



ARDITI - Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação,
Tecnologia e Inovação
Observatório Oceânico da Madeira

Análise Histórica de Vórtices Oceânicos no Arquipélago da Madeira

Cláudio Cardoso
claudiofgcardoso@gmail.com

24 de Maio de 2024

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Métodos	2
2.1	Deteção de vórtices oceânicos	2
2.2	Categorização de vórtices oceânicos	3
2.3	Caracterização dinâmica dos vórtices	4
3	Resultados	4
3.1	Vórtices de origem externa	4
3.1.1	Sazonalidade na interseção de vórtices com o arquipélago	5
3.2	Vórtices de origem local	7
3.2.1	Sazonalidade na formação de vórtices	8
3.3	Caracterização dinâmica dos vórtices regional e locais	9
4	Discussão e conclusão	11
	Referências	14

Resumo

Este relatório, realizado para a Agência Regional para o Desenvolvimento da Investigação, Tecnologia e Inovação (ARDITI), analisa vórtices oceânicos de meso-escala no Arquipélago da Madeira ao longo de trinta anos. O objetivo foi identificar vórtices usando dados de satélite, distinguindo entre vórtices gerados localmente e aqueles formados em outras regiões que interceptam as ilhas do Porto Santo, Desertas e Madeira. A análise incluiu a caracterização sazonal dos padrões de geração e propagação dos vórtices e uma avaliação estatística das suas características dinâmicas e físicas.

Os resultados mostram que entre 1993 e 2022, 339 vórtices de origem externa interceptaram o arquipélago, sendo 153 ciclónicos e 186 anticiclónicos. A maioria das trajetórias propagaram-se de leste para oeste, com algumas exceções vindas do oeste, norte e sul do arquipélago. Notou-se uma possível influência das correntes oceânicas próximas, como a Corrente dos Açores e a Corrente das Canárias, mas também do sistema de afloramento costeiro na costa Africana. Em relação aos vórtices de origem local, foram identificados um total de 182 vórtices, dos quais 77 eram ciclónicos e 105 anticiclónicos. Os vórtices anticiclónicos mostraram uma dispersão mais ampla e uma orientação para sudoeste, enquanto que as trajetórias dos ciclónicos se concentraram mais a oeste da Madeira. A formação de vórtices foi mais frequente a sudoeste e noroeste da ilha principal. Vórtices ciclónicos e anticiclónicos foram mais frequentemente formados na zona oeste e leste da ilha, respetivamente. A sazonalidade na formação de vórtices locais mostrou uma distribuição relativamente uniforme, mas com picos de formação na primavera e verão.

Este estudo destaca a complexidade dos vórtices oceânicos na região da Madeira, revelando padrões sazonais importantes com implicações significativas na oceanografia e ecossistemas locais. A metodologia provou ser eficaz, e futuros estudos poderão explorar mais detalhadamente as interações entre vórtices e outros processos oceanográficos locais, além de suas implicações biológicas na região.

1 Introdução

Está bem estabelecido que os vórtices oceânicos – conhecidos na gíria científica como *eddies* – são estruturas omnipresentes nos oceanos (Robinson et al., 2017). Um vórtice oceânico é definido como um corpo de água rotativo e coerente (Talley et al., 2011), que se propaga pelo do oceano principalmente devido à sua própria dinâmica e aos efeitos da vorticidade planetária (i.e., Cushman-Roisin et al., 1990). Estas estruturas podem variar entre 1–10 km (sub-mesoescala) ou até centenas de km (mesoescala) em diâmetro, e são categorizadas de acordo com a sua rotação. No hemisfério norte, os vórtices ciclônicos fluem no sentido anti-horário (vorticidade positiva) e são caracterizados por uma anomalia negativa da superfície do mar no seu interior, enquanto que os vórtices anticiclônicos fluem no sentido horário (vorticidade negativa) e estão associados a uma anomalia positiva da superfície do mar. Além da classificação em relação à sua rotação, os vórtices podem ser classificados de acordo com a posição vertical do seu núcleo de vorticidade máxima. Os vórtices intensificados à superfície são aqueles cuja vorticidade máxima está localizada nas camadas superficiais, enquanto os vórtices intensificados na sub-superfície são aqueles cuja vorticidade máxima está localizada nas camadas de sub-superfície (e.g., Assassi et al., 2016; Barceló-Llull et al., 2017; Dilmahamod et al., 2018).

Os vórtices de mesoescala têm características distintas que podem ser usadas para a sua deteção, tais como anomalias de temperatura da superfície do mar (Sangrà et al., 2009), rugosidade da superfície do mar (Karimova, 2012), concentração de Clorofila-a na superfície (Basterretxea et al., 2002) e altura da superfície do mar (Chelton et al., 2011). No entanto, a identificação e construção das trajetórias de vórtices através de produtos derivados de sensores altimétricos é o método mais fiável até à data, pois funciona bem independentemente da cobertura de nuvens e das condições oceânicas. Ainda assim, é importante notar alguns fatores limitantes relacionados com este método: (1) a disponibilidade espaço-temporal limitada das faixas de satélite (Ioannou et al., 2017; Sangrà et al., 2009); (2) a resolução espacial grosseira dos produtos atualmente disponíveis (Amores et al., 2018); (3) a limitação na interpolação de dados perto da costa (Sangrà et al., 2009); (4) apenas é possível obter informação da superfície (Faghmous et al., 2015).

O Arquipélago da Madeira está localizado numa região dinâmica do Oceano Atlântico. A norte a Corrente dos Açores transporta águas quentes e salinas do Atlântico Norte em direção ao leste, contribuindo para a regulação térmica e salina nas águas ao redor da Madeira. Esta corrente ajuda a manter a temperatura da água mais elevada, especialmente durante o inverno, e aumenta a salinidade média da região. A Corrente das Canárias interceta a Madeira a partir do norte e contribui para o transporte de águas frias e ricas em nutrientes para a região. A interação entre a Corrente dos Açores e a Corrente das Canárias pode causar mistura de massas de água, influenciando as propriedades físicas e químicas das águas ao largo da Madeira. Embora esteja a uma distância considerável do arquipélago, o afloramento costeiro que ocorre ao longo da costa de Marrocos pode também ter efeitos indiretos na região do arquipélago, através de vórtices que possivelmente intercetam as ilhas.

