

## Variabilidade de frentes térmicas oceânicas observadas por sensoriamento remoto na costa brasileira

Leandro Rodrigues de Freitas<sup>1,2</sup>  
Milton Kampel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Pesquisas da Petrobras - CENPES  
Av. Horácio de Macedo 950 – 21941-915 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
rodriguesf@petrobras.com.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
milton@dsr.inpe.br

**Abstract.** Thermal oceanic fronts exert influence on various components of the adjacent marine and atmospheric environment. Thus, the knowledge of its space-time variability is quite important. In the present study a remote sensing database of sea surface temperature (SST) and a computational algorithm were used to locate, map and characterize the oceanic thermal fronts in the South, Southeast, and East coast of Brazil. This methodology represents a significant improvement compared to previous studies in the region. In the present study there was an expansion of the studied area, now including the continental shelf and slope from Royal Charlotte (15°S) and Abrolhos Bank in the north to the Rio Grande do Sul at 35°S in the south. SST time series was also expanded comprising a period of 10 years from 01/2003 to 12/2012. With this study it was possible to detect and characterize the seasonal signature of thermal fronts of previously reported phenomena, such as the intrusion of the Coastal Brazil Current, the internal thermal front and the vortices of the Brazil Current, coastal upwelling and riverine plumes. The methodology applied in this study can be replicated in other geographic areas. Other satellite derived oceanographic products, such as chlorophyll-*a* concentration and sea surface salinity can also be used besides SST.

**Palavras-chave:** *ocean remote sensing, oceanography, coastal processes, air-sea interactions*, sensoriamento remoto dos oceanos, oceanografia, processos costeiros, interação oceano-atmosfera.

### 1. Introdução

Uma frente oceânica é uma zona estreita com forte gradiente horizontal de uma ou mais variáveis oceanográficas, como por exemplo, salinidade, temperatura, densidade, nutrientes (Klemas, 2012). A importância destas zonas frontais abrange muitos aspectos. Jatos, meandramentos e vórtices podem ocorrer em frentes separando massas d'água com diferentes densidades (Cushman-Roisin e Beckers, 2010). A turbulência nas zonas frontais gera intensa mistura entre as massas d'água (Bowers et al., 1984) e fornece energia para as camadas superiores do oceano (D'Asaro et al., 2011), com impactos na dinâmica do fitoplâncton (Mahadevan et al., 2012). Pelo caráter de convergência em superfície, as frentes são constantemente zonas de concentração de produtores primários (Saraceno et al., 2005), ictioplâncton (Bakun, 2006) e de forte interação predador-presa (Mugo et al., 2013). A atmosfera adjacente também é fortemente influenciada, com modulação da temperatura e vento (Pezzi et al., 2005; Small et al., 2008).

Pelo fato das frentes se manifestarem nas propriedades oceânicas superficiais passíveis de observação por satélites, como temperatura, cor, rugosidade e altura (Robinson, 2010) e também pelas frentes ocorrerem com variadas escalas de extensão – desde poucos metros até quilômetros – os sensores remotos são ferramentas úteis para o estudo destas feições, fornecendo a visão sistemática e sinóptica necessária. A temperatura da superfície do mar (TSM) é a variável orbital com o maior acervo histórico, contando hoje com mais de 30 anos de dados de diferentes plataformas, operando no infravermelho e nas micro-ondas. Novos produtos de TSM nível-4 vêm sendo criados recentemente, resultantes da fusão de dados de TSM provenientes de vários sensores micro-ondas e infravermelho que operam em diferentes

satélites. Estes produtos híbridos apresentam alta resolução espacial e temporal, não apresentam “buracos” por falta de dados ou presença de nuvens e por isso são indicados para estudar as frentes térmicas.

