



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
- INPE -**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO DEPARTAMENTO DE
SENSORIAMENTO REMOTO DIVISÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS
DISCIPLINA DE INTRODUÇÃO AO GEOPROCESSAMENTO**

**ESTUDO ESPAÇO-TEMPORAL DOS VÓRTICES
DA COSTA DO BRASIL**

Philippe Riskalla Leal¹, Vitor Galazzo de Paiva²

- 1) Doutorado em Sensoriamento Remoto, orientado por Prof. Milton Kampel
- 2) Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientado por Prof. Milton Kampel

RESUMO

O estudo dos vórtices oceânicos é de grande relevância para as dinâmicas ecossistêmicas do oceano. São importantes fontes de transferência de energia e matéria para todo o oceano global, de forma que o seu estudo espaço-temporal é de suma importância. Em função dos vórtices oceânicos da costa brasileira serem pouco estudados e da dificuldade de mensuração *in situ*, este trabalho se dispôs a avaliá-los através do algoritmo de detecção de vórtices OKUBO-WEISS Eddy Detection (OWED) utilizando dados altimétricos orbitais superfície do mar para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2015 fornecidos pela Copernicus Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS). Neste estudo, foram avaliadas a durabilidade, a densidade e o número de ocorrências diárias e anuais de cada vórtice (cyclônico e anti-cyclônico). Nossos resultados demonstraram que: a) o OWED foi capaz de detectar apenas vórtices de mesoescala na região norte do país próximo a foz do Rio Amazonas; b) o ano de 2014 foi atípico comparado aos demais anos analisados, com valores extremos de duração, número e densidade de vórtices; c) a costa norte brasileira apresenta predominância de vórtices anti-cyclônicos; d) Os vórtices anti-cyclônicos se mostraram mais intensos (maior densidade) e mais duradouros (maior durabilidade) do que os cyclônicos; e) os vórtices anti-cyclônicos apresentaram tendência de aumento na duração, no número de ocorrência e em sua densidade, enquanto que os vórtices cyclônicos apresentaram tendência de diminuição em seu número de ocorrência e densidade, mas mantendo sua durabilidade.

INTRODUÇÃO

Correntes marinhas são caracterizadas como fluxos de água no oceano que apresentam uma distribuição coerente em termos de médias temporais (LENTINI, 2007). As correntes oceânicas têm uma contribuição extremamente relevante sobre o transporte de calor e matéria para todo globo (MATHIS, et al., 2007; MENDES; SOARES–GOMES, 2007; CHANG; OEY, 2014). Quando correntes oceânicas distintas ou diferentes massas d'água se encontram e interagem entre si, ocorre a formação de vórtices. Tais feições oceanográficas carregam características da massa d'água de origem através de seu percurso ao longo do oceano.

Dependendo das características de um vórtice, ele pode ser descrito como: 1) cyclônico, quando a massa d'água contida no vórtice apresenta uma maior densidade em relação ao seu entorno; 2) anticiclônico, quando a relação é inversa. Devido aos efeitos da rotação da terra (força de Coriolis), no hemisfério sul, ciclones giram no sentido horário e anticiclones no sentido anti-horário (COLLING, 1989). O mesmo ocorre no hemisfério norte, mas em sentidos contrários.

Assim como as correntes marinhas, os vórtices apresentam importante papel na troca de nutrientes, gases dissolvidos, sedimentos e energia entre massas d'águas distintas, podendo até mesmo, dependendo da escala, reger processos ecossistêmicos marinhos (LEACH ET al., 2002; MATHIS, et al., 2007; VOLKOV; LEE, 2008; VÁSQUEZ et al., 2013).

Um tipo específico de vórtices marinhos, os vórtices de mesoescala (VM) são compreendidos como um dos principais agentes de circulação oceânica (HOLLAND; LIN, 1975; LEACH et al., 2002). VM são definidos como vórtices de surpreendente força, espacialidade e continuidade temporal (longevidade). VM podem apresentar diâmetros entre 50-200 km, e uma durabilidade de meses a anos (WILLIAMS et al., 2011). São responsáveis pela troca de nutrientes, gases dissolvidos, sedimentos e energia entre massas d'águas distintas, podendo até mesmo reger processos ecossistêmicos marinhos (LEACH ET al., 2002; MATHIS, et al., 2007; VOLKOV; LEE, 2008; VÁSQUEZ et al., 2013). Em função da importância ao ecossistema marinho, o estudo dos VM de se tornou alvo de interesse e importância internacional aos modelos biofísicos de circulação oceânica.

O estudo da circulação oceânica pode ocorrer através de observações *in situ* (navios, boias e instrumentos fundeados), via sensores remotos (satélites orbitais) e via modelagem

(LENTINI, 2007). Contudo, somente com o advento do uso de satélites altimétricos na oceanografia, os modelos de fluxo e mistura oceânicos globais obtiveram resolução temporal adequada a ponto de incorporar o impacto dos vórtices oceânicos em seus modelos de transporte e mistura. Atualmente, o método mais utilizado para aferimento dos VM é a altimetria oceânica, cujos dados são advindos das missões orbitais de sensores imageadores (Radar). Comparado ao levantamento *in situ* (com embarcação), o aferimento por sensoriamento remoto é mais impreciso, e se utiliza somente de dados da superfície (camada superior) do oceano, enquanto dados coletados em missões embarcadas garantem levantamento completo (em até 3 dimensões) dos parâmetros ligados aos VM. Entretanto, somente através do sensoriamento remoto, é possível o estudo oceanográfico de vasta cobertura espacial e temporal (WILLIAMS et al., 2011).

A detecção de VM por sensoriamento remoto segue com base na detecção de pontos extremos, uma vez que cada vórtice pode apresentar somente um ponto central extremo. Um ponto extremo é definido como uma célula de uma matriz cujo valor altimétrico anômalo da superfície do oceano “*Sea Level Anomaly - SLA*” é superior ou inferior aos seus píxeis imediatamente vizinhos. Quando este valor é máximo inferior, esta região é definida como um vórtice do tipo ciclônico, uma vez que vórtices ciclônicos causam o rebaixamento (achatamento) da SLA. O contrário também ocorre aos vórtices anti-ciclônicos, os quais causam a elevação do SLA. Assim, através destas características de achatamento e elevação do SLA, é possível a detecção de vórtices através de sensoriamento remoto (FAGHMOUS et al., 2015).

Visto que os VM participam de processos de significativa influência no equilíbrio dinâmico e ecossistêmico marinho e observando o cenário atual de intenso impacto antrópico sobre o meio ambiente, seu estudo se torna muito importante para a compreensão das dinâmicas oceânicas de mesoescala, bem como sua variação no tempo e forçantes que a ocasionam. Em virtude desta necessidade, diversas técnicas, como a OKUBO-WEISS Eddy detection, disponibilizada pela Marine Geospatial Ecology Tools (MGET) do Nicholas School of the Environment - Duke (<http://mgel.env.duke.edu/mget>), vêm ganhando força nos últimos anos, e vários trabalhos estão se utilizando deste modelo em específico (AVISO+, sem data; OKUBO, 1970; WEISS 1991; YI et al., 2013; CHANG; OEY, 2014).

No caso específico da costa brasileira, ainda são poucos trabalhos envolvendo a avaliação espaço-temporal de vórtices oceânicos de mesoescala. Assim, com a aplicação do algoritmo OKUBO-WEISS Eddy detection, este presente trabalho se propôs a avaliar a variação espaço-temporal dos VM da costa brasileira para uma série temporal de seis anos (2010 – 2015) com dados diários da altimetria da superfície do oceano.

OBJETIVOS:

A fim de estudar a variabilidade espaço-temporal dos VM da costa brasileira este trabalho buscou avaliar:

- A) O Número de ocorrências de vórtices por tipo (ciclônico e anti-ciclônico) a partir dos mapas de densidade de vórtices (*Eddies density maps*), a fim de demarcar as zonas/regiões de maior e menor ocorrência de vórtices
- B) A duração dos VM (em n° de dias consecutivos)
- C) A extensão/cobertura marinha: área média por vórtice (n° de píxeis por vórtice)

Na Figura 1, estão esquematizados os três critérios de avaliação espaço-temporal dos vórtices oceânicos da costa brasileira.



