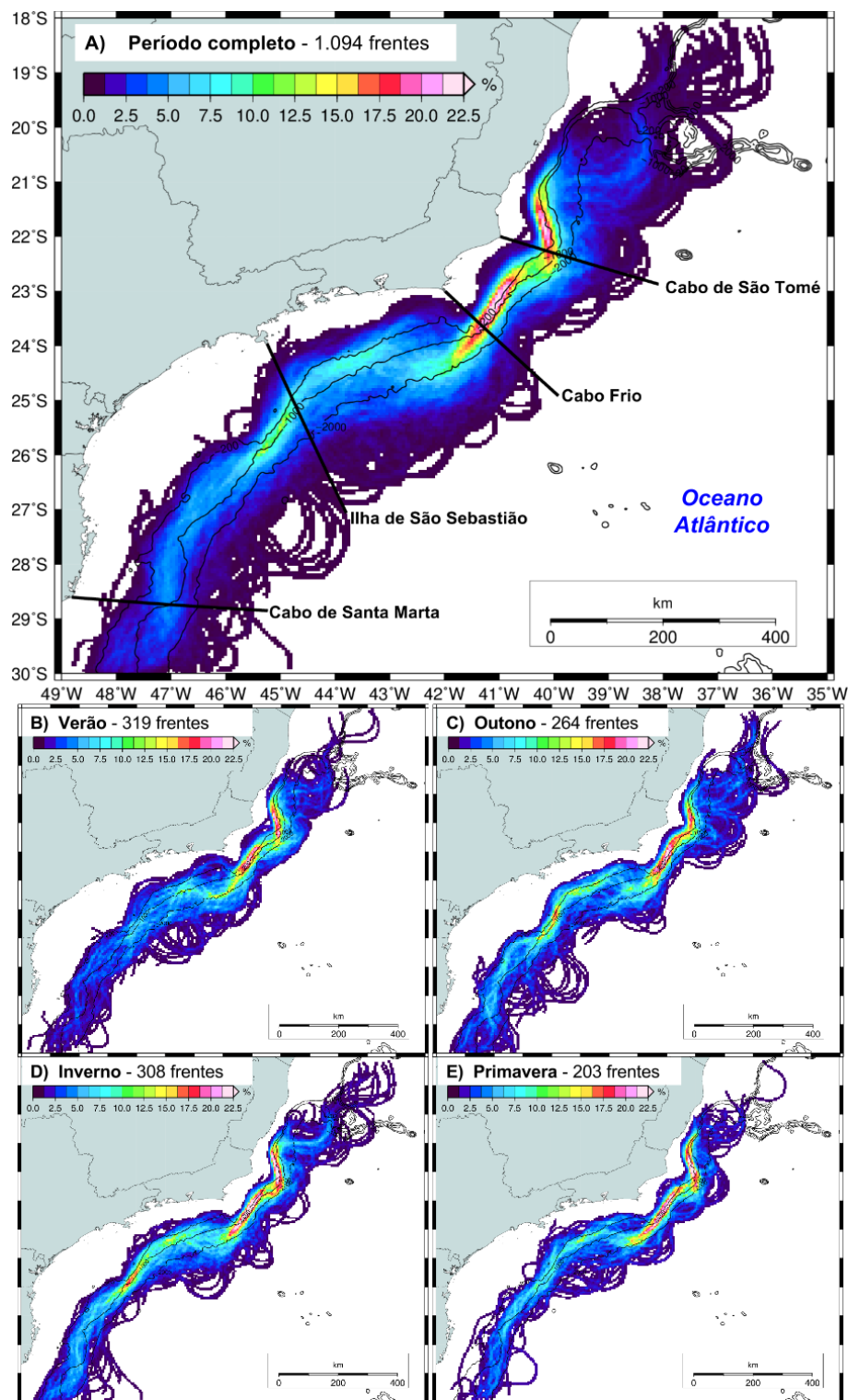


Figura 1: Mapas de densidade da frente interna da CB. A) Acumulado de 1.094 frentes mapeadas no período de jan/2011 a set/2015; B) Acumulado de 319 frentes sazonais no período de verão (JFM); C) Acumulado de 264 frentes no período de outono (AMJ); D) Acumulado de 308 frentes no período de inverno (JAS); E) Acumulado de 203 frentes no período de primavera (OND). Isóbatas de 200 m, 1000 m e 2000 m em linhas pretas finas. As radiais em linhas grossas em (A) representam os quatro transectos discutidos no texto.