Um panorama global das frentes térmicas mapeadas por imagens de TSM pode ser visto em Belkin et al. (2009), mas estudos locais são necessários para detalhamento do fenômeno. Na região da Corrente do Brasil (CB), alguns estudos da variabilidade de frentes térmicas foram realizados (Lorenzetti et al., 2009; Mello Filho, 2006; Sartori Neto, 2004). Um fator comum entre estes estudos foi a definição e o traçado manual das frentes por um intérprete treinado. Este método subjetivo tem por vantagem a interpretação de feições mesmo na presença de nuvens que por acaso interrompam a visualização da feição. Entretanto, suas desvantagens residem na subjetividade de interpretação e traçado e também na dificuldade em processar grandes volumes de dados de modo sistemático. Assim, algoritmos computacionais representam uma vantagem no que se refere ao processamento de grandes lotes de dados e à replicação de resultados. Um dos algoritmos mais utilizados (Belkin, et al., 2009) para este fim é o *Single Image Edge Detector* (SIED), proposto por Cayula e Cornillon (1992).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial e temporal das frentes térmicas na costa brasileira. Uma metodologia objetiva de detecção e mapeamento das frentes foi aplicada a uma base de 10 anos de dados de TSM. Os resultados foram analisados à luz do conhecimento da literatura para a área de estudo.

## 2. Metodologia

Os dados de TSM utilizados foram da base multissensores denominada *Multi-scale Ultra-high Resolution SST* (MUR). A TSM MUR tem resolução temporal diária e resolução espacial de  $0,011^\circ$  (aproximadamente 1,1 km), utilizando dados de diferentes sensores (Chin et al., 2013) com boa representatividade dos gradientes de temperatura (Armstrong et al., 2012; Vazquez-Cuervo et al., 2013). Foram utilizadas imagens diárias entre 01/01/2003 e 31/12/2012 (totalizando 3652 imagens). A área de estudo está compreendida entre as latitudes  $15\text{-}35^\circ\text{S}$  e longitudes  $35\text{-}54^\circ\text{W}$ , englobando a costa E-SE-S do Brasil (Figura 1), região com ampla atividade econômica marinha.

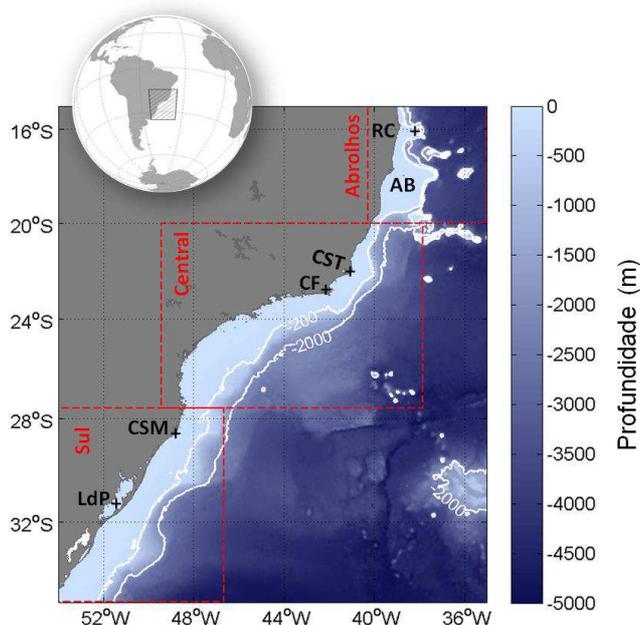


Figura 1: Mapa da área de estudo localizada na costa E-SE-S do Brasil. A batimetria (ETOP-1) é mostrada em escala de cinza, com as isóbatas de 200 e 2000m em branco. Regiões de interesse são identificadas por siglas: RC=Banco Royal Charlotte; AB=Banco de Abrolhos; CST=Cabo de São Tomé; CF=Cabo Frio; CSM=Cabo de Santa Marta; LdP=Lagoa dos Patos. Três subáreas de estudo foram delimitadas por retângulos em vermelho tracejado: Abrolhos, Central e Sul.

