UTILIZAÇÃO DE DADOS SAR NA DETECÇÃO DE VÓRTICES OCEÂNICOS DE SUBMESOESCALA

Fabricio Sanguinetti Cruz de Oliveira[1] *e Felipe Furtado Pinho*[1]

[1]Universidade Federal de Rio Grande, Av Italia, km 08, Rio Grande, RS, Brasil, fsoliveira@furg.br, lipfpp@gmail.com

RESUMO

A detecção e monitoramento de vórtices oceânicos são essenciais para uma melhor compreensão da dinâmica oceânica. Entretanto, há uma grande lacuna em relação ao monitoramento de vórtices de submesoescala (VSMs) devido às suas reduzidas escalas espaço-temporais. Este estudo está focado no Embaiamento de São Paulo, considerando os escassos estudos de VSMs nesta área. Imagens SAR dos satélites Sentinel-1 (A e B) coletadas entre 27/09/2016 e 31/12/2018 foram utilizadas para detecção de VSMs. Uma maior frequência de VSMs foi encontrada no inverno devido ao aumento dos ventos de sudeste e sudoeste associados às frentes frias na região. Os dados SAR foram adequados para detectar VSMs sobre a plataforma continental devido aos ventos moderados observados e concomitante presença de biofilmes, que promovem a distinção de VSMs em imagens SAR.

Palavras-chave – dinâmica oceânica, vórtices de submesoescala, SAR, Atlântico Sudoeste.

ABSTRACT

The detection and monitoring of oceanic eddies are essential for a better understanding of ocean dynamics. However, there is a big gap concerning the monitoring submesoscale eddies (SME) due to their reduced spatio-temporal scales. This study is focused on the South Brazilian Bight, considering the scarce studies of SMEs in this area. SAR images from the Sentinel-1 satellites (A and B) collected between 9/27/2016 and 12/31/2018 were used for SMEs detection. A higher frequency of SMEs was found during winter due to the increasing southeasterly and southwesterly winds associated with cold fronts in the region. The SAR data were suitable for detecting SMEs over the continental shelf due to the observed moderate winds and concomitant presence of biofilms, which promotes the distinction of SMEs in SAR images.

Key words – *ocean dynamics, submesoscale eddies, SAR, Southwest Atlantic.*

1. INTRODUÇÃO

Vórtices são feições recorrentes que desempenham papel fundamental na dinâmica dos oceanos, transportando momentum, calor, e propriedades biogeoquímicas, além de contribuir nos processos de mistura dos oceanos [1]. Os vórtices oceânicos podem ser divididos em função das suas escalas temporais em: mesoescala e submesoescala. Os vórtices de mesoescala (VM) são dominados pelo efeito de rotação da Terra (número de Rossby $\ll 1$), raio maior que o raio de deformação baroclínico local e tempo de vida de meses [2]. Já os vórtices de submesoescala (VSM) não apenas influenciados pela rotação da Terra (número de Rossby ~ 1), com raio menor do que o raio de deformação baroclínico local e tempo de vida de alguns dias [3].

Os VMs têm sido amplamente estudados com o auxílio de radares altímetros a bordo de satélites [4–6]. Já os VSMs, apesar de serem uma das feições mais recorrentes nos oceanos [7], ainda não são bem compreendidos. Uma característica importante dos VSMs, são as altas velocidades verticais próximos a superfície associadas aos fluxos gerados por estas feições. Estudos sugerem que movimentos de submesoescala impulsionam velocidades verticais de 1–2 ordens de magnitude maiores que aquelas associadas a mesoescala ($\sim 1\ m\ dia^{-1}$) [8, 9]. Essa característica evidencia a importância dos vórtices de submesoescala na distribuição vertical das propriedades biogeoquímicas e físicas de uma região. Segundo [10], os principais mecanismos de formação dos VSMs são: (1) instabilidade barotrópica; (2) interação das correntes com feições costeiras, como cabos e baias; (3) interação das correntes com batimetria (declives acentuados e bancos submersos) e (4) Instabilidade baroclínica da camada de mistura.