A presença destas correntes e processos junto ao arquipélago faz com que o arquipélago

esteja exposto a processos de origem remota – que não são gerados no arquipélago, mas ainda assim podem ter implicações na oceanografia local. Embora estas correntes e processos tenham sido extensivamente estudados no passado, a integração do arquipélago no contexto regional foi raramente considerada. O arquipélago pode também induzir perturbações no ambiente, principalmente pelo efeito de barreira na circulação atmosférica provocado pela topografia de alta altitude (e.g., Couvelard et al., 2012; Caldeira & Sangrà, 2012). Consequentemente, estas perturbações podem provocar processos oceânicos localizados, muitas vezes na forma de vórtices oceânicos. Por sua vez, estes vórtices são conhecidos por induzir impactos a nível biológico, sendo até responsáveis por impulsionar a produtividade primária local (Caldeira et al., 2002). Este fenómeno tem como designação “Efeito de Massa de Ilha” (Doty & Oguri, 1956). A geração de vórtices induzidos pelas ilhas e consequente impacto biológico têm sido cada vez mais alvo de estudo um pouco por todo o mundo, principalmente no Havaí, na Ilha da Madeira e nas Canárias. No entanto, vórtices de origem regional – aqueles que são criados fora do arquipélago, mas que intersectam o arquipélago durante o seu tempo de vida – podem ter implicações significativas na geração de vórtices locais – aqueles que são criados no arquipélago – (supostamente) gerados pela interação de correntes oceânicas e atmosféricas com as ilhas.

Para além dos vórtices oceânicos formados ao largo da ilha da Madeira por processos locais, estima-se que o arquipélago esteja exposto a um numero considerável de vórtices oceânicos formados maioritariamente na Corrente dos Açores e na costa Noroeste Africana. A interação destes vórtices com as ilhas do arquipélago pode ter um impacto positivo ou negativo, uma vez que transportam águas oriundas do seu local de formação, muitas vezes com características distintas daquelas que se encontram na região. Apesar de importância destes vórtices na circulação e nos ecossistemas locais, o arquipélago carece de uma análise histórica das suas origens e trajetórias.

O objetivo deste relatório é identificar os vórtices que interagiram com o arquipélago, assim como identificar os vórtices formados localmente. Além disso, pretende-se estudar a sazonalidade desses vórtices e as características dinâmicas associadas a eles, com foco especial na região dinâmica do Oceano Atlântico em torno do Arquipélago da Madeira. Para tal, este estudo utiliza dados de satélites altimétricos, recolhidos no período entre 1993 e 2022.

2 Métodos

2.1 Detecção de vórtices oceânicos

Para a identificação dos vórtices e construção das suas trajetórias, o algoritmo "Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm" (AMEDA, Le Vu et al., 2017) foi executado com mapas em grelha de Topografia Dinâmica Absoluta (TDA) e campos de correntes geostróficas. Além da sua fiabilidade, o algoritmo AMEDA permite a configuração de vários parâmetros – como um raio de deformação de Rossby para a região em estudo – que evita a identificação de sinais espúrios de vórtices que são frequentemente provocados pelo esquema

de interpolação utilizado para combinar a distribuição heterogênea das trajetórias dos satélites altimétricos (Ioannou et al., 2017; Le Vu et al., 2017).

O AMEDA oferece a possibilidade de funcionar em modo híbrido, complementando correntes geostróficas com a TDA. Primeiro, o algoritmo utiliza as correntes geostróficas para a identificação dos centros dos vórtices, detetando extremos de Momento Angular Normalizado Localmente (MANL), que é máximo no centro de um vórtice (Mkhinini et al., 2014). Subsequentemente, os perímetros dos vórtices são calculados com base na velocidade média para cada contorno de TDA (0,2 cm) que rodeia o extremo do MANL. No entanto, as maiores vantagens do AMEDA são a detecção de eventos de fusão e divisão de vórtices, que são fenômenos recorrentes num ambiente caracterizado pela presença de vórtices, para além de outras informações fornecidas sobre as propriedades dinâmicas dos vórtices, tais como a velocidade de rotação, vorticidade, energia cinética, entre outros.

Para a construção das trajetórias dos vórtices, o algoritmo baseia-se na combinação de uma função de custo global e uma versão modificada do método do “vizinho local mais próximo”, que associa cada vórtice ei no instante t ao vórtice mais próximo ej do mesmo sinal no instante $t-dt$. A distância máxima de busca considera a velocidade máxima de propagação de ei , definida em $6,5 \text{ km d}^{-1}$. O AMEDA também é capaz de procurar vórtices perdidos durante um número especificado de passos temporais pelo utilizador. Esta é uma grande vantagem ao usar dados altimétricos, porque um vórtice pode desaparecer entre mapas consecutivos se as faixas dos satélites não cruzarem a estrutura durante vários dias (Chaigneau et al., 2008; Sangrà et al., 2009; Schütte et al., 2016), levando potencialmente à falsa identificação de vórtices perdidos como novos. Considerando que a suscetibilidade ao erro na associação de vórtices supostamente terminados a faixas interpoladas aumenta com o número de passos temporais associados (Faghmous et al., 2015), e que os satélites de altimetria demoram pelo menos 10 dias para repetir as suas faixas (Fu et al., 2010), este estudo utiliza um intervalo de 10 dias para a recuperação de vórtices perdidos.

Os dados de satélite de TDA e correntes geostróficas foram processados pelo sistema de processamento de dados de altimetria multimissão SSALTO/Duacs da AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic) e distribuídos pelo Serviço de Monitorização do Meio Marinho e Ambiente Copernicus ("Copernicus Marine and Environment Monitoring Service" - CMEMS). Estes dados têm uma resolução espacial de $0,125^\circ$, o que significa que vórtices com raio inferior a 15 km não poderão ser detetados. Os dados estão disponíveis através do site da CMEMS¹. Este estudo utiliza dados medidos entre 1993 a 2022.

2.2 Categorização de vórtices oceânicos

Seguindo uma metodologia similar a Cardoso et al. (2020), os vórtices oceânicos foram categorizados em dois grupos com base no seu local de formação: a) vórtices de regionais, definidos como aqueles gerados no exterior do arquipélago, e b) vórtices locais, definidos como

¹https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_EUR_PHY_L4_MY_008_068/description

aqueles formados no arquipélago. A área do Arquipélago da Madeira é definida entre as coordenadas geográficas 32 – 33,5°N e 18 – 16°O, incluindo assim as Ilhas da Madeira, Porto Santo e Desertas. Apenas vórtices com período mínimo de vida superior a 30 dias são considerados neste estudo.