Figura 1: modelo conceitual das variáveis levantadas por este estudo para a costa brasileira

MATERIAIS E MÉTODOS

• DETECÇÃO DE VÓRTICES (*EDDY DETECTION*)

Para geração dos dados diários de vórtices de mesoescala, foram utilizados dados altimétricos da superfície do mar, obtidos a partir do banco de dados da Copernicus Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS) (<http://www.marine.copernicus.eu>) e da Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data (AVISO+) (<https://www.aviso.altimetry.fr>), e posterior processamento através do algoritmo OKUBO-WEISS.

As imagens altimétricas da superfície oceânica são advindas de diferentes missões orbitais, a partir dos radar-imageadores Jason-1, Envisat, Jason-2 e Cryosat-2. Abaixo são resumidas as características destes dados (para maiores detalhes, vide SSALTO; DUACS - 2016):

- I) Resolução temporal diária com cobertura de todo globo terrestre no eixo longitudinal
- II) Cobertura do globo entre as latitudes $\pm 66,15^\circ$
- III) Resolução Espacial de 0,25 grau
- IV) Resolução Altimétrica: centimétrica
- V) Tipo de dado: matriciais, sendo um arquivo matricial por dia (portanto 365/366 arquivos por ano).

O algoritmo Okubo-Weiss Eddie Detection (OWED), disponibilizado pela Marine Geospatial Ecology Tools (MGET) (ROBERTS et al., 2010), realiza diversas operações sequenciais de geoprocessamento para detecção, identificação e geração dos dados matriciais diários de vórtices:

- I) Extrai os dados altimétricos do banco de dados do CMEMS e os aloca temporariamente no computador do usuário.
- II) Calcula os valores do parâmetro Weiss (W) para cada um dos píxeis que estão situados sobre o oceano para cada imagem (dias do ano). O valor de W é obtido a partir da Equação 1.

$$W_{(x_i, y_i)} = \frac{g}{f} * \left\{ \left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dy dx} \right)^2 - 2 \left[\left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dy dx} \right) * \left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dx dy} \right) \right]^2 + \left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dx dy} \right)^2 + 4 \left[\left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dx dx} \right) \left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dy dy} \right) \right]^2 - 2 \left(\frac{d^2 h(x_i, y_i)}{dy dy} \right)^2 \right\}$$

Equação 1:

$W_{xi, yi} = gf * d2hxi, yidydx2 - 2d2hxi, yidydx * d2hxi, yidxdy2 + d2hxi, yidxdy2 + 4d2hxi, yidxdx2hxi, yidydy2 - 2d2hxi, yidydy2$

Equação 1:

g : valor da gravidade no ponto $u_{(x_i, y_i)}$.

$f_{(y_i)} = 2 \Omega \sin \theta$.

Ω = velocidade angular da terra ($7,292 \times 10^{-5}$ rad s⁻¹).

θ = latitude da célula $\mu_{(x_i, y_i)}$.

III) Classifica as imagens em três categorias a partir dos valores de W :

A) Classe A: regiões de alta vorticidade, consideradas como núcleo dos vórtices ($W < w_{(i)}$), sendo $w_{(i)}$ um valor entre -1 e 0 estabelecido pelo usuário.

B) Classe B: regiões de alta tensão de cisalhamento, consideradas como as bordas dos vórtices ($W > 0$)

C) Classe C: região oceânica sem a presença de vórtices ($W \approx 0$)

D) Classe D: regiões terrestres/background (continentes e ilhas). Regiões desprezadas durante o processo de classificação e reclassificação

IV) Aplica um conjunto de filtros lógicos (booleanas) sobre as imagens classificadas da etapa 3, a fim de remover vórtices efêmeros espacial e/ou temporais. Os valores de filtro temporal e espacial utilizados neste trabalho foram:

I) Temporal mínimo: ≥ 10 dias

II) Espacial mínimo: ≥ 2 píxeis ($\approx 1570 \text{ km}^2$)

V) Faz uma operação de multiplicação de matrizes entre as matrizes da etapa IV e as matrizes iniciais da etapa I – resultando na identificação dos vórtices meso-oceânicos. Posteriormente, classifica cada matriz altimétrica com base nos valores das SLA em função da média temporal topográfica de cada região (MDT, *Mean Dynamic Topography*). Regiões então definidas como vórtices são classificadas em ciclônicos (-1) e anti-ciclônicos (+1) conforme seus respectivos valores de SLA e MDT. Como resultado final desta etapa, o OWED gera matrizes classificadas de vórtices para cada um dos dias amostrados. Essas matrizes (*eddy maps*) apresentam as seguintes classes:

Classe A-I: vórtices ciclônicos, representado com o número (-1).

Regiões que apresentaram valores $W < 0$, e que o nível do mar (h) foi menor que a média acumulada temporal para aquela mesma região (pixel).

Classe A-II: vórtices anticiclônicos, representada com o número (+1). Regiões que apresentaram valores $W < 0$, e que o nível do mar (h) foi maior que a média acumulada temporal para aquela mesma região (pixel).

Classe B: regiões oceânicas sem vórtices (0)

Classe C: regiões terrestres/background (continentes e ilhas) (-128)

- VI) Realiza uma verificação sequencial dia-por-dia e píxel-por-píxel de todos os vórtices encontrados na região alvo (matriz), a fim de quantificar a duração vorticial de cada dia para cada píxel de cada matriz. Nesta etapa, o OWED avalia a estacionariedade dos vórtices (durabilidade) em número de dias consecutivos. Dessa forma, um eventual vórtice que se mantiver 2 dias na mesma posição entre as datas 01/01/2010 e 02/01/2010 sobre o píxel X_i e Y_i resultará numa matriz de durabilidade do dia 02/01/2010 com um valor 2 sobre o píxel $[X_i, Y_i]$.
- VII) O OWED ainda permite ao usuário a identificação dos vórtices com base em seus valores únicos (Identificadores - ID). Com base no tipo do vórtice, a sua origem geográfica e temporal, direcionalidade, o OWED disponibiliza um terceiro tipo de dado (também matricial diário) discriminando cada vórtice em valores únicos - ID.

- **QUANTIFICAÇÃO DA ESPAÇO-TEMPORALIDADE DOS VÓRTICES A PARTIR DO ALGORITMO PYTHON**

Uma vez com os dados de vórtices discriminados por tipo (cyclônico e anti-cyclônico), duração e com identificação única, seguiu-se para quantificação da espaço-temporalidade dos vórtices através da linguagem Python para obtenção dos dados temporais acumulados e médios para todo o período analisado.

Abaixo está representado um esquema conceitual em OMT-G de todo o procedimento do processamento de dados pelo OKUBO-WEISS e do algoritmo em Python (Figura 2). As etapas em **bege** são as etapas de operação de matrizes realizada pelo algoritmo em Python. As demais etapas são advindas dos processamentos do algoritmo OKUBO-WEISS.

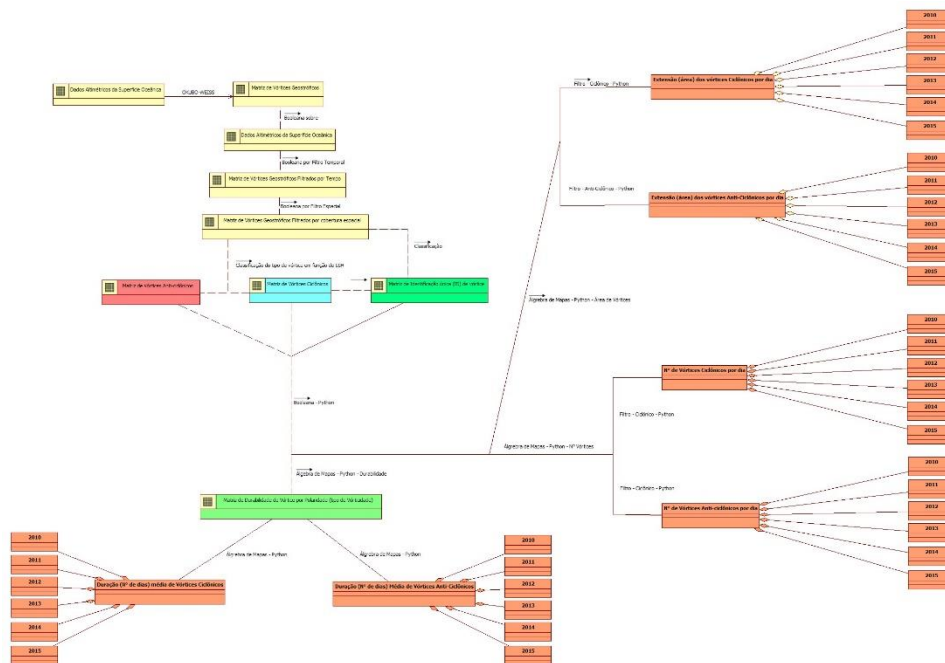


Figura 2: Representação em OMT-G dos procedimentos operacionais do OKUBO-WEISS e dos algoritmos em Python para obtenção dos dados espaço-temporais dos vórtices oceânicos para a costa brasileira a partir das imagens altimétricas da superfície oceânica disponibilizadas pela Copernicus Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS) para o período amostral de 1 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2016.