Devido a pequena escala espacial (1–50 km) e temporal (dias), os VSMs são estruturas de difícil observação de navios oceanográficos. Dada as suas altas resoluções espaciais, os radares de abertura sintética, *Synthetic Aperture Radar* (SAR) são as ferramentas ideais para observar os movimentos de submesoescala [11] nas diferentes condições atmosféricas. Em velocidades do vento de até 5–6 ms^{-1}, os vórtices geralmente aparecem nas imagens SAR devido à presença de biofilmes, que alteram as características físicas da superfície do mar [12]. O biofilme inibe a formação das ondas capilares numa dada área, atenuando a rugosidade em superfície e, portanto, diferenciando-se das águas adjacentes. Segundo [13], esta atenuação pode chegar a 10 Db, causando um contraste entre linhas escuras (biofilmes) e claras nas imagens SAR, de modo que os VSMs são detectadas. Estes são conhecidos como vórtices pretos (Figura 3B) [14]. Em velocidades de vento superiores a 6 ms^{-1}, as linhas escuras tendem a se desfazer e os VSMs são detectados principalmente devido as interações onda–corrente nas zonas de cisalhamento de correntes ou devido a frentes térmicas, resultando em linhas curvas brilhantes de retroespalhamento relativamente alto (Figura 3A) [15]. Estes últimos são conhecidos como vórtices brancos, devido ao alto brilho da superfície do mar nas imagens [14].

Diante do exposto, este trabalho tem como finalidade quantificar a ocorrência dos VSMs e avaliar as suas distribuições espaço–temporais na região do Embaiamento de São Paulo (ESP).

2. MATERIAL E MÉTODOS

As imagens SAR aqui utilizadas são provenientes da missão Sentinel-1 (S1) da Agência Espacial Europeia (ESA), satélites A e B, e correspondem aos dados nível 1 de processamento (L1), no modo de aquisição Interferometric Wide Swath Mode (IW) e resolução espacial de 5 × 20 m. Os dados foram obtidos através do portal ASF Data Search Vertex (search.asf.alaska.edu) da Agência Espacial Americana (NASA) no formato Ground Range Detected (GRD). Um total de 1140 imagens SAR foram adquiridas para a região do ESP entre 27/09/2016 e 31/12/2018 (Figura 1).

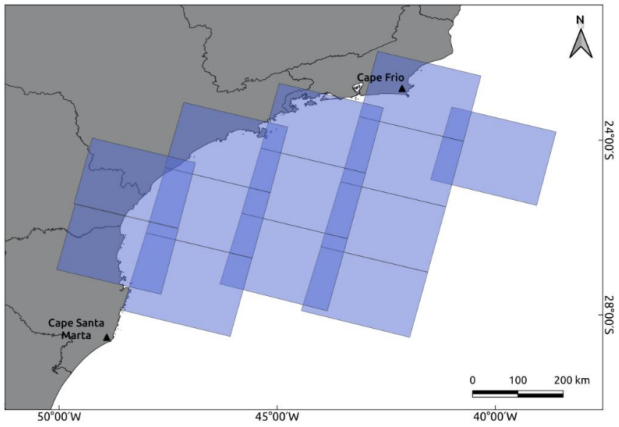

Figura 1: Localização do ESP com a cobertura espacial das imagens SAR utilizadas (polígonos azuis).

Em seguida foi realizado o pré-processamento dos dados S1 segundo [16]. O autor desenvolveu uma séries de correções, implementadas no software SNAP (Sentinel Application Platform) da ESA e consistem em: (1) orbita precisa de aquisição, (2) remoção dos ruídos de borda, (3) calibração radiométrica, (4) filtragem do ruídos *Speckles*, (5) correção geométrica e (6) conversão para dB e posterior extração dos dados físicos da superfície do oceano.