2.3 Caracterização dinâmica dos vórtices

O número de Rossby (Ro) quantifica a intensidade da vorticidade do vórtice em relação à taxa de rotação da Terra. Consequentemente, um vórtice é altamente não linear e é provável que ocorra instabilidade centrífuga quando $Ro > 1$, enquanto $Ro < 1$ indica uma forte influência da rotação planetária e correntes dominadas pelo equilíbrio ciclogeostrófico entre a força do gradiente de pressão e a aceleração de Coríolis (Chelton et al., 2011; Mkhinini et al., 2014). O número de Rossby foi calculado com a seguinte equação:

$$Ro = \frac{V_{max}}{fR_{max}} \quad (1)$$

sendo f o parâmetro local de Coríolis, V_{max} a velocidade de rotação no interior do vórtice, e R_{max} o raio característico do vórtice. Para avaliar a eficácia de um vórtice em reter água no seu interior, o parâmetro de não linearidade (NL) foi calculado:

$$NL = V_{max}/c \quad (2)$$

em que c é representativo da velocidade de propagação do vórtice. A energia cinética turbulenta ("Eddy Kinetic Energy", EKE) é um parâmetro muito útil principalmente porque representa a energia induzida por vórtices no ambiente. No entanto, apenas a frequência e a intensidade de tais características podem ser detetadas, sendo, portanto, incapazes de discriminar trajetórias específicas. Este parâmetro foi calculado através da seguinte equação:

$$EKE = \frac{1}{2}[u'^2 + v'^2] \quad (3)$$

em que u' e v' são representativos das anomalias das componentes zonais e meridionais, respetivamente, de velocidade das correntes geostróficas calculadas com respeito à média entre 1993 e 2012.

3 Resultados

3.1 Vórtices de origem externa

De forma a analisar a geração e os padrões nas trajetórias dos vórtices ciclónicos (em azul) e anticiclónicos (em vermelho) que intercetam o arquipélago, a Figura 1A e B mostra as trajetórias e pontos de origem dos vórtices de origem regional, respetivamente. No período com-

preendido entre 1993 e 2022, 339 vórtices intercetaram o arquipélago, em que 153 e 186 foram ciclônicos e anticiclônicos, respetivamente.

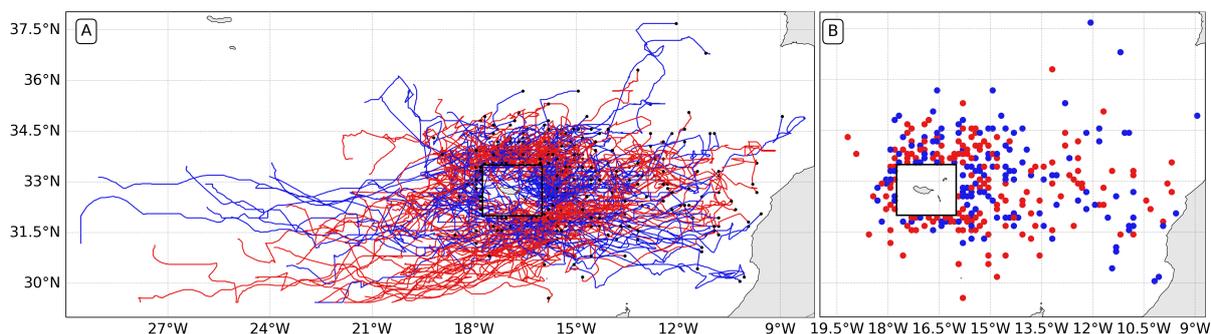


Figure 1: A) Representação das trajetórias dos vórtices de origem regional, juntamente com a respetiva origem (B). Pontos a preto no painel (A) indicam o local de formação. Cor azul e vermelha representa vórtices ciclônicos e anticiclônicos, respetivamente. Quadrado preto indica a área local do arquipélago.

A maioria das trajetórias propagam-se de este para oeste, com algumas exceções de vórtices formados a oeste, norte e sul do arquipélago. A grande maioria dos vórtices foram gerados relativamente próximos do arquipélago. No entanto, um número considerável de vórtices foram formados junto ao continente Africano, mostrando assim a exposição do arquipélago a massas de água formadas naquela região e transportadas no interior dos vórtices. Curiosamente, algumas das trajetórias que intercetam o arquipélago são interrompidas ou desviadas para norte ou sul, deixando um vazio na região local e mostrando assim a influência das ilhas na propagação destes vórtices.

Em relação a diferenças nos os padrões de propagação entre vórtices ciclônicos e anticiclônicos, parece claro que vórtices anticiclônicos propagam-se preferencialmente para sudoeste após interseção com o arquipelago, ao contrario que vórtices ciclônicos propagam-se maioritariamente para oeste.

3.1.1 Sazonalidade na interseção de vórtices com o arquipélago

De forma a determinar a sazonalidade na interseção de vórtices com o arquipélago, a Figura 2 apresenta as trajetórias dos vórtices que intercetaram o arquipélago da Madeira, segmentadas por estação do ano: Inverno (A), Primavera (B), Verão (C), e Outono (D). O painel E exibe a contagem mensal de vórtices ao longo do ano. Em relação ao numero de vórtices a intercetar o arquipélago, esta análise contabilizou 87, 94, 84 e 74 no inverno, primavera, verão e outono, respetivamente.

Durante o inverno (Figura 2A), observa-se uma distribuição relativamente uniforme de vórtices ao redor da Madeira. As trajetórias tanto dos vórtices ciclônicos quanto dos anticiclônicos são dispersas, cobrindo uma vasta área entre o arquipélago e o continente Africano.

Na primavera (Figura 2B), há um aumento na densidade de trajetórias próximas ao arquipélago. As trajetórias dos vórtices, especialmente as dos vórtices ciclônicos, tornam-se mais concentradas ao redor de Madeira, sugerindo um período de formação e passagem mais ativo.