O algoritmo SIED (Cayula e Cornillon, 1992) foi aplicado nas imagens diárias de  $TSM_{MUR}$  para identificação das frentes. O SIED é um algoritmo baseado na análise do histograma em janelas da imagem. Caso o histograma seja bimodal, há duas populações de píxeis (modos) representados por uma massa d'água mais fria e outra, mais quente, separadas por poucos píxeis de temperatura intermediária. A diferença mínima entre os dois modos foi ajustada em  $0,4^{\circ}C$ . A frente está presente na janela caso haja coerência espacial nos píxeis que a representam. Uma imagem binária é gerada com os píxeis da zona frontal com valores "1" e valores "0" caso não haja frente. A janela do SIED é móvel, medindo  $32 \times 32$  píxeis que percorrem toda a imagem e tem sobreposição ajustável, de no mínimo 50% (16 píxeis). As frentes marcadas são tão mais largas quanto maior a sobreposição das janelas, sendo que foi utilizada sobreposição de 30 píxeis. O SIED utilizado está implementado em uma caixa de ferramentas do ArcGIS chamada *Marine Geospatial Ecology Tools* (MGET) (Roberts et al., 2010).

Após a detecção em todas as imagens, foi gerada a climatologia sazonal de frentes, agrupando todas as imagens binárias para os períodos: verão (janeiro-março), outono (abril-junho), inverno (julho-setembro) e primavera (outubro-dezembro). O agrupamento foi feito somando-se todas as imagens binárias e dividindo-se pelo número total de imagens, o que resultou em imagens de "probabilidade percentual de ocorrência de uma frente por píxel" (que foi chamado  $\%FNT_{MUR}$ ). Para auxiliar a visualização das frentes térmicas, a área de estudo foi separada em 3 zonas: Abrolhos, Central e Sul (Figura 1). Em cada área, linhas representando o 90 percentil da climatologia anual de cada área (p90) foram sobrepostas às imagens. Este valor de  $\%FNT_{MUR}$  correspondente ao 90 percentil é informado na legenda de cada figura.

### 3. Resultados e Discussão

A distribuição geográfica e temporal das frentes é exibida nas Figuras 2, 3 e 4. Cada área será discutida em separado nas seções seguintes.

#### 3.1. Abrolhos

A Figura 2 mostra a probabilidade das frentes na área de Abrolhos. A concentração de frentes na quebra da plataforma dos bancos Royal Charlotte (RC) e dos Abrolhos é maior no primeiro semestre do ano, associadas com a presença de Água Tropical transportada pela Corrente do Brasil (Soutelino et al., 2013) convergindo com as águas mais frias e bem misturadas verticalmente sobre os bancos (Castro et al., 2013). As frentes na foz do Rio Caravelas, do Rio Doce e na região costeira entre estes são maiores no verão e podem ser associadas com a maior vazão destes rios nesta estação do ano (Jennerjahn et al., 2010). Sobre o banco de Abrolhos frentes de maré são observáveis paralelas à costa com mais de 300km de extensão, variando sua posição em até 30km de distância da costa (Cabral et al., 2001).