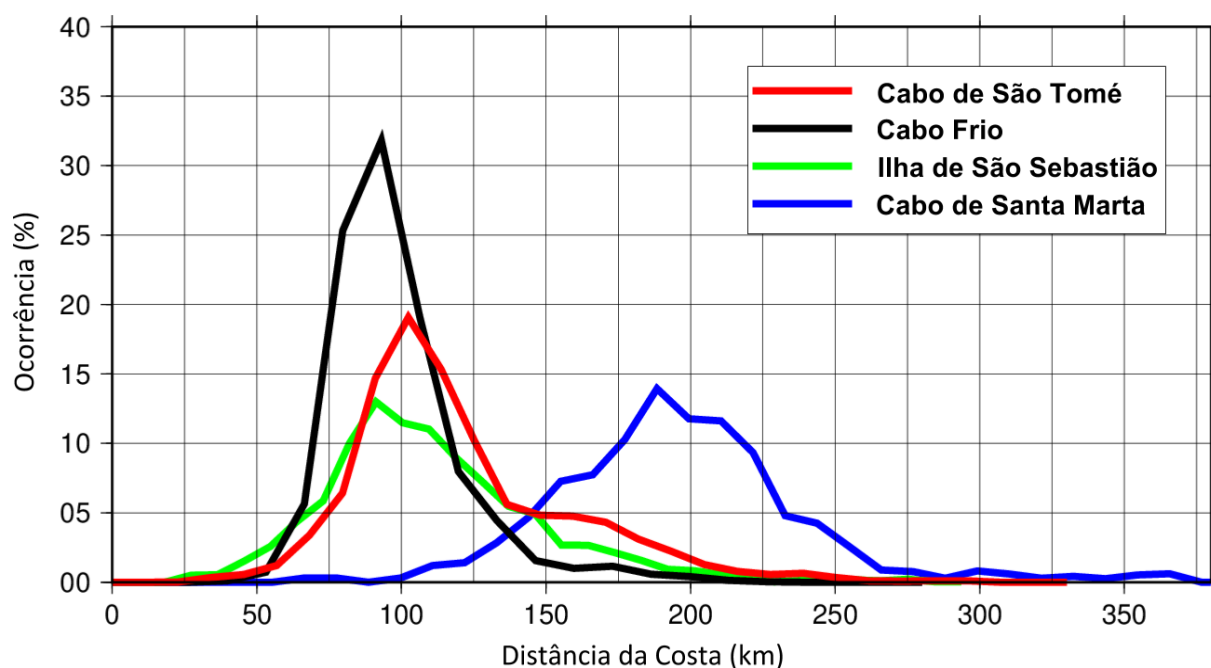


Figura 2. Perfis de probabilidade de ocorrência da frente da CB extraídos de quatro transectos na região de estudo (ver Fig.1). Nota-se que os perfis em “Cabo de São Tomé”, “Cabo Frio” e “Ilha de São Sebastião” apresentam pico próximo de 100 km de distância da costa, enquanto o perfil em “Cabo de Santa Marta” apresenta pico mais afastado, a cerca de 200 km da costa.

4. Conclusões

O trabalho apresentou uma análise sobre a variabilidade de 1.094 frentes internas da CB. Esta talvez seja a maior base de dados deste tipo já reportada na região das Bacias do Espírito Santo, Campos, Santos e norte de Pelotas. O mapa de densidade frontal apresentou maiores valores, ou seja, maior estabilidade espacial, nas áreas dos meandros de São Tomé, Cabo Frio e de um meandro ciclônico ao largo da Ilha de São Sebastião, na Bacia de Santos. O detalhamento dos campos sazonais permitiu a observação do sinal da borda externa do Vórtice de Vitória durante o inverno. Os perfis de distribuição extraídos de quatro transectos demonstraram haver diferentes padrões de variabilidade e da posição média da frente da CB ao longo da área de estudo.

Comparações com outras metodologias de extração das frentes também são de interesse e já se encontram em andamento. A análise desta base de dados deverá ser aprofundada podendo ser utilizada para alimentar modelos estatísticos que auxiliem na descrição quantitativa dos atributos da CB e servir como treinamento para modelos de aprendizado de máquinas que efetivamente delineiem a frente da CB de forma automática.