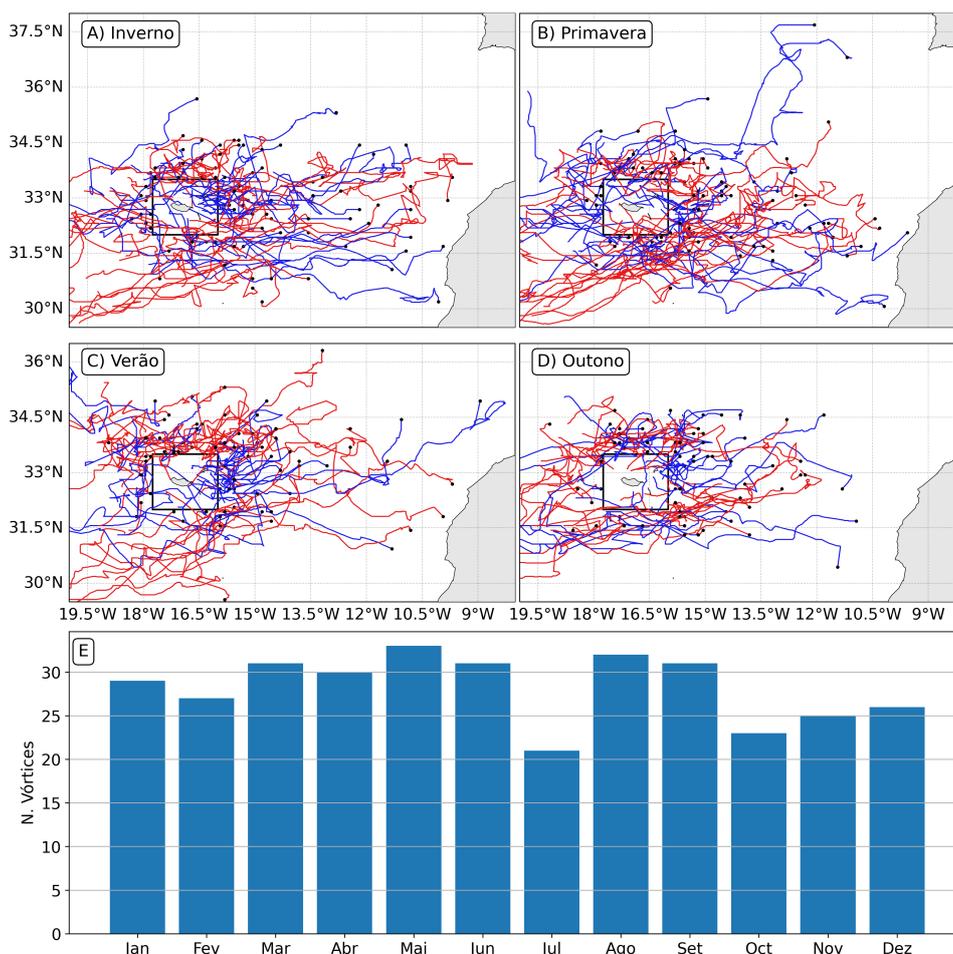


Figure 2: Painéis de A e D com representação das trajetórias dos vórtices de origem regional, de acordo com a estação em que intercetaram o arquipélago. Cor azul e vermelha representa vórtices ciclônicos e anticiclônicos, respetivamente. Quadrado preto define a área do arquipélago. E) Representação do número de interseções de vórtices com a área local, por mês.

O verão (Figura 2C) apresenta uma redução na quantidade de trajetórias de vórtices em comparação com a primavera. As trajetórias tendem a se afastar ligeiramente do arquipélago após interseção, com um padrão de dispersão mais amplo.

No outono (Figura 2D), observa-se um padrão de trajetórias que lembra o observado na primavera, mas com uma leve diminuição na concentração próxima ao arquipélago.

A contagem mensal de vórtices (Figura 2E) indica variações sazonais pouco significativas. Os meses de inverno apresentam uma contagem estável e moderada de vórtices. Maio destaca-se como o mês de maior atividade, refletindo o pico de passagem de vórtices na primavera. O verão, particularmente Julho, mostra uma queda na contagem de vórtices, corroborando a observação de menor atividade nesta estação. Agosto e Setembro, no entanto, indicam um aumento na atividade. Os meses de outono destacam-se pela pouca frequência de vórtices a intercetarem o arquipélago.

Os padrões apresentados indicam que a interseção de vórtices ciclônicos e anticiclônicos com o arquipélago da Madeira varia ligeiramente ao longo do ano. A primavera emerge como a

estação mais ativa, enquanto o outono mostra uma redução na atividade. Estas observações são cruciais para compreender a dinâmica oceânica da região, bem como para a previsão de eventos oceanográficos que possam impactar o arquipélago da Madeira.

3.2 Vórtices de origem local

De forma a determinar o número de vórtices formados localmente no arquipélago, juntamente com os padrões das suas trajetórias, a Figura 3 apresenta uma análise detalhada da formação e trajetória de vórtices locais, com vórtices ciclónicos indicados em azul e vórtices anticiclónicos em vermelho. Um total de 182 vórtices foram gerados no arquipélago entre 1993 e 2022, entre os quais 77 e 105 foram ciclónicos e anticiclónicos, respetivamente.