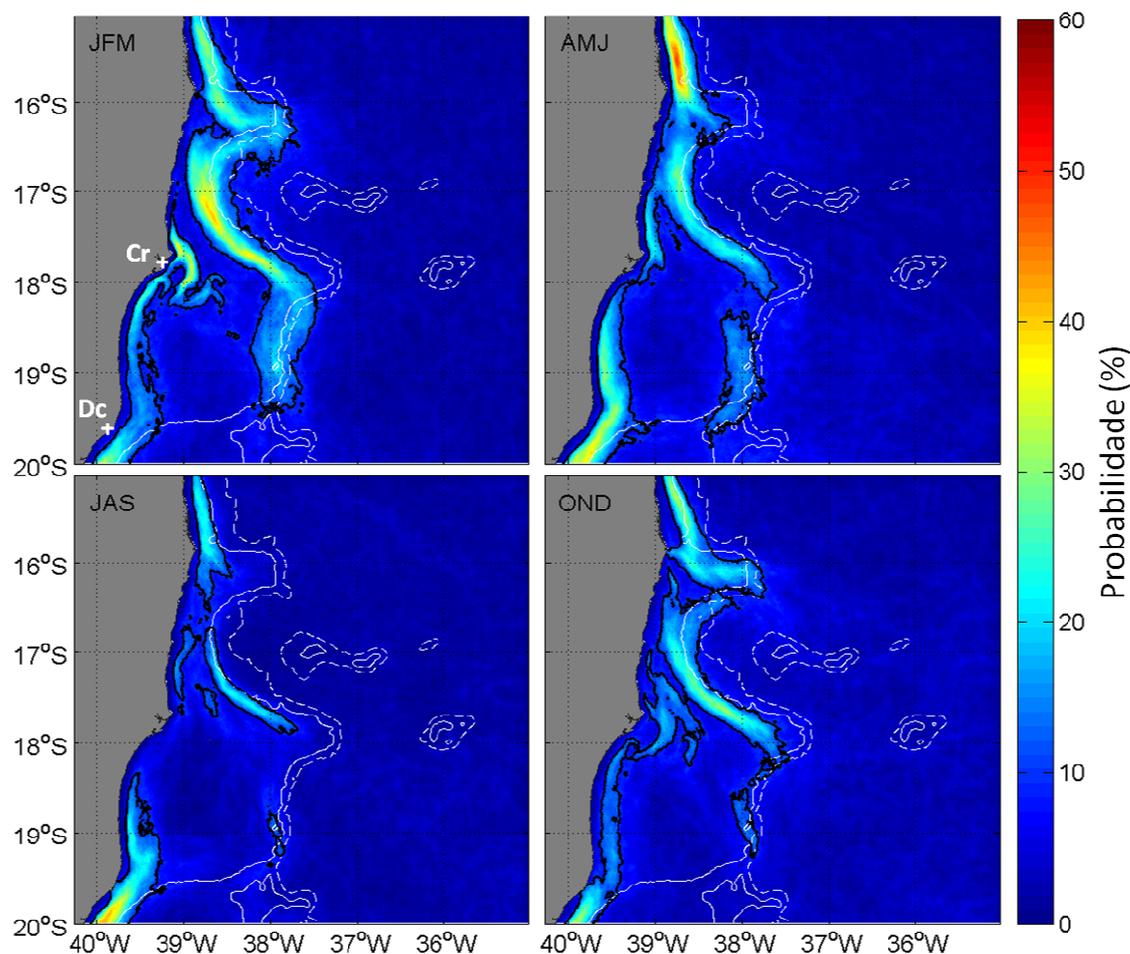


Figura 2: Climatologia sazonal da probabilidade %FNT<sub>MUR</sub> para a região de Abrolhos (ver texto para sigla). As isóbatas de 200m (contínua) e 2000m (tracejada) estão traçadas em branco. A linha contínua preta representa o p90 médio da área, igual a 10,33%. As siglas no primeiro quadro significam: Cr=foz do Rio Caravelas; Dc=foz do Rio Doce.

### 3.2. Central

Na Figura 3 é possível observar a frente da Corrente do Brasil em praticamente toda a extensão N-S da área Central. A posição destas frentes tende a localizar sobre a isóbata de 200m, concordando com estudos anteriores (Silveira et al., 2008; Lorenzetti et al., 2009). Na região do Cabo Frio (longitude 42°W) pode ser observado um grande espalhamento das frentes na direção meridional, na região de ocorrência do Vórtice do Cabo Frio (Silveira et al., 2008). Durante o verão as frentes se aproximam da região costeira do Rio de Janeiro. No outono-inverno a extensão máxima das frentes ocorre para o sul, como também observado por Lorenzetti et al. (2009). A intrusão durante o inverno de águas frias originadas na plataforma sul foi reportada por Souza e Robinson (2004), que deram o nome de Corrente Costeira do Brasil (CCB) e que pode chegar a estender-se até a latitude 23°S. O contraste térmico da CCB, mais fria, com as águas quentes da CB, mais *offshore*, origina a alta probabilidade das frentes observada sobre o talude continental ao sul de 26°S.