- **OBTENÇÃO DA DENSIDADE DE VÓRTICES (*EDDY DENSITY*)**

Para obtenção da densidade de vórtices, através da linguagem Python, aplicou-se uma lógica booleana para somatória dos píxeis vorticiais das matrizes geradas na etapa V do algoritmo OWED. Foram integrados todos os píxeis de código (-1) para obtenção da densidade de vórtices ciclônicos. O mesmo foi realizado para a obtenção da densidade anti-ciclônica, mas dessa vez, integrando todos os píxeis de código (+1). As somatórias e médias diárias e anuais foram organizadas em gráficos e tabelas, a fim de compreender a variabilidade temporal da densidade destes vórtices.

- **OBTENÇÃO DO NÚMERO DE VÓRTICES**

Para obtenção dos números de vórtices discriminados por tipo (ciclônico e anti-ciclônico), através do algoritmo, os arrays de identificadores únicos (ID) e de polaridade foram multiplicados, gerando como resultado final um array com identificadores únicos (IDs) com sinal (+ para vórtices anti-ciclônicos, e - para vórtices ciclônicos). Com este array de IDs únicos com sinal (IDs polarizados), aplicou-se uma integração condicional (lógica booleana), a fim de obter o número de vórtices totais diários e anuais para toda a região estudada. Para obtenção do número de vórtices ciclônicos, contabilizou-se todos os IDs com polaridade negativa; e para obtenção do número de vórtices anti-ciclônicos, contabilizou-se todos os IDs com polaridade positiva.

- **OBTENÇÃO DA DURAÇÃO DE VÓRTICES EM PYTHON**

Para obtenção da durabilidade de vórtices (em número de dias consecutivos) foi necessário integrar todas as matrizes diárias das durações de vórtices geradas na etapa VII do OWED em um array único (Array Duração), e integrar todas as matrizes diárias polarizadas

geradas na etapa V do OWED em outra array (Array polarizada), e aplicar uma multiplicação de arrays entre a Array Duração e a Array polarizada, a fim de se obter um array final (Array Duração Polarizada) com valores de duração com símbolo (positivo e negativo) com base no tipo de vórtice presente em cada píxel de cada matriz diária. Assim, a Array Duração Polarizada apresentou valores de duração negativos para vórtices ciclônicos e valores de duração positivos para vórtices anti-ciclônicos.

Por fim, aplicou-se uma lógica booleana para aferir a variação diária e anual para cada um dos tipos de vórtices sobre a Array Duração Polarizada. Para obtenção da duração dos vórtices anti-ciclônicos, foram considerados somente os píxeis com duração positiva. Já o oposto foi aplicado para os vórtices ciclônicos: apenas os píxeis com duração negativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Referente à análise da ocorrência de vórtices para a costa do Brasil, o OWED se mostrou capaz de identificar vórtices apenas para a porção norte do país, nas proximidades da foz do Rio Amazonas, mesmo sendo esperada a presença de demais vórtices ao longo da costa leste do Brasil. Na Figura 3, é possível observar este padrão focal de vórtices próximo à jusante do Rio Amazonas.

Dentre os principais fatores, Faghmous et al. (2015) pontua diversos problemas técnicos na detecção de vórtices do OWED, tais como delimitação de limites temporais e espaciais para detecção de vórtices e alta sensibilidade a efeitos de ruído em sua detecção de vórtices. Assim, segundo estes autores, o algoritmo OWED seria capaz de obter somente vórtices de maior intensidade e/ou duração, tais como os observados na região da foz do Rio Amazonas.

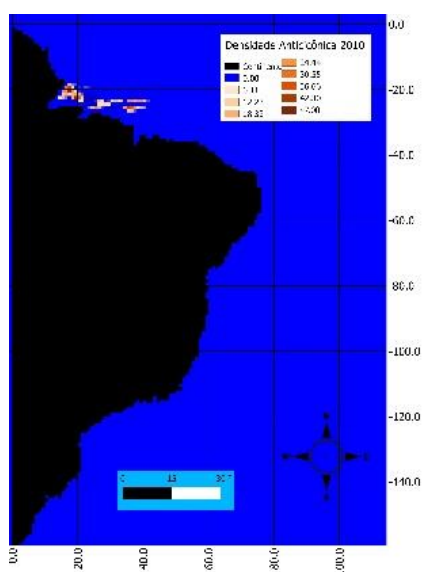


Figura 3: Mapas da Densidade de Vórtices Anti-ciclônicos para o ano de 2010

Como se pode observar a partir da Figura 3, a região mais ao norte do equador é a região com maior densidade de vórtice quando comparado às demais porções da costa brasileira. Este comportamento pode ser explicado pelo alto aporte de água continental (Rio Amazonas) no oceano, que até se misturar a água salgada, resulta na formação de frentes de densidade, e subsequentemente na formação de vórtices oceânicos de mesoescala.

A partir da Figura 4, é possível verificar a variação anual acumulada do número de vórtices ciclônicos e anticiclônicos encontrados para toda a costa do Brasil. Observa-se que há grande variância entre os diferentes anos amostrados e um aumento linear entre 2011 e 2014.

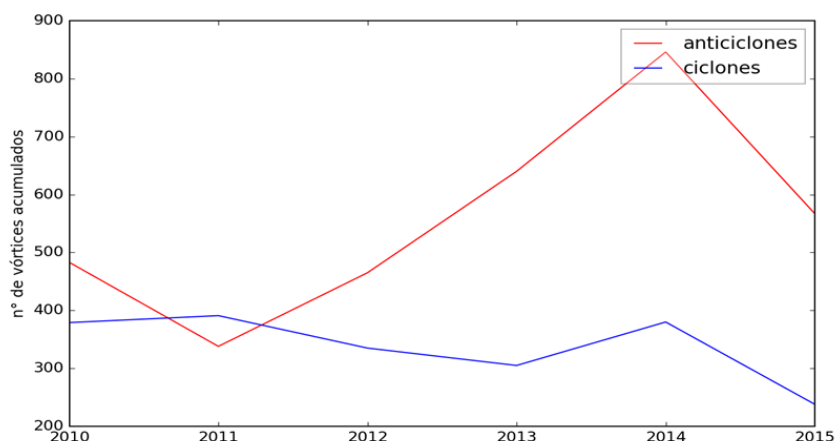


Figura 4: Variação do número total de vórtices acumulado por ano.

O ano de 2014 demonstrou uma alta densidade de vórtices em relação aos outros anos. Isto se deve provavelmente a um maior aporte de água doce do Rio Amazonas, já que vários meses do ano de 2014 apresentaram valores pluviométricos que excederam a média histórica. (CLIMANÁLISE, 2014).

A partir da Figura 5, é possível verificar a variação da densidade acumulada de vórtices ciclones e anticiclones encontrados para toda a costa do Brasil. Observa-se que há grande variância entre as densidades vorticiais ciclônicas e anti-ciclônicas. Enquanto as densidades ciclônicas demonstraram uma tendência de diminuição ao longo dos anos, a densidade anti-ciclônica se mostrou com maior variabilidade, e um leve aumento entre os anos de 2010 e 2015. Ainda, relativo à densidade de vórtices anti-ciclônicos, notou-se que o ano de 2014 apresentou as maiores médias, quase duas vezes mais que a densidade de 2010. Este efeito pode ser também explicado pelo aumento expressivo das chuvas da região (CLIMANÁLISE, 2014), acentuando o fluxo hídrico do rio, aumentando seu fluxo, diminuindo sua salinidade (e, portanto, sua densidade), resultando numa maior tendência de formação de vórtices oceânicos.