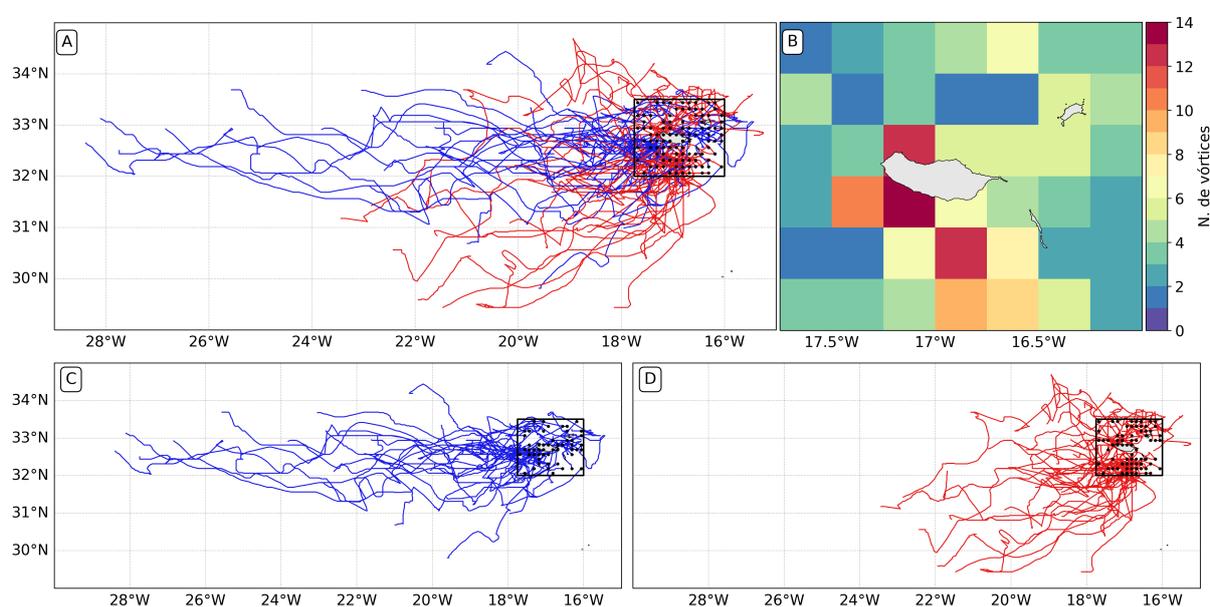


Figure 3: A) Representação das trajetórias dos vórtices de origem local. Pontos a preto indicam o local de formação. Cor azul e vermelha representa vórtices ciclónicos e anticiclónicos, respetivamente. B) Histograma espacial, representando o número de vórtices formados em cada área com resolução de 0.25° . Painéis C e D com representação das trajetórias e locais de formação dos vórtices ciclónicos e anticiclónicos, respetivamente.

Ao analisar a Figura 3A, observa-se que ambos os tipos de vórtices apresentam uma distribuição espacial semelhante. No entanto, as trajetórias dos vórtices anticiclónicos parecem mais dispersas e com uma orientação mais a sudoeste em comparação com as dos vórtices ciclónicos, cujas trajetórias demonstram uma maior concentração na área a oeste da Madeira.

A Figura 3B apresenta um histograma espacial que indica o número de vórtices formados em cada área da grelha com resolução horizontal de 0.25° . A análise do histograma revela que a formação de vórtices é mais frequente em certas regiões ao redor da Madeira. Estas áreas estão indicadas por cores mais quentes (vermelho e amarelo), enquanto áreas com menor densidade são representadas por cores mais frias (azul e verde). A concentração mais alta de vórtices está localizada a oeste e a noroeste da ilha principal, sugerindo condições oceanográficas e atmosféricas favoráveis para a formação de vórtices nessas regiões. No entanto, é importante

notar que a resolução espacial relativamente grosseira dos dados altimétricos deve ser tomada em consideração na interpretação destes resultados. Isto significa que o local exato de formação dos vórtices pode não ser exatamente aquele onde os vórtices foram detetados pela primeira vez.

Os painéis C e D da Figura 3 detalham separadamente as trajetórias dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos, respetivamente. No painel C, observa-se uma predominância de trajetórias dos vórtices ciclônicos a noroeste e oeste da Madeira, alinhando-se com as áreas de maior formação indicada no painel B. Algumas destas trajetórias apresentam distancias percorridas significativas, estendendo-se para o interior do oceano Atlântico. Já no painel D, as trajetórias dos vórtices anticiclônicos mostram uma concentração maior a sudeste da Madeira. Evidentemente, os vórtices ciclônicos são aqueles que se propagam por uma maior distância. Também se deve notar que os vórtices ciclônicos e anticiclônicos têm uma preferência de formação no sul e na zona oeste e este, respetivamente.

Em conclusão, a figura revela uma distribuição espacial distinta de trajetória para vórtices ciclônicos e anticiclônicos na região do arquipélago da Madeira. A concentração de vórtices a oeste e noroeste da ilha principal sugere que estas áreas são particularmente propensas à formação de vórtices, possivelmente devido a fatores locais como correntes oceânicas e condições atmosféricas.

3.2.1 Sazonalidade na formação de vórtices

De forma a determinar a sazonalidade na formação de vórtices locais, a Figura 4 apresenta a distribuição sazonal dos vórtices formados localmente no arquipélago da Madeira (painéis superiores), juntamente com a média sazonal de Energia Cinética Turbulenta (EKE, painéis inferiores) para as diferentes estações do ano.

No inverno (Figura 4A), observa-se uma dispersão relativamente uniforme de vórtices ao redor da Madeira, com algumas áreas apresentando uma maior densidade de formação, especialmente a sul da ilha principal. A EKE (Figura 4E) é relativamente baixa na região ao redor da Madeira, com algumas áreas de intensidade ligeiramente maior ao sul e oeste da ilha, refletindo assim uma dinâmica oceânica mais estável.

Na primavera (Figura 4B), há uma concentração notável de vórtices formados no sul da ilha da Madeira, particularmente na zona sudeste. No entanto, EKE nesta estação (Figura 4F) não apresenta alterações significativas em relação ao inverno.

Durante o verão (Figura 4C), a formação de vórtices é mais pronunciada a noroeste e sudoeste da Madeira. A contagem de vórtices é ligeiramente menor que na primavera, mas ainda significativa, mostrando uma atividade constante. Curiosamente, um "hotspot" na criação de vórtices aparece na Ilha do Porto Santo, sugerindo uma intensificação nas correntes oceânicas turbulentas naquela região. A EKE (Figura 4G) aumenta significativamente ao sul da Madeira. Este aumento indica uma maior energia induzida por vórtices no oceano, apesar da menor contagem comparada à primavera. É possível que este sinal esteja relacionado com a permanência de vórtices formados na primavera.