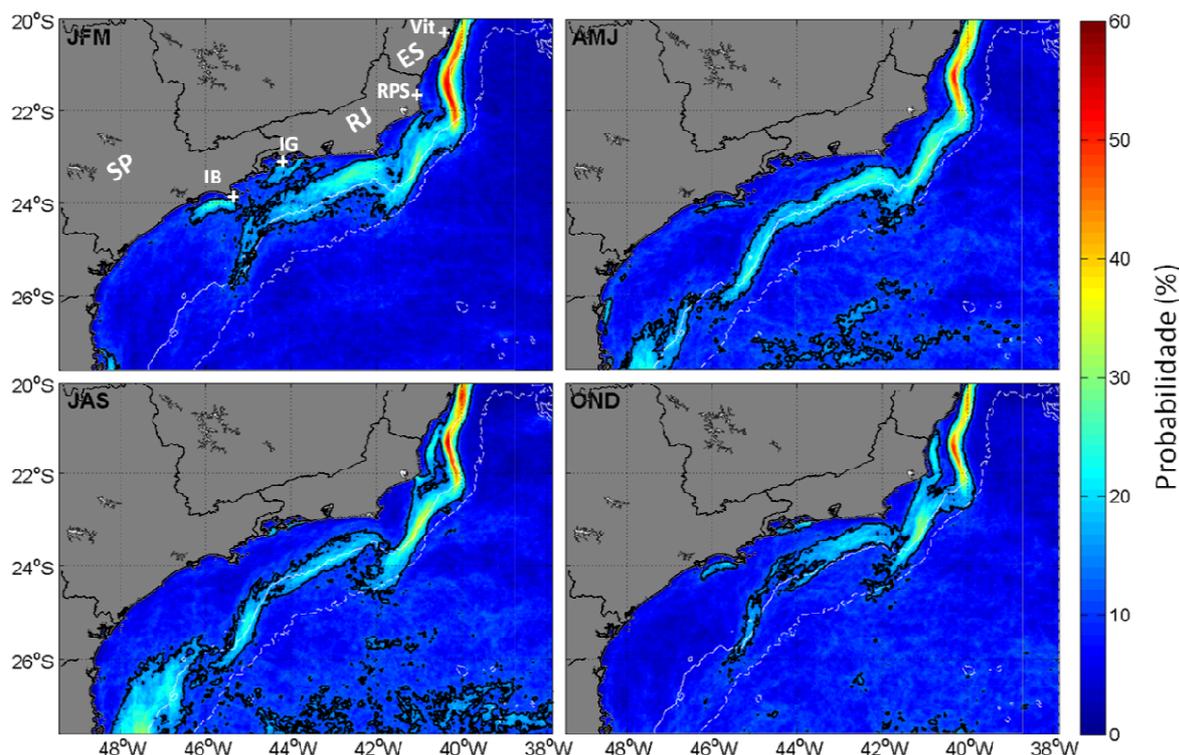


Figura 3: Climatologia sazonal da probabilidade  $\%FNT_{MUR}$  para a área central. As isóbatas de 200m (contínua) e 2000m (tracejada) estão sobrepostas em branco. A linha contínua preta representa o p90 (ver texto para siglas) médio da área, igual a 13,32%. As siglas representam os estados ES=Espírito Santo, RJ=Rio de Janeiro e SP=São Paulo, além dos pontos de Vit.=Vitória, RPS=Rio Paraíba do Sul, IG=Ilha Grande e IB=Ilhabela.

### 3.3. Sul

As frentes da área Sul podem ser vistas na Figura 4. De maneira geral, a área ocupada pelas frentes mais significativas ( $>p90$ ) é relativamente maior no inverno, comparado às outras estações. No verão e primavera, concentram-se frentes em águas rasas com profundidades entre 50 e 100m, localizadas desde o Cabo de Santa Marta (CSM) até a latitude  $32^{\circ}S$ , onde se curvam para *offshore* acompanhando a topografia até a isobata de 200m. Uma hipótese é que do lado interno destas frentes, predominariam as águas da ressurgência costeira, que é mais frequente no verão e primavera (Campos et al., 2013). Na parte *offshore* destas frentes predominam as águas influenciadas pela Corrente do Brasil (Silveira et al., 2008).