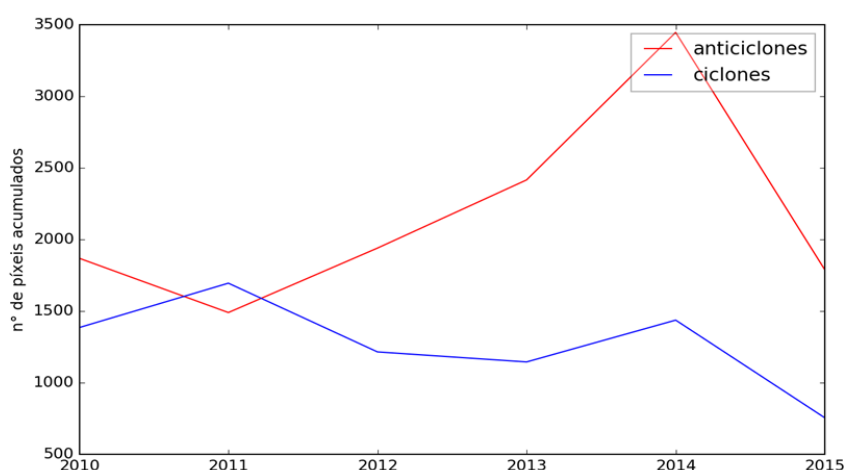


Figura 5: Variação da densidade acumulada de vórtices por ano. Unidade: Número de píxeis vorticiais por ano.

A partir da Figura 6, é possível verificar a variação da duração acumulada de vórtices ciclônicos e anticiclônicos encontrados para toda a costa do Brasil.

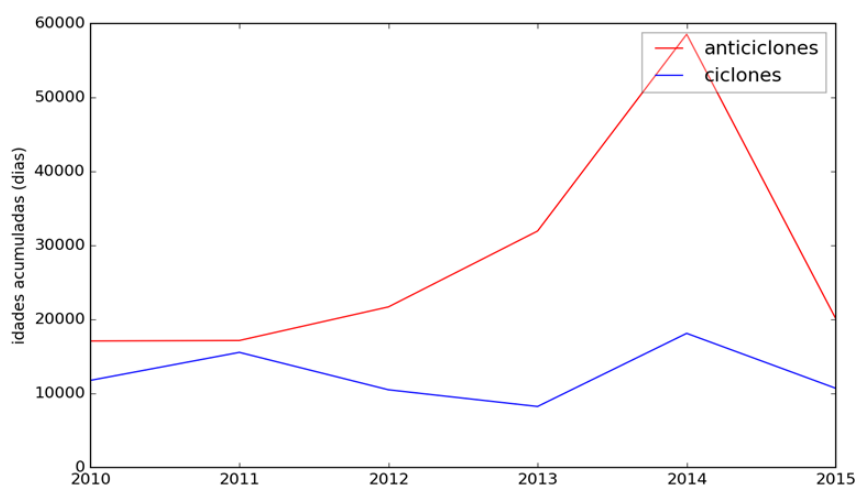


Figura 6: Variação da durabilidade média dos vórtices por ano. Unidade: Número de dias por vórtice por ano.

Para uma observação mais detalhada da variação temporal destes parâmetros (número de ocorrência, densidade e duração) vide séries temporais diárias no Anexo I.

Como pode se observar dos mapas de densidade de vórtices (Ver Anexo II), para a região do Amazonas, houve predominância de vórtices anti-ciclônicos, denotando a diferença de densidade de águas do rio para com o oceano adjacente. Fato de acordo com a literatura, uma vez que a densidade da água do mar é regida tanto pela temperatura, quanto pela salinidade. Especificamente para o caso dos vórtices próximos à foz do Rio Amazonas, dado que a água do rio é doce e menos densa, e este estudo demonstrou que há predominância de vórtices anti-ciclônicos na região oceânica adjacente, pode-se concluir que esta região apresenta predomínio de vórtices anti-ciclônicos devido, predominantemente, à diferença de salinidade entre a água doce oriunda da drenagem continental e o oceano.

A partir da matriz de correlação (Tabela 1) e a matriz de p-valores (

Tabela 2), nota-se que os anos apresentaram baixa similaridade (R^2) entre os anos. Somente houve semelhança do comportamento da densidade de vórtices anti-ciclônicos entre os anos de 2012 e 2014.

Tabela 1: Matriz de Correlação das Densidades anti-ciclônica acumuladas anuais

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2010	1,000					
2011	0,125	1,000				
2012	0,109	-0,055	1,000			
2013	-0,142	-0,057	0,083	1,000		
2014	0,190	0,007	0,371	0,025	1,000	
2015	0,218	0,055	-0,207	0,190	-0,141	1,000

Tabela 2: Matriz de P-Valores das Densidades anti-ciclônica acumuladas anuais

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2010	1,000					
2011	0,017	1,000				
2012	0,037	0,297	1,000			
2013	0,006	0,281	0,115	1,000		
2014	0,000	0,900	0,000	0,637	1,000	
2015	0,000	0,294	0,000	0,000	0,007	1,000

CONCLUSÃO

Observou-se que o ano de 2014 foi atípico comparado aos demais anos analisados, com valores extremos de duração, número e densidade de vórtices.

Observou-se que a costa norte brasileira apresenta predominância de vórtices anti-ciclônicos. Os vórtices anti-ciclônicos também se mostraram mais intensos (maior densidade) e mais duradouros (maior durabilidade) que os ciclônicos. Isto foi atribuído ao grande aporte de água doce (menos densa) do Rio Amazonas.

Por fim, as variações de vórtices oceânicos encontrados entre os anos de 2010 e 2015 demonstraram que os vórtices anti-ciclônicos apresentaram tendência de aumento na duração, no número de ocorrência e em sua densidade; enquanto que os vórtices ciclônicos apresentaram tendência de diminuição em seu número de ocorrência e densidade, mas mantendo sua durabilidade.

