



Comparação Climatológica do Vento na Superfície do Mar entre Duas Reanálises Atmosféricas Globais para a Margem Continental Leste/Sudeste Brasileira
Sea Surface Wind Climatological Comparison for Brazilian East/Southeast Continental Shelf Between Two Global Atmospheric Reanalysis

Douglas Medeiros Nehme¹; Raquel Toste² & Luiz Paulo de Freitas Assad^{1,2}

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Laboratório de Oceanografia Física. Avenida Athos da Silveira Ramos 274, sala H2-010, Cidade Universitária, 21941-916 Rio de Janeiro/RJ, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia. Avenida Athos da Silveira Ramos 149, sala I-214, 21941-909 Rio de Janeiro/RJ, Brasil

E-mails: douglasnehme@ufrj.br; rtoste@gmail.com; luizpauloassad@gmail.com

Recebido em: 10/09/2018 Aprovado em: 15/01/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_117_126

Resumo

Devido à relevância do entendimento da influência dos fluxos atmosféricos sobre o estado do oceano, em especial, a modelagem e previsão das interações entre esses dois sistemas, o presente estudo objetivou comparar, climatologicamente, duas reanálises atmosféricas com relação à energia dos ventos sobre a superfície do mar para margem continental leste/sudeste brasileira. Os produtos selecionados foram o *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) e o ERA-Interim (ERA-I), comparados entre si de 1979 a 2010 e validados de acordo com os dados remotos do *Advanced Scatterometer* (ASCAT) entre maio/2007 e dezembro/2010. Os resultados demonstraram claro padrão mais energético do CFSR em relação ao ERA-I, seja espacial ou temporalmente, exceção feita a certas áreas costeiras. Quantitativamente, o primeiro produto, em média, foi 13% mais intenso, bem como apresentou maior energia cinética em 92% dos meses entre 1979 e 2010. O CFSR e o ERA-I superestimaram os dados do ASCAT em 8% e 2%, respectivamente, mas se ajustaram satisfatoriamente bem, com baixos RMSE e altos coeficientes de correlação. Sugere-se que a maior energia existente no CFSR esteja associada a sua maior resolução espacial, o que possibilitaria maior amostragem dos fenômenos atmosféricos, e que o melhor ajuste do ERA-I seja consequência de seu método de assimilação de dados mais robusto, o que compensaria a menor disponibilidade de dados *in situ* e remotos no Atlântico Sul.

Palavras-chave: Interação Oceano-Atmosfera; Atlântico Sul; *Climate Forecasting System Reanalysis*; ERA-Interim; Energia Cinética do Vento; Rotacional da Tensão de Cisalhamento do Vento

Abstract

Due to the relevance of understanding atmospheric fluxes influence on the ocean state, especially the modeling and prediction of the interactions between these two systems, the present study aimed to climatologically compare two atmospheric reanalysis with respect to the energy of the sea surface winds to the Brazilian east/southeast continental shelf. The selected products were the *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) and the ERA-Interim (ERA-I), compared between 1979 and 2010 and validated according to *Advanced Scatterometer* (ASCAT) data between May/2007 and December/2010. Results demonstrated a clearly more energetic pattern of CFSR in relation to ERA-I, either spatially and temporally, except for certain coastal areas. Quantitatively, the first product was 13% more intense on average and presented higher kinetic energy in 92% months between 1979 and 2010. The CFSR and the ERA-I overestimated the ASCAT data by 8% and 2%, respectively, but satisfactorily adjusted, with low RMSE and high correlation coefficients. Then is suggested that the greater energy available in the CFSR was associated with its higher spatial resolution, which would allow a greater atmospheric phenomena sampling, and the best fit of the ERA-I was a consequence of its more robust data assimilation method, which would compensate the less availability of *in situ* and remote data in South Atlantic.

Keywords: Air-Sea Interaction; South Atlantic; *Climate Forecasting System Reanalysis*; ERA-Interim; Wind Kinetic Energy; Wind Stress Curl

1 Introdução

O entendimento do padrão médio e da variabilidade dos ambientes oceânicos e costeiros permite um pleno gerenciamento das atividades regulares e emergenciais realizadas junto ao mar. Entretanto, a restrita quantidade de plataformas de coleta de dados ainda constitui um entrave ao contínuo e sistemático monitoramento e previsão do estado do oceano (Flemming, 2002; Legler *et al.*, 2015). Um dos principais forçantes da circulação oceânica em suas mais diversas escalas espaciais e temporais são os ventos que fluem sobre a superfície do mar. A atmosfera desempenha um papel imprescindível sobre a dinâmica e termodinâmica dos oceanos, em especial nas primeiras centenas de metros, tornando-se evidente a influência das condições de contorno atmosféricas sobre modelagem do ambiente marinho (Dee *et al.*, 2014). Por exemplo, nas camadas superficiais o vento controla toda a dinâmica de Ekman e de Sverdrup, enquanto a troca de calor é um fator determinante na profundidade da camada de mistura e formação de gelo (Schiller, 2011). Os fluxos de calor e de massa também influenciam regiões subsuperficiais, através da troca dessas propriedades em áreas de formação de massas d'água profundas (Chaudhuri *et al.*, 2016).