No outono e inverno o  $\%FNT_{MUR}$  passa a ocupar mais porções da plataforma média e desaparecem as frentes costeiras próximas ao deságue da Lagoa dos Patos vistas no verão. Uma explicação para este comportamento é a atuação da CCB no inverno (Souza e Robinson, 2004), que traria para latitudes menores a Água Subantártica de Plataforma (Piola et al., 2000), resultante da mistura de águas de plataforma, do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos.

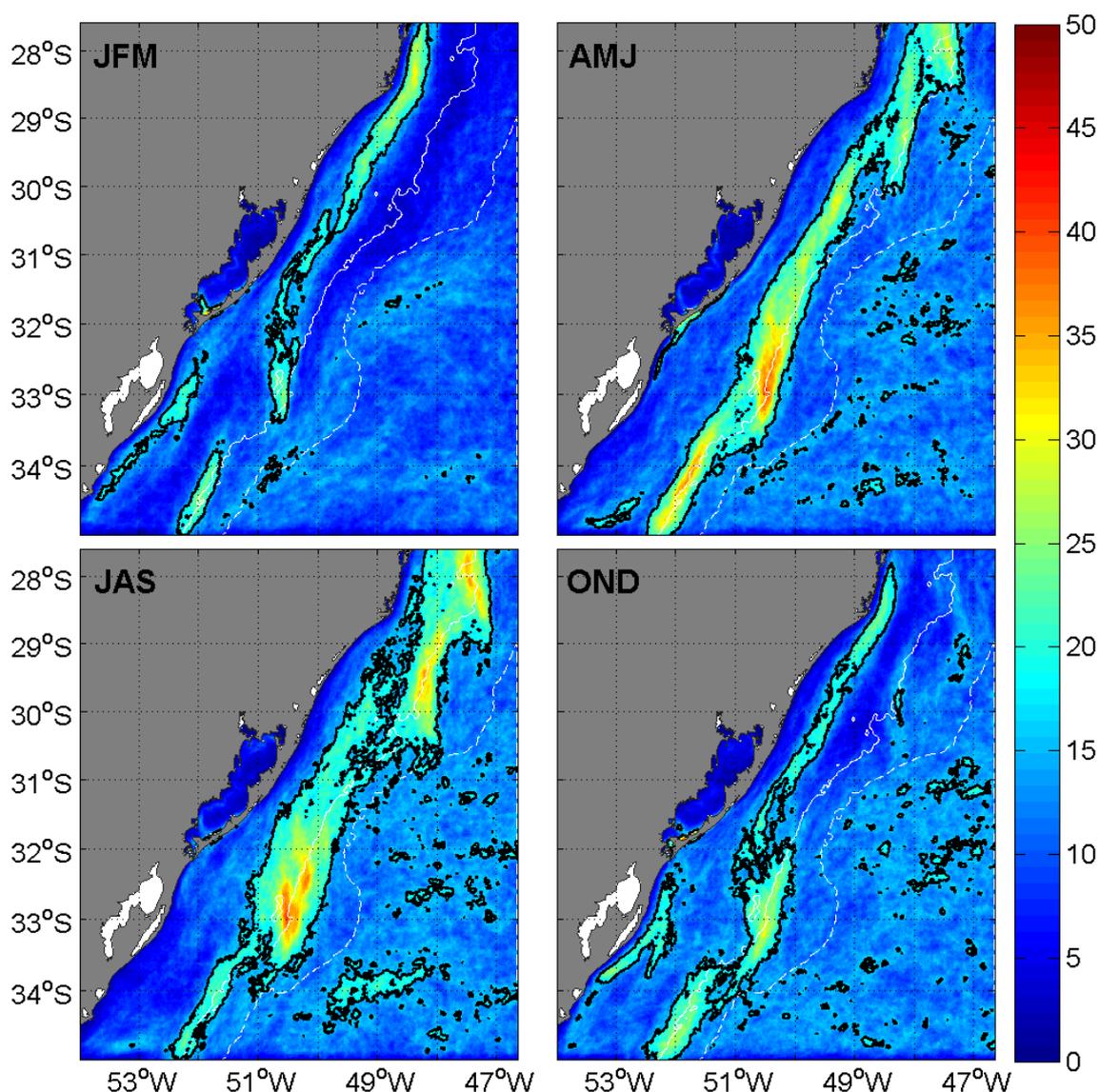


Figura 4: Climatologia sazonal da probabilidade %FNT<sub>MUR</sub> para a área sul. As isóbatas de 200 (contínua) e 2000m (tracejada) estão sobrepostas em branco. A linha contínua preta representa o p90 (ver texto para siglas) médio da área, igual a 16,74%. Notar que a escala de probabilidade é diferente das figuras anteriores.

### Conclusões e Recomendações

A aplicação do algoritmo SIED à série temporal de 10 anos de dados de TSM da base MUR permitiu caracterizar as principais frentes térmicas da costa E-SE-S brasileira. Graças ao baixo limiar de temperatura de 0,4° utilizado no SIED, foi possível detectar frentes mesmo em regiões de baixo gradiente térmico, como é o caso do banco de Abrolhos. As climatologias de frentes nas três áreas mostram o comportamento espaço-temporal destas feições oceanográficas e podem ser utilizados como orientadoras na análise oceânica. Seu uso pode indicar regiões de interesse biológico para fins de preservação, de hidrodinâmica intensa, com potencial formação de jatos, de difícil propagação sonora horizontal, de acumulação de poluentes e detritos à deriva. Estudos *in-situ* sobre as variáveis oceanográficas influenciadas pelas frentes carecem de adensamento de observações na região de ocorrência destas feições. A metodologia utilizada neste trabalho pode ser adaptada para outras variáveis oceanográficas observáveis por satélites, como concentração de clorofila-*a*, transparência, material particulado e altura da superfície do mar.

## Referências Bibliográficas

- Armstrong, E. M.; Wagner, G.; Vazquez-Cuervo, J.; Chin, T. M. Comparisons of regional satellite sea surface temperature gradients derived from MODIS and AVHRR sensors. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 21, p. 6639–6651, 10 nov. 2012.
- Bakun, A. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response. *Scientia Marina*, v. 70, n. S2, p. 105–122, 2006.
- Bower, A. S.; Rossby, H. T.; Lillibridge, J. L. The Gulf Stream Barrier or Blender. **Journal of physical oceanography**, v. 15, p. 24–32, 1984.