Por fim, os vórtices foram identificados via critério visual, de acordo com o sugerido inicialmente por Xu et al. (2015). Primeiramente, o centro dos vórtices é identificado como a região de convergência dos biofilmes (vórtices pretos) ou das linhas curvas brilhantes (vórtices brancos) (Figura 2. Posteriormente, o diâmetro é determinado a partir de dois pontos mais distantes entre si, presentes nas bordas dos vórtices, cuja linha que conecta estes dois pontos deve cruzar a posição central do vórtice. Os valores dos raio correspondem a metade do diâmetro encontrado. Os VSMs também foram classificados quanto ao tipo (branco ou preto) e polaridade (ciclônico ou anticiclônico). Todas as informações obtidas, em cada imagem SAR contento vórtices, foram armazenadas para análises posteriores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um total de 1257 vórtices foram identificados na região da ESP, ao longo dos 27 meses analisados. Destes, apenas 1109 (∼88%) tiverem seus raios estimados, devido a incerteza

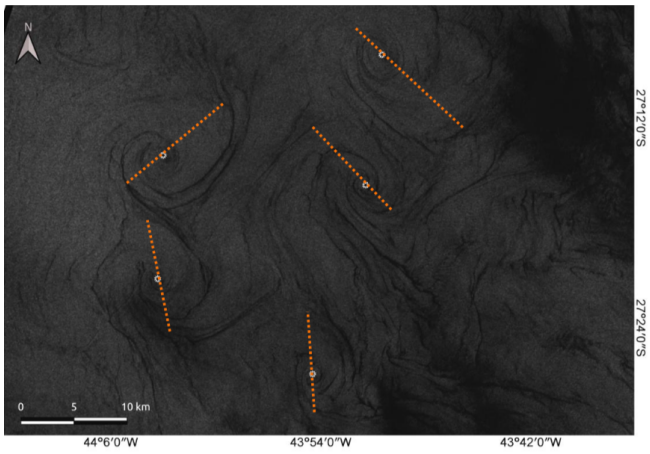

Figura 2: Localização do ESP com a cobertura espacial das imagens SAR utilizadas (polígonos azuis).

inerente ao método. A maioria dos 148 vórtices nao mensurados foram classificados como brancos, sendo estes de difícil detecção devido à ausência de biofilmes. A maior frequência de vórtices foi observada em 2018, porém é importante destacar que 2016 a série temporal de imagens teve início no mês de setembro. O total de vórtices detectados quanto ao seu tipo e polaridade é apresentado na Figura 3. Vórtices pretos somaram 885 (70%) do total total detectado, já em relação à polaridade, 93% foram ciclônicos (Tabela 1). Espacialmente, fica evidente a predominância dos vórtices próximos ao litoral, próximo à Ilha de São Sebastião (45,5°W e 24°S), principalmente dos anticiclônicos (Figura 3B).

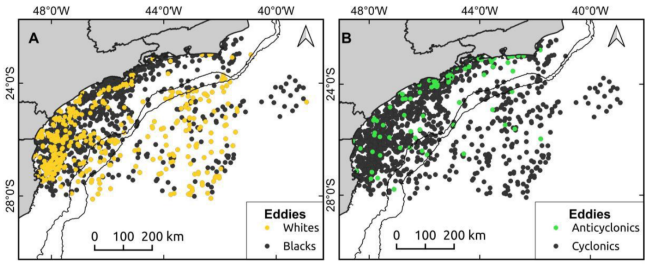

Figura 3: (A) Representação dos vórtices brancos (amarelos) e pretos (pretos) detectados. (B) Representação dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos.

Ano	n° T	n° B	n° P	n° C	n° AC
2016	125	44	81	115	10
2017	425	116	309	407	18
2018	707	212	495	647	60
Total	1257	372	885	1169	88

Tabela 1: Estatística dos VSMs detectados por ano, tipo e polaridade. n° T, n° B, n° P, n° C e n° AC são os números de vórtices totais, brancos, pretos, ciclônicos e anticiclônico detectados, respectivamente.

A distribuição espacial dos vórtices fica mais evidente nos heatmaps, com raio de influência de ∼77 km (Figura 4). As região de maior concentração foi a central e sul da plataforma continental na ESP, decaindo em número em relação ao oceano profundo. Em relação as dimensões dos vórtices, foram calculados os valores mínimos, máximos, médias e desvios-padrões (Tabela 2). O tamanho dos raios variou entre 0,14–18,52 km, com média de 2,44km. O raio de maior dimensão foi observado em 2018, enquanto que o menor em 2017. Quanto aos valores de desvio–padrão, os maiores ocorreram em 2016 e menores em 2017.