Nos últimos anos, vários estudos objetivaram analisar a qualidade de diferentes produtos atmosféricos e suas consequências à modelagem dos oceanos (e.g. Chaudhuri *et al.*, 2016; Metzger, 2003), incluindo a modelagem de ondas (e.g. Akpınar & Ponce de León, 2016; Lavidas *et al.*, 2017; Stopa & Cheung, 2014; Van Vledder & Akpınar, 2015), e a modelagem da própria atmosfera (e.g. Carvalho *et al.*, 2012, 2014). Entretanto, de todos esses estudos somente um foi orientado ao Atlântico Sul (Escoffier & Provost, 1998). Dessa forma, fica clara a lacuna na avaliação dos produtos atmosféricos disponibilizados atualmente e na identificação do que representa de forma mais adequada à dinâmica atmosférica na costa brasileira e, em especial, o que melhor forçaria um modelo hidrodinâmico para a região. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo comparar energeticamente duas reanálises atmosféricas com relação ao campo de vento junto à superfície do oceano na região da margem continental leste/sudeste brasileira. As bases analisadas são: *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR - Saha *et al.*, 2010) e *ERA-Interim* (ERA - Dee *et al.*, 2011).

2 Metodologia

Nessa seção estão brevemente descritos alguns aspectos associados à circulação atmosférica da região de estudo, as duas bases atmosféricas comparadas e os métodos utilizados para suas avaliações.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na porção ocidental do Oceano Atlântico Sul (15°S-30°S; 30°W-51°W), com sua área costeira estendendo-se do extremo norte do Rio Grande do Sul a porção central da Bahia (Figura 1). Seguindo a nomenclatura sugerida por Knoppers *et al.* (1999), esta foi tratada como margem continental leste/sudeste brasileira. Sua escolha se deu pela importância socioeconômica e científica para o Brasil, pois apresenta intensas atividades aquaviárias da indústria do petróleo e gás, com onze dos vinte mais importantes terminais públicos e privados nacionais, resultando em mais de 58% dos embarques e desembarques dos portos brasileiros (ANTAQ, 2016).

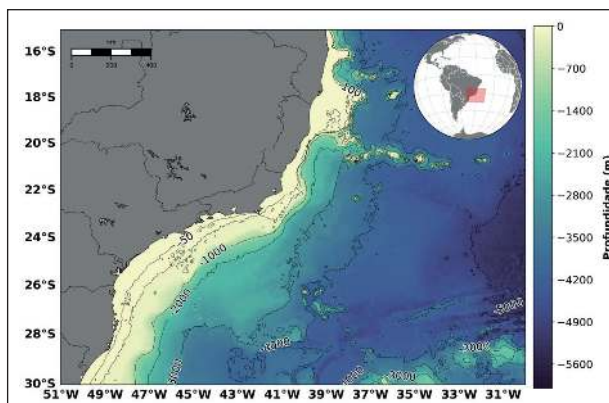


Figura 1 Mapa da margem continental leste/sudeste brasileira (15°S- 30°S; 30°W-51°W) com sua batimetria.

2.1.1 Caracterização Meteorológica

A região de interesse do estudo é majoritariamente controlada por um sistema de alta pressão atmosférica semipermanente, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Este apresenta uma sazonalidade bem definida, se intensificando no inverno, quando pode atingir valores máximos em torno de 1025 hPa. Além disso, a posição do centro desse sistema também varia ao longo do ano, localizando-se durante o verão em, aproximadamente,

32°S e 5°W, e no inverno próximo de 27°S e 10°W (Degola, 2013; Satyamurty *et al.*, 1998).