- Cabral, A. P.; Baptista, M. C.; Hargreaves, F.; Gherardi, D. F. M.; Mano, M. Caracterização de feições oceanográficas e sedimentares na região dos bancos Royal Charlotte e dos Abrolhos (BA, Brasil), através de dados SAR/ERS-1/2, AVHRR/NOAA, Difusômetro/ERS-2, Topex/Poseidon e TM/Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. (SBSR), 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 769-776. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2001/09.19.12.06>>.
- Campos, P. C.; Möller JR., O. O.; Piola, A. R.; Palma, E. D. Seasonal variability and coastal upwelling near Cape Santa Marta (Brazil). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 3, p. 1420–1433, 21 mar. 2013.
- Castro, B. M.; Dottori, M.; Pereira, A. F. Subinertial and tidal currents on the Abrolhos Bank shelf. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 3–12, nov. 2013.
- Cayula, J.; Cornillon, P. C. Edge detection algorithm for SST images. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 9, n. 1, p. 67–80, 1992.
- Chin, T. M.; Vazquez-Cuervo, J.; Armstrong, E. M. **A multi-scale, high-resolution analysis of global sea surface temperature**. 2013. Disponível em: <<http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/JPL-L4UHfnd-GLOB-MUR>>.
- Cushman-Roisin, B.; Beckers, J.M. **Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects**. Academic Press, 2010. 786 p.
- D’asaro, E.; Lee, C.; Rainville, L.; Harcourt, R.; Thomas, L. Enhanced turbulence and energy dissipation at ocean fronts. **Science (New York, N.Y.)**, v. 332, n. 6027, p. 318–22, 15 abr. 2011.
- Jennerjahn, T. C.; Knoppers, B. A.; Souza, W. F. L. DE; Carvalho, C. E. V.; Mollenhauer, G.; Hubner, M.; Ittekkot, V. The tropical brazilian continental margin. In: LIU, K.-K.; Atkinson, L.; Quinones, R.; Talaue-Mcmanus, L. (Org.). **Carbon and nutrient fluxes in continental margins: a global synthesis**. Springer, 2010. p.427–442.
- Klemas, V. V. Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: overview and case study. **Journal of Coastal Research**, v. 278, p. 1–7, jan. 2012.
- 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, set. 2009.
- Mahadevan, A.; D’asaro, E.; Lee, C.; Perry, M. J. Eddy-driven stratification initiates North Atlantic spring phytoplankton blooms. **Science (New York, N.Y.)**, v. 337, n. 6090, p. 54–8, 6 jul. 2012.
- Mello Filho, W. L. **Observação de feições oceanográficas de superfície na costa sudeste brasileira através de imagens termais do sensor AVHRR/NOAA**. 2006. 85 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Acesso em: 11 jul. 2014.
- Mugo, R. M.; Saitoh, S.-I.; Takahashi, F.; Nihira, A.; Kuroyama, T. Evaluating the role of fronts in habitat overlaps between cold and warm water species in the western North Pacific: a proof of concept. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, dez. 2013.