Agradecimentos

À equipe de oceanógrafos baseada na DSA/CPTEC/INPE que diariamente acompanhou os processos ambientais e digitalizou a base de dados da Corrente do Brasil utilizada neste trabalho. O presente trabalho é fruto do escopo do projeto mantido pela FUNCATE em parceria com a Petrobras (registro 101101005900).

Ortiz, G.P é bolsista de mestrado CNPq (processo 131243/2016-0). Kampel, M. foi parcialmente financiado pelo projeto IAICRN3094 do Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) que é apoiado pela US National Science Foundation (Grant GEO-1128040).

Referências Bibliográficas

- Belkin, I. M.; Cornillon, P. C.. SST fronts of the Pacific coastal and marginal seas. **Pacific Oceanography**, v. 1, n. 2, p. 90–113, 2003.
- Belkin, I. M.; Cornillon, P. C.; Sherman, K. Fronts in Large Marine Ecosystems. **Progress in Oceanography**, v. 81, n. 1–4, p. 223–236, 2009.
- Campos, E. J. D.; Gonçalves, J. E.; Ikeda, Y. Water mass structure and geostrophic circulation in the South Brazil Bight - Summer of 1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C9, 18537–18550, 1995
- Emílsson, I. The shelf and coastal waters off southern Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 11, n. 2, p. 101–112, 1961.
- Evans, D. L.; Signorini, S. S. Vertical structure of the Brazil Current. **Nature**, v. 315, p. 48–50, 1985.
- Fedorov K.N. **The Physical Nature and Structure of Oceanic Fronts**. Springer-Verlag, Berlin. 1986, 333 p.
- Gaeta, S. A.; Brandini, F. P. Produção Primária do Fitoplâncton na Região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: Rossi-Wongtschowski, C. L. D. B; Madureira, L. S. (Org.). **O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil**. 1A ed. São Paulo: EDUSP, 2006, p. 219-264.
- Garfield, N. **The Brazil Current at subtropical latitudes**, PhD thesis, Univ. of Rhode Island, Kingston. 1990
- Lorenzetti, J. A.; Stech, J. L.; Mello Filho, W. L.; Assireu, A. T. Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 17, p. 2061–2068, 2009.
- Kampel M.; Ortiz, G.; Freitas L. B. Calibração e validação do algoritmo de estimativa da temperatura da superfície do mar a partir de dados do satélite meteosat para a margem brasileira. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 14. (COLACMAR), 2011, Balneário Camboriú Balneário Camboriú. **Anais...** 2011. v. 1, p. 571-573. DVD.
- McClain, E. P. et al. Multi-channel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures. **Advances in Space Research**, v. 2, n. 6, p. 43–47, 1983.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Cardel, K. L., Garver, S. A., et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 103, n. C11, p. 24937–24953, 1998.
- Rocha, C. B.; Silveira, I. C. A.; Castro, B. M.; Lima, J. A. M. Vertical structure, energetics, and dynamics of the Brazil Current System at 22°S–28°S. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 1, p. 52–69, 2014.
- Romaguera, M.; Sobrino, J. A.; Olesen, F. -S. Estimation of sea surface temperature from SEVIRI data: algorithm testing and comparison with AVHRR products. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 737628706, p. 5081–5086, 2006.
- Sartori Neto, A.; Soares, V. P.; Lima, J. A. M.; Ribeiro, C. A. A. S.; Griffith, J. J. Análise de imagens termais AVHRR utilizando transformada de Fourier para determinação de padrões em vórtices e meandros. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3671–3678.
- Schmid, C.; Schäfer, H.; Podestá, G.; Zenk, W.. The Vitória Eddy and Its Relation to the Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 25, n. 11, p. 2532–2546, 1995.
- Silveira, I. C. A.; Schmidt, A. C. K.; Campos, E. J. D.; de Godoi, S. S.; Ikeda, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.
- Silveira, I. C. A.; Lima, J. A. M.; Schmidt, A. C. K.; Ceccopieri, W.; Sartori, A. Francisco, C. P. F.; Fontes, R. F. C. Is the meander growth in the Brazil current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability?. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, p. 187–207, 2008.