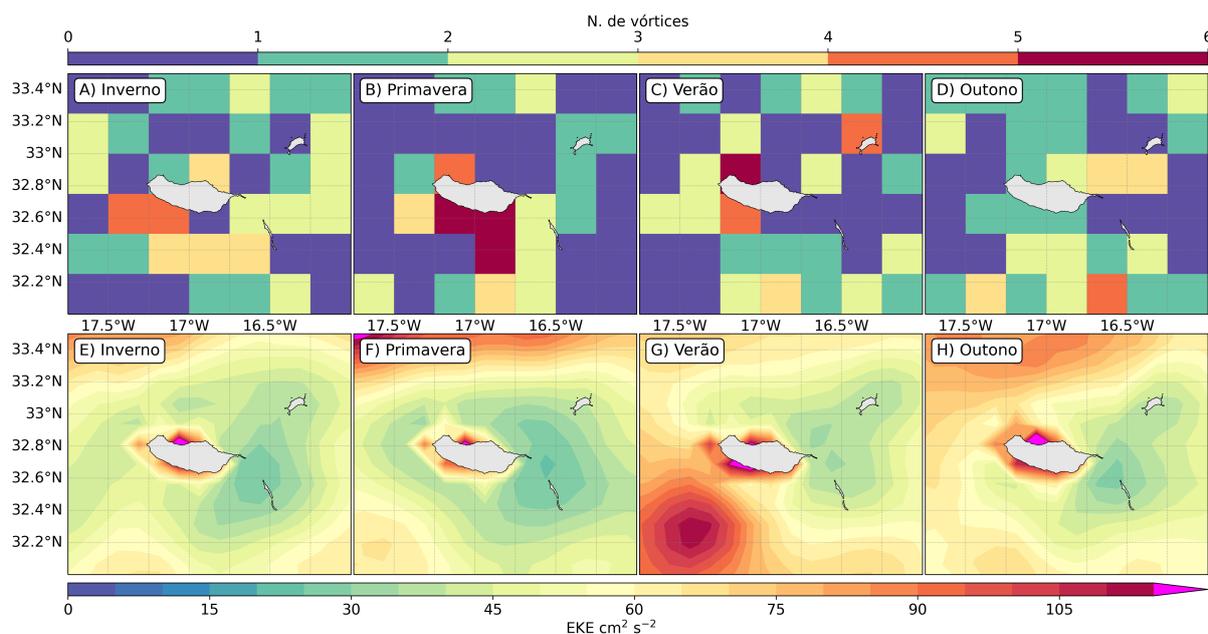


Figure 4: Painéis entre A e D com representação de um histograma espacial, representando o número de vórtices formados em cada área com resolução de 0.25° para cada estação. Painéis entre E e H com representação da média sazonal de EKE.

No outono (Figura 4D), o número de vórtices formados é o menor de todas as estações. A EKE diminui significativamente em relação ao Verão, exceto a norte do arquipélago numa região mais próxima à Corrente dos Açores.

Em suma, a figura revela padrões sazonais claros na formação de vórtices ao redor do arquipélago da Madeira. A primavera e o verão são as estações com maior atividade de vórtices, refletida tanto na contagem de vórtices quanto na EKE. O verão, embora tenha menor contagem de vórtices, mostra áreas de alta EKE, indicando a permanência de vórtices na região. De notar são os valores elevados de EKE ao longo da costa da Ilha da Madeira. No entanto, estes valores devem ser interpretados com algum cuidado, uma vez que a interpolação de dados altimétricos junto da costa estão sujeitos a erros.

3.3 Caracterização dinâmica dos vórtices regional e locais

De modo a caracterizar as propriedades médias dos vórtices que afetam o arquipélago, a Tabela 1 fornece uma análise detalhada das propriedades médias e máximas dos vórtices ciclónicos e anticiclónicos, fazendo uma distinção entre vórtices de origem local e regional. Esta distinção é crucial para entender as características e comportamentos distintos desses vórtices em relação à sua origem e tipo.

Primeiramente, observa-se que o número de vórtices detetados é maior para os vórtices regionais em comparação com os vórtices locais. Especificamente, foram detetados 153 vórtices ciclónicos regionais e 186 vórtices anticiclónicos regionais, enquanto os vórtices locais somam 77 ciclónicos e 105 anticiclónicos. Este dado sugere que o arquipélago está exposto a um

Table 1: Propriedades médias dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos de origem regional e de origem local. Valores mais altos entre os dois grupos estão destacados a negrito.

	Vórtices locais		Vórtices regionais	
	Ciclônicos	Anticiclônicos	Ciclônicos	Anticiclônicos
Número de vórtices detectados	77 (2,57 ano ⁻¹)	105 (3,5 ano ⁻¹)	153 (5,10 ano ⁻¹)	186 (6,20 ano ⁻¹)
Tempo de vida (dias)	117,51		192,28	
máximo	139,88	101,10	188,89	195,06
	592	344	765	1160
Distância percorrida (km)	484,64		976,46	
máximo	541,50	442,94	906,12	1034,32
	2240,93	1698,90	3332,06	6246,79
Velocidade de propagação (km d ⁻¹)	4,13		5,15	
máximo	3,87	4,31	4,79	5,44
Raio (km)	37,80		43,77	
máximo	41,00	34,56	43,45	44,02
	118,26	114,75	122,35	134,38
Área (km ²)	5399,16		7082,14	
máximo	6336,52	4448,10	6932,38	7201,43
	43935,28	41363,58	47024,60	56731,42
Velocidade de rotação (m s ⁻¹)	0,11		0,11	
máximo	0,13	0,10	0,12	0,10
	0,35	0,31	0,36	0,28
Vorticidade absoluta (s ⁻¹)	6,59×10⁻⁶		5,47×10 ⁻⁶	
máximo	6,63×10 ⁻⁶	6,55×10 ⁻⁶	5,91×10 ⁻⁶	5,12×10 ⁻⁶
	2,68×10 ⁻⁵	3,03×10 ⁻⁵	1,81×10 ⁻⁵	1,84×10 ⁻⁵
Energia cinética (m ² s ⁻²)	0,25		0,28	
máximo	0,34	0,16	0,34	0,23
	2,67	2,33	4,74	4,92
Número de Rossby	0,04		0,03	
máximo	0,04	0,04	0,04	0,03
	0,36	0,33	0,13	0,12
Não-linearidade	2,55		1,83	
máximo	2,75	2,41	2,10	1,60
	14,51	13,52	5,69	4,69

numero maior de vórtices formados no exterior.

O tempo de vida médio dos vórtices regionais é significativamente maior do que o dos vórtices locais. Os vórtices anticiclônicos regionais têm o maior tempo de vida médio (195,06 dias), seguido pelos ciclônicos regionais (188,89 dias). Em comparação, os vórtices locais têm tempos de vida médios de 139,88 dias para os ciclônicos e 101,10 dias para os anticiclônicos. Este padrão indica que os vórtices regionais são mais persistentes no ambiente oceânico, possivelmente devido a condições estáveis que suportam sua longevidade.

Naturalmente, a distância percorrida pelos vórtices segue o mesmo padrão do tempo de vida. Os vórtices regionais percorrem distâncias significativamente maiores, com os vórtices anticiclónicos regionais percorrendo em média 1034,32 km e os ciclónicos regionais 906,12 km. Em contraste, os vórtices locais percorrem distâncias médias de 541,50 km para os ciclónicos e 442,94 km para os anticiclónicos. Este resultado sugere que os vórtices regionais são mais móveis e cobrem áreas maiores do oceano.