Pezzi, L. P.; Souza, R. B.; Dourado, M. S.; Garcia, C. A. E.; Mata, M. M.; Silva-Dias, M. A. F. **Ocean-atmosphere in situ observations at the Brazil-Malvinas Confluence region**. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 22, p. L22603, 2005.

Piola, A. R.; Campos, E. J. D.; Möller JR., O. O.; Charo, M.; Martinez, C. Subtropical Shelf Front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 6565–6578, 2000.

Roberts, J. J.; Best, B. D.; Dunn, D. C.; Treml, E. A.; Halpin, P. N. Marine Geospatial Ecology Tools: An integrated framework for ecological geoprocessing with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and C++. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 10, p. 1197–1207, out. 2010.

Robinson, I. S. **Discovering the ocean from space**. : Springer– Praxis, 2010. 685 p.

Saraceno, M.; Provost, C.; Piola, A. R.; Bava, J.; Gagliardini, A. Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C5, p. C05027, 2004.

Sartori Neto, A. **Análise de imagens termais AVHRR utilizando transformada de Fourier e ondaletas para determinação de padrões em vórtices e meandros**. 2004. 103 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa, MG. 2004.

Silveira, I. C. A. DA; Lima, J. A. M.; Schmidt, A. C. K.; Ceccopieri, W.; Sartori Neto, 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, n. 3-4, p. 187–207, ago. 2008.

Small, R. J.; Deszoeke, S. P.; Xie, S. P.; O’neill, L.; Seo, H.; Song, Q.; Cornillon, P. C.; Spall, M.; Minobe, S. Air–sea interaction over ocean fronts and eddies. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, n. 3-4, p. 274–319, ago. 2008.

Soutelino, R. G.; Gangopadhyay, A.; Silveira, I. C. A. DA. The roles of vertical shear and topography on the eddy formation near the site of origin of the Brazil Current. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 46–60, nov. 2013.

Souza, R. B.; Robinson, I. S. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 2, p. 241–262, jan. 2004.

Vazquez-Cuervo, J.; Dewitte, B.; Chin, T. M.; Armstrong, E. M.; Purca, S.; Alburquerque, E. An analysis of SST gradients off the Peruvian Coast: The impact of going to higher resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 131, p. 76–84, abr. 2013.