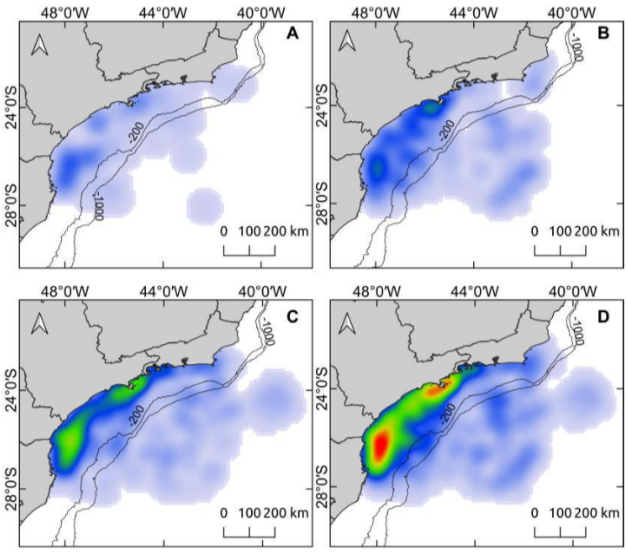

Figura 4: Heatmaps dos vórtices detectados para os anos de 2016 (A), 2017 (B), 2018 (C) e toda a serie temporal (D).

Ano	Núm.	Min.	Max.	Media	DP
2016	113	0,226	16,637	2,986	3,169
2017	384	0,213	12,472	1,848	1,618
2018	612	0,146	18,522	2,704	2,436
Total	1109	0,146	18,522	2,440	2,319

Tabela 2: Estatística dos VSMs detectados em relação ao seus respectivos raios em km.

[17], a partir de derivadores, calcularam valores do raio de deformação baroclínico entre 20–40 km para a região entre o ESP e a Plataforma Argentina. Desta forma, os vórtices detectados neste trabalho se enquadram como VSMs. Na variabilide mensal, os VSMs foram mais abundantes durante o inverno, em maior número em 2018. A menor frequência ocorreu em abril de 2017, no início do outono (Figura 5). Uma série de imagens mais longa torna-se necessária para caracterizar o caráter sazonal observado, embora o aumento da passagem de frentes frias durante o inverno na região de estudo parece ser um fator determinante para as maiores ocorrências se concentrarem no inverno. Apesar de especulativo, é possível que eventos climáticos como o El Niño Oscilação Sul (ENOS), principalmente em sua fase negativa (La Niña), possam também influenciar no sinal sazonal dos VSMs.

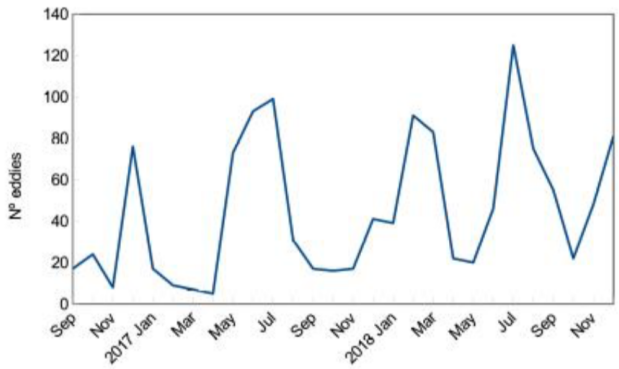

Figura 5: Média mensal dos VSMs detectados ao longo de toda a série temporal.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu detectar VSMs em toda o ESP, cuja maioria dos dessas feições foram pretas, ciclônicas, com raios menores que 2,4 km. Os VSMs foram mais presentes sobre a plataforma continental do que em oceano profundo. Esta diferença parece ser influenciada pelo regime de ventos sobre o ESP, uma vez que as menores velocidades dos ventos também foram observadas nesta região. Embora os fortes ventos atrapalharem a detecção dos VSMs, os dados SAR mostraram-se eficientes na detecção dessas feições sobre a plataforma continental. Em geral, os VSMs ocorreram com maior frequência durante os períodos de inverno. Isso sugere que este aumento na ocorrência de vórtices é uma resposta à geração de instabilidades baroclínicas da camada de mistura, associadas a um típico aumento da intensidade do vento e da passagem de frentes frias durante esta estação. Especula-se que eventos de La Niña estejam associados a estas maiores ocorrências de VSMs, já que estes eventos estão associados a passagens de frentes frias no Atlântico Sudoeste, e podem impulsionar instabilidades oceânicas para a ocorrência de vórtices. Apesar dessa suposição, se faz necessário uma série temporal e analises climáticas mais robustas. A análise da distribuição espacial dos VSMs mostrou duas regiões de maior concentração de vórtices; as porções sul e central do ESP. A geração de VSMs na região central do ESP está provavelmente relacionada à interação entre a batimetria e as correntes oceânicas costeiras. No sul do ESP, as análises sugerem que a concentração dessas feições está associada às instabilidades causadas pela intrusão de águas mais frias vindas de latitudes mais altas, como as advindas do Rio da Prata.