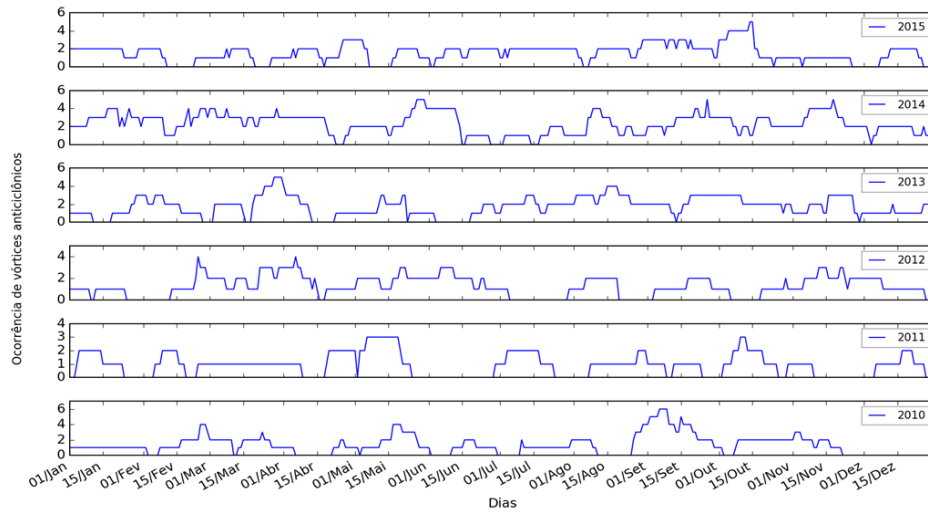
REFERÊNCIAS

- AVISO. Find Okubo-Weiss Eddies in Aviso SSH Product. Sem data. Disponível em: <<https://code.env.duke.edu/projects/mget/export/HEAD/MGET/Trunk/PythonPackage/dist/TraceOnlineDocumentation/Documentation/ArcGISReference/AvisoGriddedSSH.FindOkuboWeissEddies.html>>. Acesso em 06 jun 2017.
- CHANG, Y.-L., OEY, L.-Y., 2014. Analysis of STCC eddies using the Okubo–Weiss parameter on model and satellite data. *Ocean Dyn.* 64, 259–271. doi:10.1007/s10236-013-0680-7
- CLIMANÁLISE. Produtos Climanálise INPE/CPTEC, 2014. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>>. Acesso em: 31 mai: 2017.
- COLLING, A. Ocean circulation. Butterworth-Heinemann. 2001, p 287.
- FAGHMOUS et al. 2015. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. *Sci. Data* 2, 150028. doi:10.1038/sdata.2015.28
- HOLLAND W. R., LIN L. B.: On the generation of mesoscale eddies and their contribution to the oceanic general circulation. I. A preliminary numerical experiment. *J. Phys. Oceanogr.* 5, no. 4, vol. 4, p. 642 – 57, 1975.
- LEACH H., BOWERMAN S. J., MCCULLOCH M. E.: Upper-ocean eddy transports of heat, potential vorticity, and volume in the northeastern north atlantic—“vivaldi 1991”. *Journal of Physical Oceanography* 32, 10 (2002), 2926–2937.
- Marine Geospatial Ecology Tools (MGET). Nicholas School of the Environment – Duke. Disponível em: <<http://mgel.env.duke.edu/mget>>.
- MENDES, C.L.T., SOARES-GOMES, A., 2007. CIRCULAÇÃO NOS OCEANOS CORRENTES OCEÂNICAS E MASSAS D’ÁGUA. Apostila.
- OKUBO, A. 1970. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularity such as convergences. *Deep Sea Research* 17: 445-454.
- ROBERTS, J.J., BEST, B.D., DUNN, D.C., Tremblay E.A., Halpin P.N., 2010. Marine Geospatial Ecology Tools: An integrated framework for ecological geoprocessing with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and C++. *Environmental Modelling & Software* 25: 1197-1207.
- SSALTO/DUACS User Handbook: MSLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products CLS-DOS-NT-06-034 - Issue 5, publicado em 20 out 2016, 2016.
- VOLKOV D. L., LEE T., FU L.: Eddy-induced meridional heat transport in the ocean. *Geophys. Res. Lett.* 35 (Oct. 2008), 20601+. 1
- WEISS, J. 1991. The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics. *Physica D* 48: 273-294.
- WILLIAMS, S., HECHT, M., PETERSEN, M., STRELITZ, R., MALTRUD, M., AHRENS, J., HLAWITSCHKA, M., HAMANN, B., 2011. Visualization and analysis of eddies in a global ocean simulation. *Comput. Graph. Forum* 30, 991–1000. doi:10.1111/j.1467-8659.2011.01948.x

YI, J., DU, Y., HE, Z., ZHOU, C., 2013. Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multi-core structures from maps of sea level anomaly. *Ocean Sci. Discuss.* 10, 825–851. doi:10.5194/osd-10-825-2013