O ASAS e sua sazonalidade atuam diretamente sobre o regime de ventos de todo o Atlântico Sul, especialmente na porção oeste aqui avaliada, onde tal influência se dá, sobretudo, na forma de ventos de leste e nordeste. Durante o inverno, esse padrão se mantém entre as latitudes de 15°S e 25°S, porém nas regiões mais ao sul os ventos predominantes passam a oeste e sudoeste (Castelao & Barth, 2006; Degola, 2013; Satyamurty *et al.*, 1998). Tal modificação não ocorre somente pela menor influência do ASAS sobre a América do Sul pelo seu posicionamento mais a leste, mas também pela maior ocorrência de frentes frias (Castelao & Barth, 2006; Degola, 2013; Cavalcanti *et al.*, 2009), que são sistemas de tempo transientes originários ao sul do continente Sul-americano e que são caracterizados, entre outras coisas, por ventos do quadrante sul (Cavalcanti *et al.*, 2009).

2.2 Reanálises Atmosféricas

As reanálises, de acordo com Dee *et al.* (2014), são consistentes reprocessamentos de dados pretéritos (*in situ* e remotos) que são assimilados por um moderno modelo numérico, o que permite a obtenção de resultados com melhor acurácia que os modelos operacionais. Essa maior assertividade foi o principal motivo de escolha desse tipo de produto atmosférico, mais especificamente o CFSR (Saha *et al.*, 2010) e o ERAI (Dee *et al.*, 2011), que são reanálises atmosféricas globais de terceira geração, produzidas, respectivamente, pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Elas foram selecionadas por serem as

mais atuais com longo período de resultados disponíveis e pela ampla utilização na bibliografia. A Tabela 1 apresenta as suas principais características.

Essas reanálises representam a atmosfera de maneira mais fiel do que a geração anterior, pois possuem maiores resoluções horizontal e vertical e aplicam técnicas de assimilação de dados mais robustas (Dee *et al.*, 2014; Fujiwara *et al.*, 2017). Tanto o CFSR como o ERAI evoluíram nos dois quesitos em relação a seus antecessores, entretanto suas estratégias de melhora foram distintas. Enquanto o NCEP priorizou os avanços na representação temporal e espacial (vertical e horizontal) da atmosfera, o ECMWF optou por otimizar o processo de assimilação de dados. Isso foi ratificado quando se teve o CFSR como a reanálise de maior resolução horizontal (≈ 38 km) e com ERAI apresentando o esquema de assimilação mais avançado dentre todas as reanálises. Outro avanço importante nesses produtos foi o acoplamento dos modelos atmosféricos a outros sistemas (Fujiwara *et al.*, 2017), em especial os oceânicos, visto que desde a geração anterior já se praticava o acoplamento com modelos continentais (Dee *et al.*, 2011). Nesse sentido, o ERAI introduziu um modelo de ondas ao seu sistema (Dee *et al.*, 2011) e o CFSR implementou, pela primeira vez em uma reanálise global, uma estrutura que acoplava modelos atmosférico, oceânico e de gelo marinho (Saha *et al.*, 2010). Estes avanços permitiram melhores resultados nas interfaces entre estes componentes do Sistema Climático, devido a melhor representação espacial dos fenômenos e da retroalimentação entre os modelos. Entretanto os processos de troca entre oceano e atmosfera ainda não são fisicamente resolvidos e sim parametrizados, devido à complexidade e pequena escala de ocorrência.

		CFSR	ERA-Interim
Modelo de Previsão		<i>Climate Forecast System</i>	<i>Integrated Forecast System</i>
Tipo de Grade		Gaussiana Regular	Gaussiana Reduzida
Versão do Modelo		1	Cy13r2
Período Disponível		1979 a 2010	1979 até atualmente
Resolução Temporal		1 hora	3 horas*/6 horas**
Resolução Horizontal		0,31° (≈ 38 km)	0,70° (≈ 79 km)
Truncamento Espectral		T382	T255
Níveis Verticais	Atmosfera	64	60
	Oceano	40	Superfície
	Continente	4	4
	Gelo Marinho	3	Superfície
Topo da Atmosfera		0,266 hPa	0,1 hPa
Esquema de Assimilação		3D-VAR	4D-VAR

Tabela 1 Características das reanálises atmosféricas, CFSR e ERAI, utilizadas no presente estudo (Dee *et al.*, 2011; Saha *et al.*, 2010).
 *Grande parte dos parâmetros superficiais, incluindo continentais e ondas. **Parâmetros da atmosfera superior, toda troposfera

Outra característica diferente entre as reanálises analisadas foi o período de resultados disponíveis, tendo ambas iniciado em 1979, mas somente o ERAI continuou sendo atualizado regularmente. Por outro lado, o CFSR foi interrompido no fim de 2010 e não foi substituído por outra reanálise, mas por um produto operacional, o *Climate Forecast System Version 2*.