5. REFERÊNCIAS

[1] D. B. Chelton, M. G. Schlax, and R. M. Samelson. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*, 91 (v.):167–216 (pp.), 2011.

[2] M. W. Schouten, W. P. de Ruijter, P. J. Van Leeuwen, and J. R. Lutjeharms. Translation, decay and splitting of agulhas rings in the southeastern atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105 (v.):21913–21925 (pp.), 2000.

[3] J. C. McWilliams. Submesoscale currents in the ocean. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 472 (v.):1–32 (pp.), 2016.

[4] F. S. Oliveira and P. S. Polito. Mesoscale eddy detection in satellite imagery of the oceans using the radon transform. *Progress in Oceanography*, 167 (v.):150–163 (pp.), 2018.

[5] L. A. A. Guerra, A. M. Paiva, and E. P. Chassignet. On the translation of agulhas rings to the western south atlantic ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 104–113 (v.):139 (pp.), 2018.

[6] A. Chaigneau, A. Gizolme, and C. Grados. Mesoscale eddies off peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in oceanography*, 79 (v.):106–119 (pp.), 2008.

[7] W. Munk, L. Armi, K. Fischer, and F. Zachariasen. Spirals on the sea. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 456 (v.):1217–1280 (pp.), 2000.

[8] J. Callies, R. Ferrari, J. M. Klymak, and J. Gula. Seasonality in submesoscale turbulence. *Nature communications*, 1–8 (v.):6 (pp.), 2015.

[9] X. Capet, J. C. McWilliams, M. J. Molemaker, and A. F. Shchepetkin. Mesoscale to submesoscale transition in the california current system. part ii: Frontal processes. *Journal of Physical Oceanography*, 38 (v.):44–64 (pp.), 2008.

[10] A. Zatsepin, A. Kubryakov, A. Aleskerova, D. Elkin, and O. Kukleva. Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the black sea. *Ocean Dynamics*, 69 (v.):253–266 (pp.), 2019.

[11] G. Xu, J. Yang, C. Dong, D. Chen, and J. Wang. Statistical study of submesoscale eddies identified from synthetic aperture radar images in the luzon strait and adjacent seas. *International Journal of Remote Sensing*, 36 (v.):4621–4631 (pp.), 2015.

[12] H. A. Espedal, O. M. Johannessen, and J. Knulst. Satellite detection of natural films on the ocean surface. *Geophysical Research Letters*, 23 (v.):3151–3154 (pp.), 1996.

[13] M. Gade, V. Byfield, S. Ermakov, O. Lavrova, and L. Mitnik. Slicks as indicators for marine processes. *Oceanography*, 26 (v.):138–149 (pp.), 2013.

[14] R. Romeiser. The future of sar-based oceanography: high-resolution current measurements by along-track interferometry. *Oceanography*, 26 (v.):92–99 (pp.), 2013.

[15] S. Karimova and M. Gade. Improved statistics of sub-mesoscale eddies in the baltic sea retrieved from sar imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 37 (v.):2394–2414 (pp.), 2016.

[16] F. Filipponi. Sentinel-1 grd preprocessing workflow. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 18 (v.):11 (pp.), 2019.

[17] S. Berti and F. A. dos Santos. Relative dispersion and turbulencein the southwestern atlantic ocean from drifters data. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*, 1 (v.):9–20 (pp.), 2016.