Em termos de velocidade de propagação, os vórtices de origem regional apresentam velocidades médias superiores ($5,15 \text{ km d}^{-1}$) em relação aos vórtices de origem local ($4,13 \text{ km d}^{-1}$). Em ambos os grupos, os vórtices anticiclónicos apresentam velocidades de propagação superiores aos vórtices ciclónicos. Os vórtices anticiclónicos regionais aparecem em maior destaque, com velocidades médias de propagação de $5,44 \text{ km d}^{-1}$.

O raio médio dos vórtices regionais é ligeiramente maior do que o dos vórtices locais, com valores de 43,45 km para os ciclónicos regionais e 44,02 km para os anticiclónicos regionais. Os vórtices locais apresentam raios médios de 41,00 km para os ciclónicos e 34,56 km para os anticiclónicos. Naturalmente, a área média ocupada pelos vórtices regionais também é maior, com $7082,14 \text{ km}^{-2}$, comparado a $5399,16 \text{ km}^{-2}$ para os vórtices locais. Este aumento no tamanho e área indica que os vórtices regionais têm uma influência mais ampla no oceano.

A velocidade de rotação média é consistente entre todos os tipos de vórtices, com um valor médio de aproximadamente $0,11 \text{ m s}^{-1}$. No entanto, vórtices ciclónicos apresentam uma velocidade de rotação ligeiramente superior aos anticiclónicos em ambos os grupos. Da mesma forma, a vorticidade absoluta mostra uma diferença semelhante entre vórtices ciclónicos e anticiclónicos, com os vórtices ciclónicos locais apresentando a maior vorticidade média ($6,63 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$).

A energia cinética média é maior para os vórtices regionais ($0,28 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$), sugerindo que esses vórtices possuem uma maior energia e, possivelmente, um impacto maior nas condições oceanográficas locais. O número de Rossby médio é ligeiramente maior para os vórtices locais (0,04), indicando uma menor influência da força de Coriolis nesses vórtices.

Finalmente, a não-linearidade é mais pronunciada nos vórtices ciclónicos locais (2,55), indicando uma maior eficácia na contenção de massas de água nessas estruturas. Este valor é menor para os vórtices regionais, sugerindo uma menor coerência e eficácia no transporte de massas de água.

Em resumo, a tabela revela que os vórtices regionais tendem a ser mais numerosos, persistentes, móveis, e ocupam áreas maiores em comparação com os vórtices locais.

4 Discussão e conclusão

Este estudo focou-se na identificação e análise de vórtices oceânicos que influenciam a circulação oceânica no Arquipélago da Madeira, considerando tanto os vórtices de origem local quanto aqueles formados em regiões distantes. Através da aplicação do algoritmo AMEDA com dados de altimetria entre 1993 e 2022, foram obtidas informações detalhadas sobre as

trajetórias, sazonalidade e características dinâmicas desses vórtices.

Os resultados indicam que o arquipélago é afetado por um número significativo de vórtices de origem regional e local. No entanto, observou-se que vórtices regionais, predominantemente formados entre o arquipélago e a costa Noroeste Africana, interceptam o Arquipélago da Madeira com maior frequência do que aqueles que são formados localmente. Estas estruturas podem transportar massas de água com características distintas, influenciando as condições oceanográficas locais. De facto, tal suscetibilidade de ilhas de oceano profundo a vórtices oceânicos formados noutra região foi reportada por Cardoso et al. (2020). Os autores demonstraram que as Ilhas de Cabo Verde são responsáveis por bloquear a propagação de vórtices formados ao longo da costa Africana, resultando em deflexão, fusão, divisão e dissipação. Para além disso, alguns desses vórtices transportavam águas ricas em Clorofila-a, atuando como mecanismos de enriquecimento biológico remoto no arquipélago. É possível que eventos parecidos também ocorram no Arquipélago da Madeira, mas esta possibilidade terá que ser analisada num estudo dedicado a tais processos, com a complementarização de observações de satélite para a concentração Clorofila-a.

A análise sazonal na interseção de vórtices regionais com o Arquipélago da Madeira revelou que a primavera é o período com maior incidência de vórtices, sugerindo uma variabilidade sazonal (ainda que pouco significativa) nas interações entre os vórtices e o arquipélago.

Os vórtices de origem local mostraram uma distribuição espacial específica, com uma maior concentração de vórtices ciclónicos a oeste e vórtices anticiclónicos a sudoeste da Madeira. Esta distribuição pode estar associada a fatores oceanográficos e atmosféricos locais (Caldeira et al., 2014). Como foi mostrado no passado noutras ilhas com características semelhantes à Ilha da Madeira (e.g., Calil et al., 2008; Chavanne et al., 2002), a interação dos ventos alísios com a topografia da Ilha da Madeira pode favorecer a formação e propagação de vórtices ciclónicos e anticiclónicos nos flancos oeste e este da ilha. A sazonalidade na formação de vórtices locais também foi observada, com uma maior formação no inverno, primavera e verão, enquanto o outono apresentou uma redução na atividade de formação de vórtices. No entanto, valores significativamente elevados de EKE no verão parecem indicar a presença recorrente de vórtices na região a sudoeste da Ilha da Madeira. É muito provável que este sinal esteja relacionado com a mediação da propagação de vórtices pelo vento, como foi sugerido por Couvelard et al. (2012). De facto, Alves et al. (2020) mostrou, através de resultados de um modelo numérico, que esta região é altamente influenciada por vórtices formados pela interação dos ventos com a topografia da ilha.

Este estudo demonstra a importância dos vórtices oceânicos na dinâmica oceanográfica do Arquipélago da Madeira. A interação contínua com vórtices formados em regiões distantes e a formação de vórtices locais contribuem para a complexidade do ambiente marinho na região. A análise sazonal fornece novas perspetivas para a compreensão da variabilidade temporal desses fenómenos e suas possíveis implicações para a biologia marinha e a gestão dos recursos marinhos.

A aplicação do algoritmo AMEDA provou ser eficaz na identificação e caracterização de

vórtices, permitindo uma análise detalhada das suas trajetórias e características dinâmicas. No entanto, algumas limitações foram identificadas, como a resolução espacial dos dados de altímetria e a dificuldade em rastrear vórtices em áreas mais próximas da costa da Ilha da Madeira. Sugere-se que futuros estudos possam integrar dados adicionais, como observações *in-situ* e modelação numérica, para complementar as observações de satélite e fornecer uma visão mais completa dos processos envolvidos.