ANEXO I

Séries Diárias



1: ocorrência de vórtices anti-ciclônicos

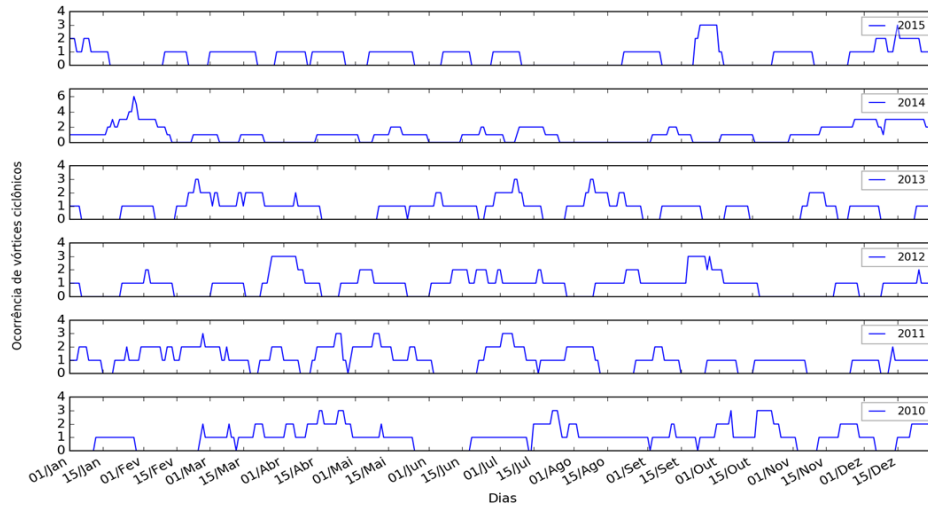


Tabela 2: ocorrência de vórtices ciclônicos

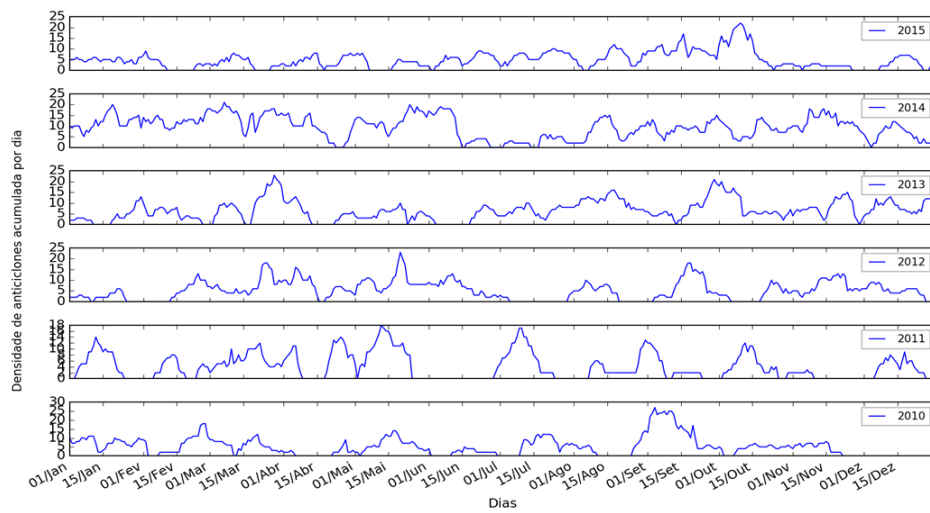


Tabela 3: densidade de vórtices anti-ciclônicos acumulados por dia

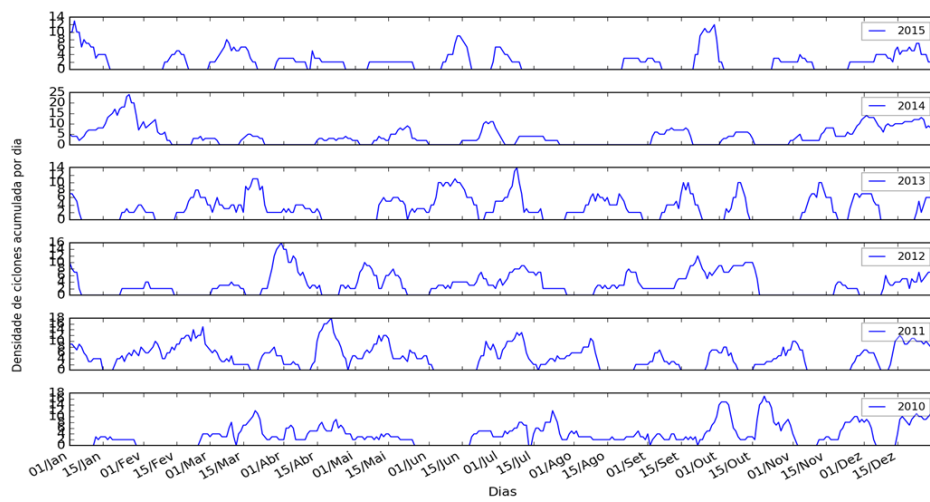


Tabela 4: densidade de vórtices ciclônicos acumulados por dia

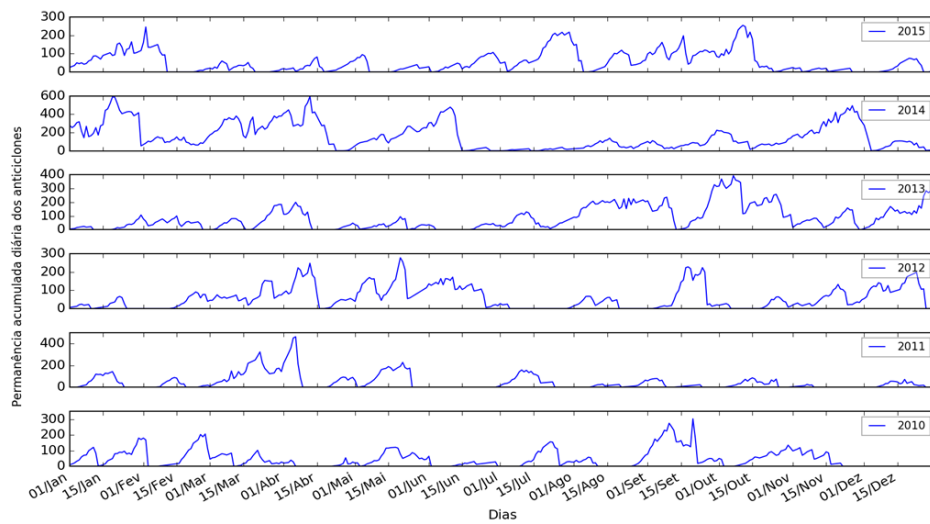


Tabela 5: permanência acumulada diária dos vórtices anti-ciclônicos

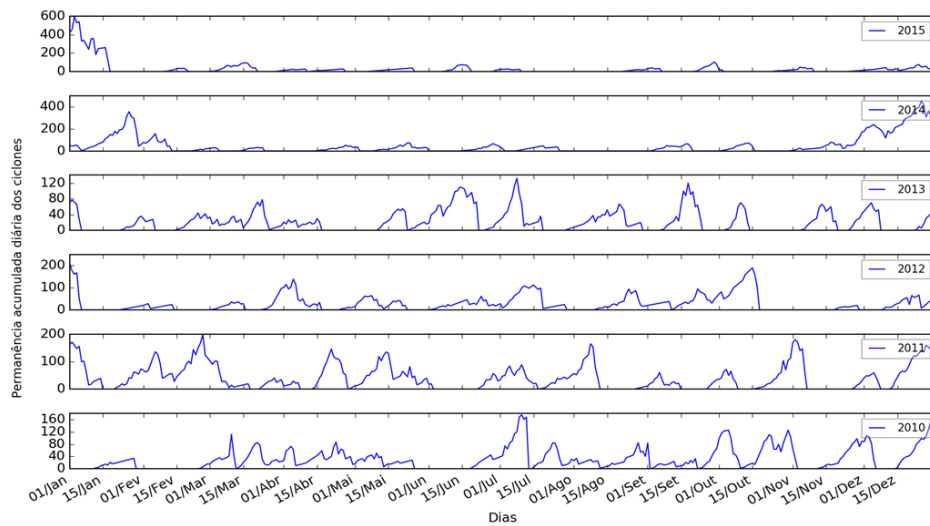
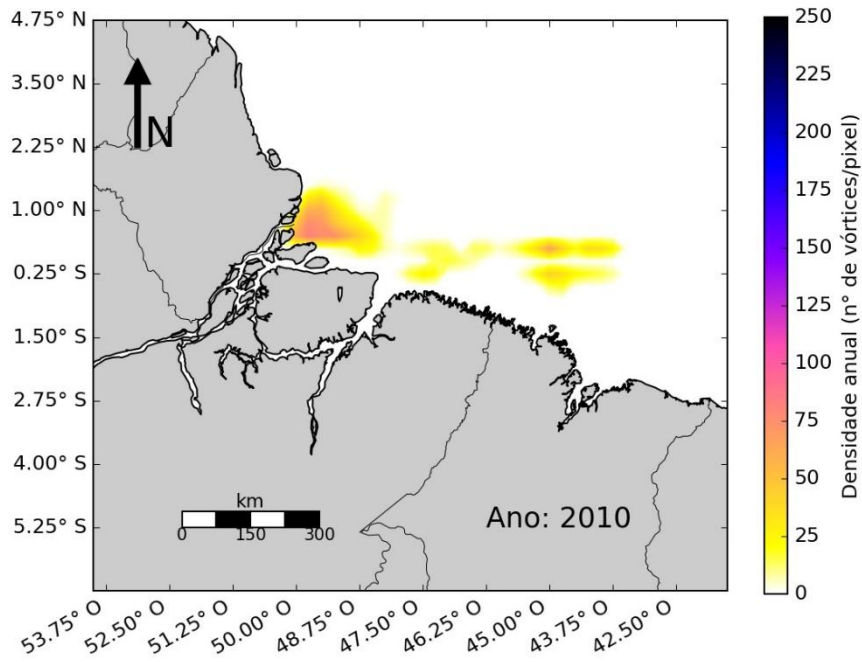


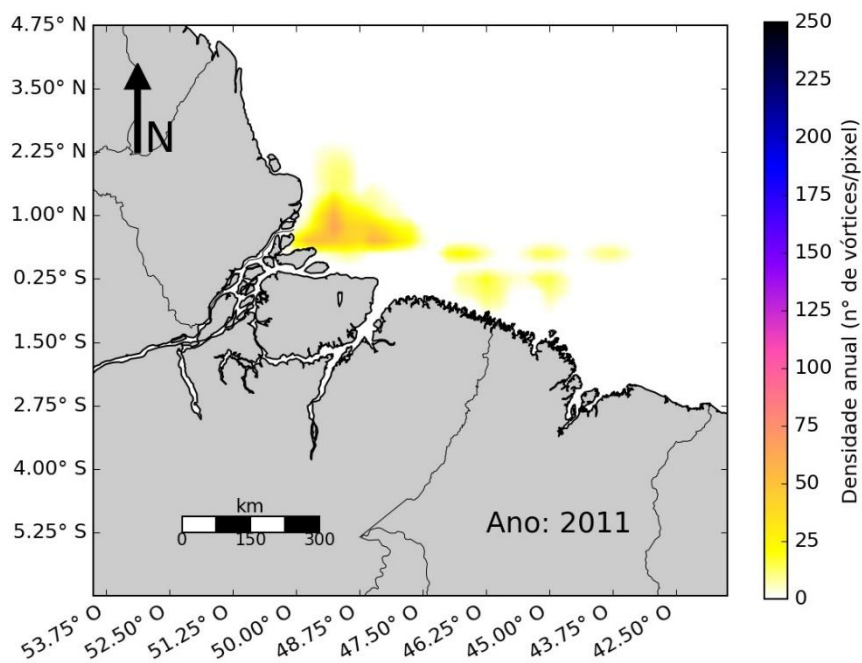
Tabela 6: permanência acumulada diária dos vórtices ciclônicos

ANEXO II

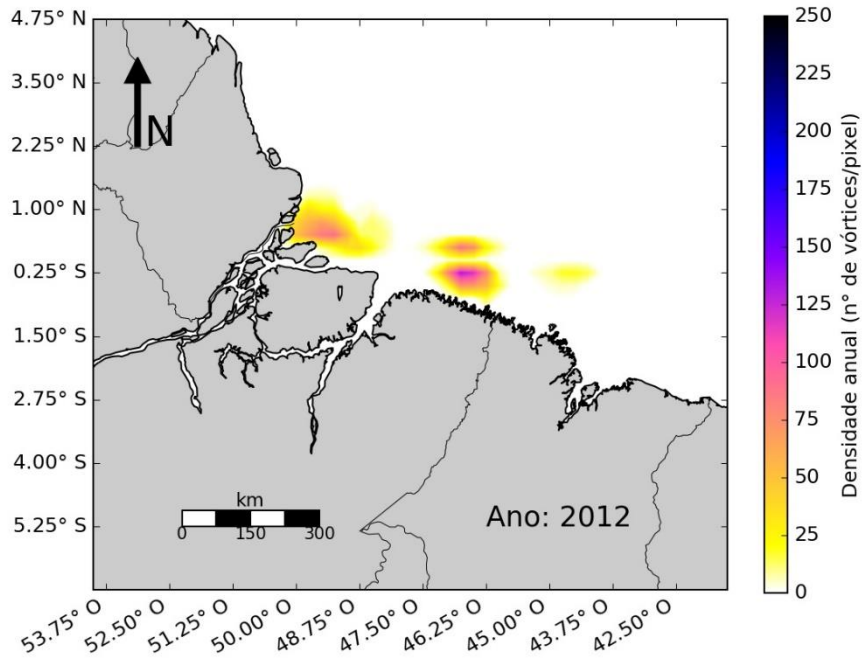
Mapas de Densidade de Vórtices



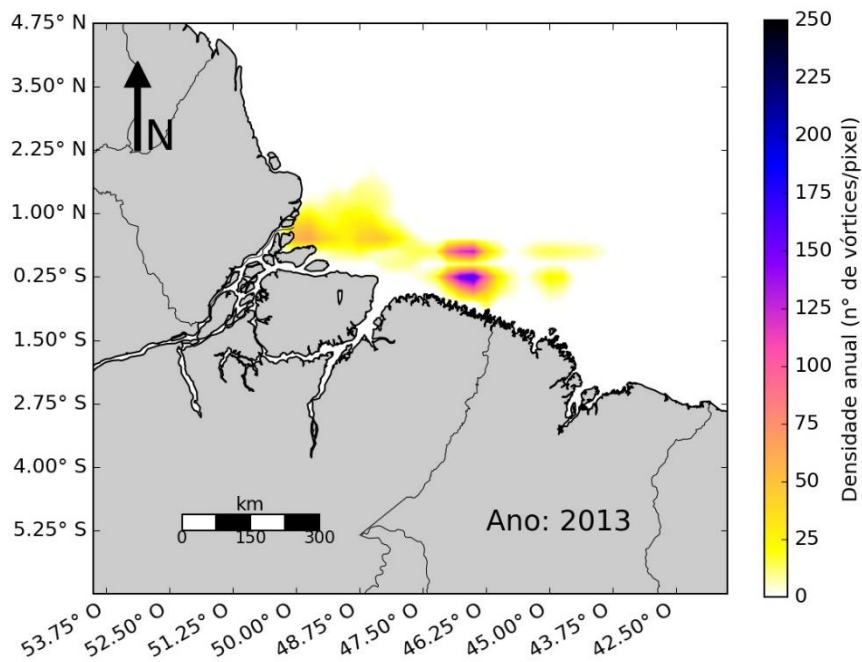
Mapa 1. Densidade de vórtices anti-ciclônicos para o ano de 2010.



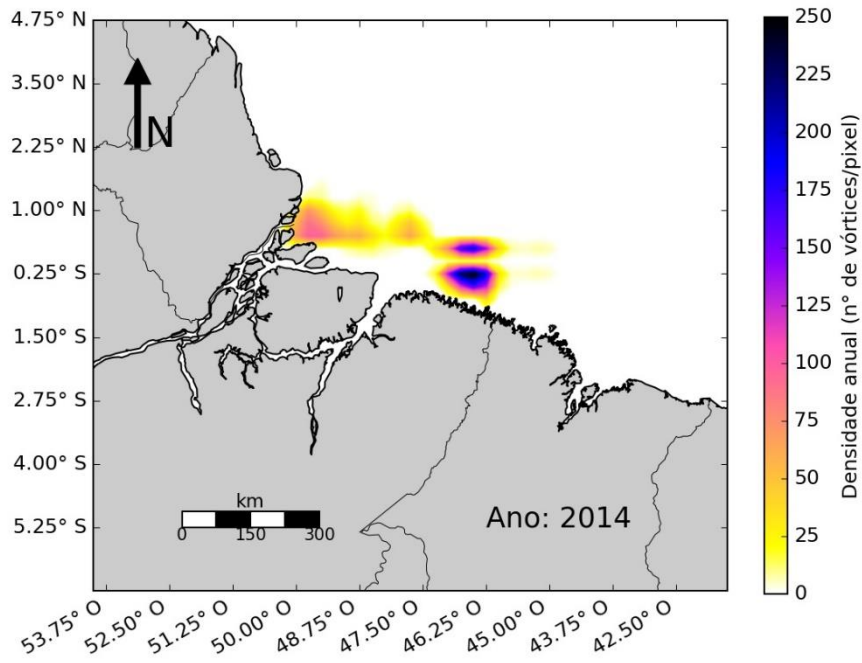
Mapa 2. Densidade de vórtices anti-ciclônicos para o ano de 2011.



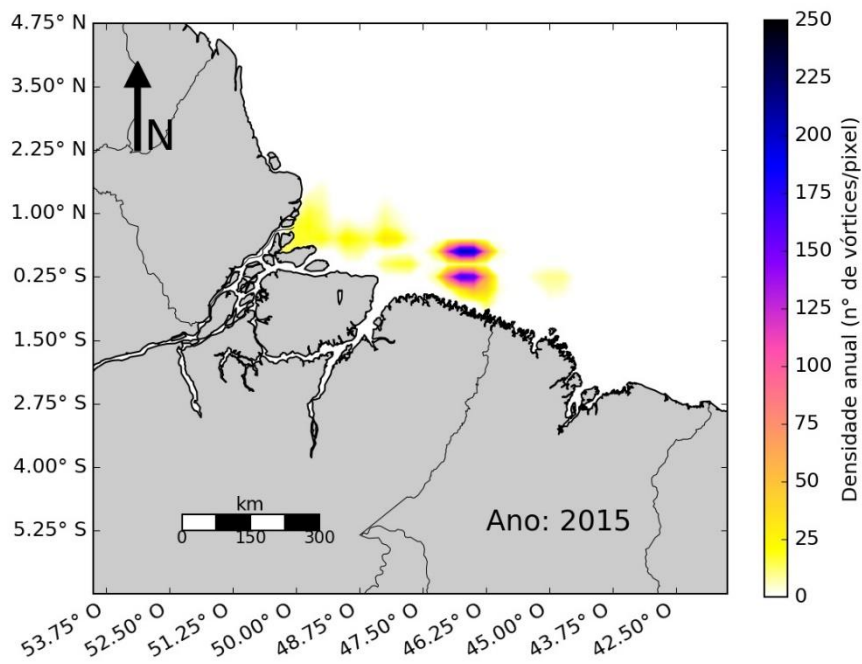
Mapa 3. Densidade de vórtices anti-ciclônicos para o ano de 2012.



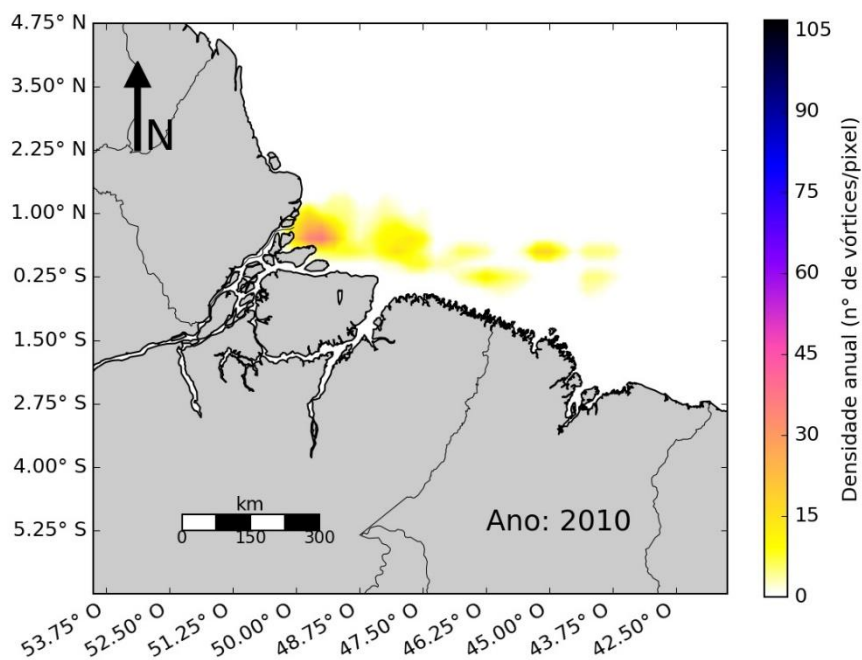
Mapa 4. Densidade de vórtices anti-ciclônicos para o ano de 2013.



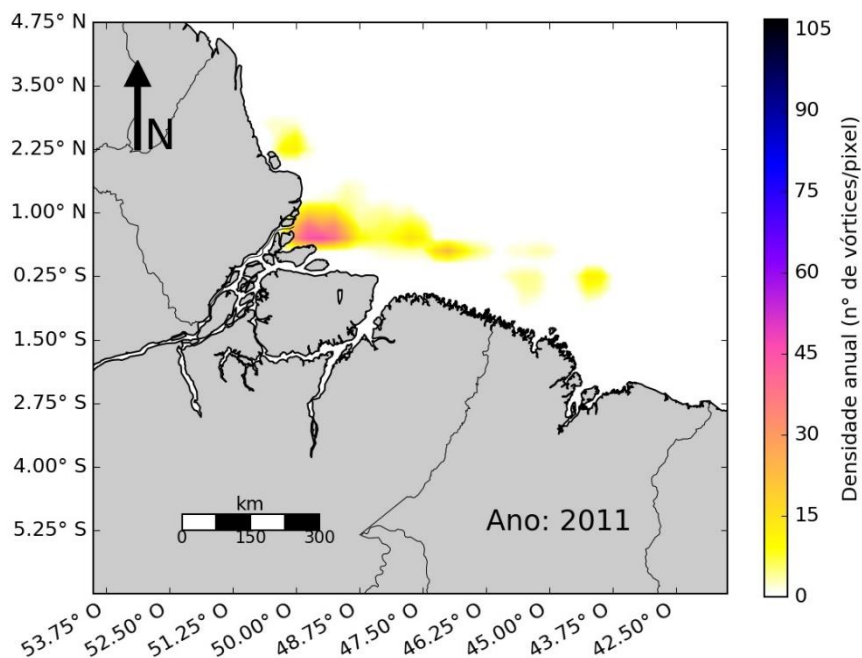
Mapa 5. Densidade de vórtices anti-ciclônicos para o ano de 2014.