Em suma, a compreensão dos vórtices oceânicos e suas interações com o Arquipélago da Madeira é crucial para o desenvolvimento de estratégias de gestão marinha eficazes e para a previsão de eventos oceanográficos que possam impactar a região. Este estudo contribui para a literatura existente, fornecendo uma base sólida para pesquisas futuras e destacando a necessidade de monitorização contínua e detalhada dos vórtices oceânicos na região.

Referências

- Alves, J. M., Caldeira, R. M., & Miranda, P. M. (2020). Dynamics and oceanic response of the Madeira tip-jets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(732), 3048–3063.
- Amores, A., Jordà, G., Arsouze, T., & Le Sommer, J. (2018). Up to what extent can we characterize ocean eddies using present-day gridded altimetric products? *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- Assassi, C., Morel, Y., Vandermeirsch, F., Chaigneau, A., Pegliasco, C., Morrow, R., Colas, F., Fleury, S., Carton, X., Klein, P., & Cambra, R. (2016). An index to distinguish surface- and subsurface-intensified vortices from surface observations. *Journal of Physical Oceanography*, *46*(8), 2529–2552.
- Barceló-Llull, B., Sangrà, P., Pallàs-Sanz, E., Barton, E. D., Estrada-Allis, S. N., Martínez-Marrero, A., Aguiar-González, B., Grisolía, D., Gordo, C., Rodríguez-Santana, Á., Marrero-Díaz, Á., & Arístegui, J. (2017). Anatomy of a subtropical intrathermocline eddy. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *124*(April), 126–139.
- Basterretxea, G., Barton, E., Tett, P., Sangrà, P., Navarro-Perez, E., & Aristegui, J. (2002). Eddy and deep chlorophyll maximum response to wind-shear in the lee of Gran Canaria. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *49*(6), 1087–1101.
- Caldeira, R. M. A., Groom, S., Miller, P., Pilgrim, D., & Nezlin, N. P. (2002). Sea-surface signatures of the island mass effect phenomena around Madeira Island, Northeast Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, *80*(2), 336–360.
- Caldeira, R. M. A., & Sangrà, P. (2012). Complex geophysical wake flows Madeira Archipelago case study. *Ocean Dynamics*, *62*(5), 683–700.
- Caldeira, R. M. A., Stegner, A., Couvelard, X., Araújo, I. B., Testor, P., & Lorenzo, A. (2014). Evolution of an oceanic anticyclone in the lee of Madeira Island: In situ and remote sensing survey. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *119*(2), 1195–1216.
- Calil, P. H., Richards, K. J., Jia, Y., & Bidigare, R. R. (2008). Eddy activity in the lee of the Hawaiian Islands. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *55*(10-13), 1179–1194.
- Cardoso, C., Caldeira, R. M., Relvas, P., & Stegner, A. (2020). Islands as eddy transformation and generation hotspots: Cabo Verde case study. *Progress in Oceanography*, *184*, 102271.
- Chaigneau, A., Gizolme, A., & Grados, C. (2008). Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, *79*(2-4), 106–119.

- Chavanne, C., Flament, P., Lumpkin, R., Dousset, B., & Bentamy, A. (2002). Scatterometer observations of wind variations induced by oceanic islands: Implications for wind-driven ocean circulation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(3), 466–474.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., & Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2), 167–216.
- Couvelard, X., Caldeira, R. M. A., Araújo, I. B., & Tomé, R. (2012). Wind mediated vorticity-generation and eddy-confinement, leeward of the Madeira Island: 2008 numerical case study. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 58, 128–149.
- Cushman-Roisin, B., Tang, B., & Chassignet, E. P. (1990). Westward Motion of Mesoscale Eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 20(5), 758–768.
- Dilmahamod, A. F., Aguiar-González, B., Penven, P., Reason, C. J., De Ruijter, W. P., Malan, N., & Hermes, J. C. (2018). SIDDIES Corridor: A Major East-West Pathway of Long-Lived Surface and Subsurface Eddies Crossing the Subtropical South Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5406–5425.
- Doty, M. S., & Oguri, M. (1956). The Island Mass Effect. *ICES Journal of Marine Science*, 22(1), 33–37.
- Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., & Kumar, V. (2015). A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. *Scientific Data*, 2, 150028.
- Fu, L.-L., Chelton, D., Le Traon, P.-Y., & Morrow, R. (2010). Eddy Dynamics From Satellite Altimetry. *Oceanography*, 23(4), 14–25.
- Ioannou, A., Stegner, A., Le Vu, B., Taupier-Letage, I., & Speich, S. (2017). Dynamical Evolution of Intense Ierapetra Eddies on a 22 Year Long Period. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(11), 9276–9298.
- Karimova, S. (2012). Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data. *Advances in Space Research*, 50(8), 1107–1124.
- Le Vu, B., Stegner, A., & Arsouze, T. (2017). Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm (AMEDA) and its application to coastal eddy formation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, (pp. JTECH-D-17-0010.1).
- Mkhinini, N., Coimbra, A. L. S., Stegner, A., Arsouze, T., Taupier-Letage, I., & Béranger, K. (2014). Long-lived mesoscale eddies in the eastern Mediterranean Sea: Analysis of 20 years of AVISO geostrophic velocities. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12), 8603–8626.
- Robinson, J., New, A. L., Popova, E. E., Srokosz, M. A., & Yool, A. (2017). Far-field connectivity of the UK's four largest marine protected areas: Four of a kind? *Earth's Future*, 5(5), 475–494.

- Sangrà, P., Pascual, A., Rodríguez-Santana, Á., Machín, F., Mason, E., McWilliams, J. C., Pelegrí, J. L., Dong, C., Rubio, A., Arístegui, J., Marrero-Díaz, Á., Hernández-Guerra, A., Martínez-Marrero, A., & Auladell, M. (2009). The Canary Eddy Corridor: A major pathway for long-lived eddies in the subtropical North Atlantic. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(12), 2100–2114.
- Schütte, F., Brandt, P., & Karstensen, J. (2016). Occurrence and characteristics of mesoscale eddies in the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Ocean Science*, 12(3), 663–685.
- Talley, L. D., Pickard, G. L., & Emery, W. J. (Eds.) (2011). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 6th ed ed.