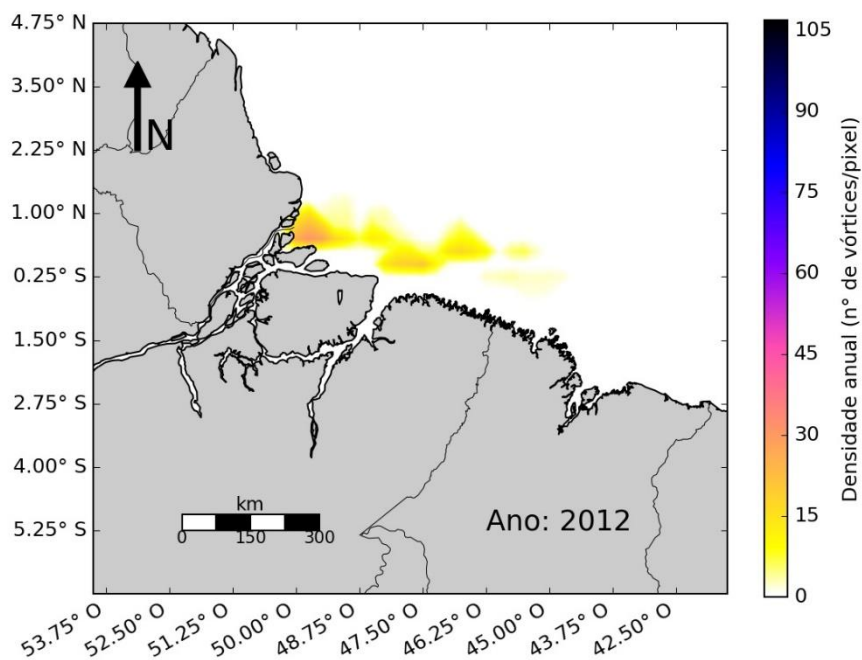
Mapa 6. Densidade de vórtices anti-ciclônicos para o ano de 2015.



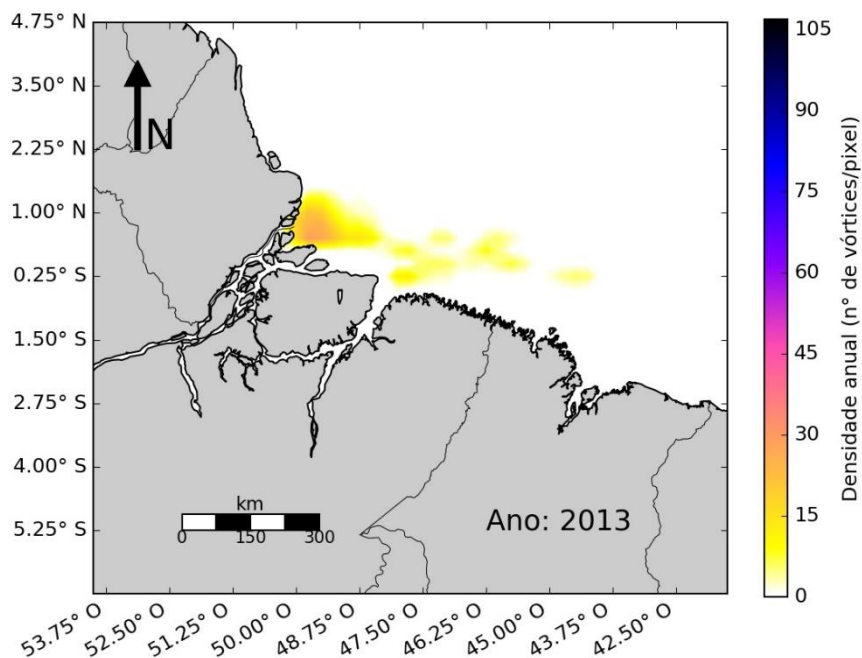
Mapa 7. Densidade de vórtices ciclônicos para o ano de 2010.



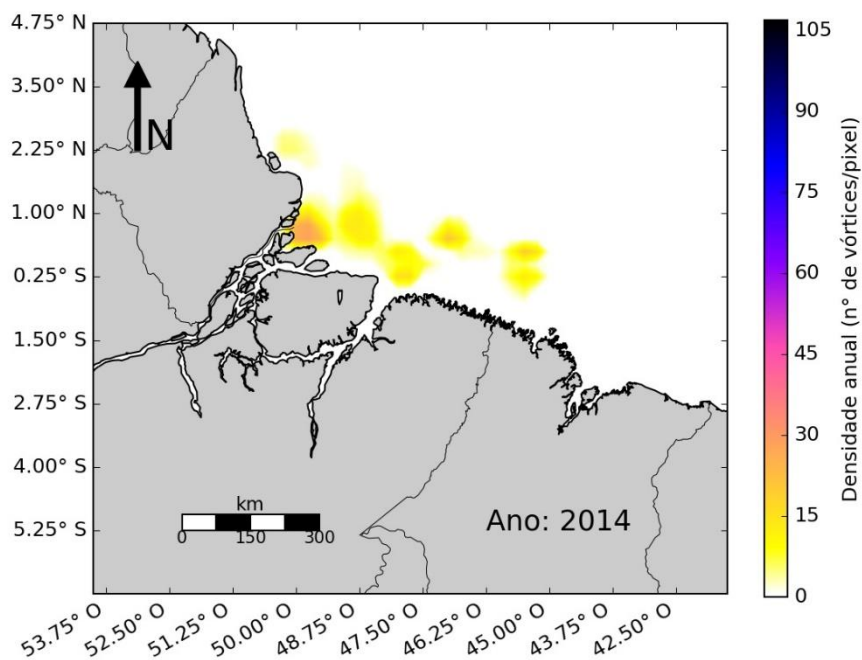
Mapa 8. Densidade de vórtices ciclônicos para o ano de 2011.



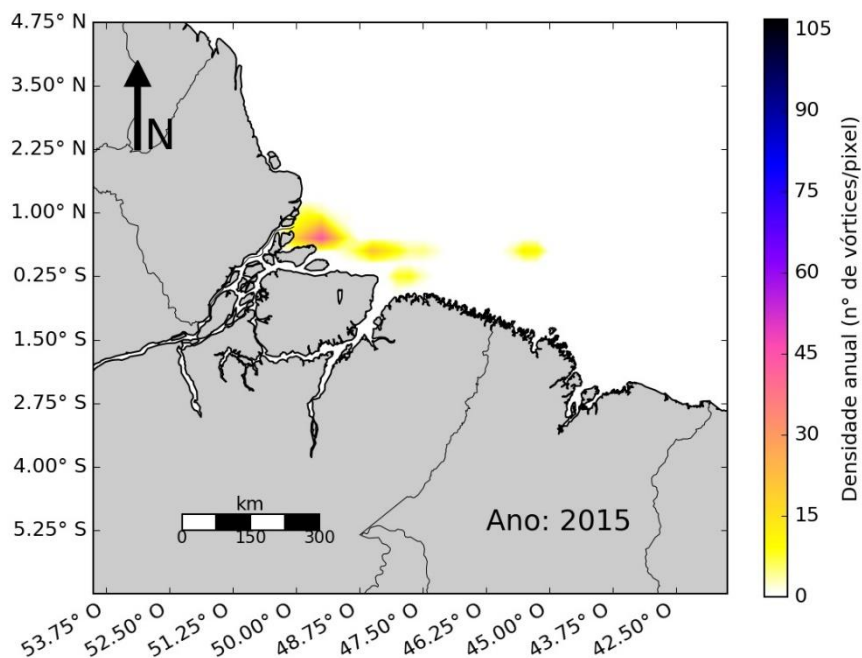
Mapa 9. Densidade de vórtices ciclônicos para o ano de 2012.



Mapa 10. Densidade de vórtices ciclônicos para o ano de 2013.



Mapa 11. Densidade de vórtices ciclônicos para o ano de 2014.



Mapa 12. Densidade de vórtices ciclônicos para o ano de 2015.

ANEXO III

SCRIPTS PYTHON UTILIZADOS

- 1) ALGORITMO PARA CÁLCULO DA DURABILIDADE DE VÓRTICES
- 2) ALGORITMO PARA CÁLCULO DO NÚMERO DE VÓRTICES
- 3) ALGORITMO PARA CÁLCULO DA DENSIDADE VÓRTICES