2.3 Métodos de Análise

A análise dos dois produtos descritos foi realizada para todo o período mutuamente disponível entre eles, 1979 a 2010, e através de suas médias mensais. A intenção dessa avaliação foi acessar, climatologicamente, as principais características da circulação atmosférica em superfície, analisando suas diferenças e sazonalidade e como seriam capazes de influenciar o oceano. Assim, optou-se por avaliar as reanálises em relação à energia cinética do vento por unidade de massa (EC - Equação 1), parâmetro associado à influência quadrática da velocidade do vento, assim como a tensão de cisalhamento do vento.

$$EC = \frac{(U_{10})^2}{2} = \frac{(U_{10u})^2 + (U_{10v})^2}{2} \quad (1)$$

onde U_{10} representa a velocidade do vento a 10 metros ($m \cdot s^{-1}$) e U_{10u} e U_{10v} suas componentes zonal e meridional.

Além das comparações entre si, o CFSR e o ERAI foram validados para a área de estudo frente observações. Para isso foram utilizados dados de vento sobre a superfície do mar do sensor remoto *Advanced Scatterometer* (ASCAT - Figa-Saldaña *et al.*, 2002). Os resultados originais desse escatômetro apresentam resoluções horizontais de 25 e 50 quilômetros e temporal de um dia. O produto utilizado nesse estudo foi obtido através do reprocessamento feito pelo *Institut Français de Recherche pour L'exploitation de la Mer*, disponibilizado pelo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*. Esse possui resolução horizontal de $0,25^\circ$, temporal de um mês e estende-se de maio de 2007 a dezembro de 2010. Sua escolha se deu por ser produzido exclusivamente com dados remotos e ser espacialmente completo, característica que ocasionou

a diminuição de sua resolução temporal e, consequentemente, das reanálises validadas a partir dele. Nesse processo de comparações entre simulações e sensoriamento remoto os produtos, por apresentarem resoluções espaciais distintas, foram degradados para a menor resolução, ou seja, o CFSR e ASCAT passaram, respectivamente, de $0,31^\circ$ e $0,25^\circ$ para $0,70^\circ$, valor do ERAI.

A caracterização da área de estudo e comparações dos resultados foram feitas através das diferenças (Equação 2) entre os resultados das reanálises e do erro (Equação 3) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE – Equação 4) entre as reanálises e os dados de satélite.

$$DIF = var_{CFSR} - var_{ERAI} \quad (2)$$

$$ERRO = var_{reanálise} - var_{ascat} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N (var_{reanálise}^t - var_{ascat}^t)^2} \quad (4)$$

onde *DIF* e *ERRO* se referem às diferenças calculadas entre, respectivamente, variáveis do CFSR (var_{CFSR}) e do ERAI (var_{ERAI}) e variáveis das reanálises ($var_{reanálise}$) e do ASCAT (var_{ascat}). *N* se refere ao total de instantes de tempo (*t*) e $var_{reanálise}^t$ e var_{ascat}^t à variável de uma das reanálises e do ASCAT, respectivamente.

3 Resultados e Discussão

As reanálises atmosféricas CFSR e ERAI, através de suas médias mensais, caracterizam de forma similar o padrão médio e variabilidade da EC do vento na superfície do mar para a área de estudo durante o período analisado, tendo a porção nordeste como a mais energética (Figura 2A e Figura 2D) e a região entre Cabo Frio (RJ) e Vitória (ES) a de maior variabilidade (Figura 2B e Figura 2E). Essa correspondência também ocorreu sazonalmente, com o outono apresentando os menores valores e havendo intensificação dos ventos durante a primavera e o verão, em especial, entre Cabo Frio (RJ) e Vitória (ES). Em termos gerais, aproximadamente, 70% dos resultados dos dois produtos apresentaram valores de EC de até $10 m^2 \cdot s^{-2}$ (Figura 2C e Figura 2F), o que está associado a ventos de até $6,3 m \cdot s^{-1}$, velocidades

reconhecidamente de moderada a baixa intensidade (MET OFFICE, 2010).

Esses produtos quando comparados entre si revelam tanto nas análises gerais, como nas espaciais e temporais que o CFSR é mais energético na superfície do mar do que o ERAI (Figura 3). Esse comportamento é verificado claramente através da diferença da EC entre eles que apresentou 73% dos resultados positivos (Figura 3A), que de acordo com a metodologia aplicada indicou maior energia no CFSR. O mesmo aspecto foi observado nas análises temporais, quando em 92% dos meses entre 1979 e 2010 o CFSR apresentou maior EC integrada em toda a área de estudo (Figura 3C). Essas diferenças também se refletem nas médias gerais calculadas para todo o período de análise (1979 a 2010), onde o CFSR foi 13% mais intenso que o ERAI, com mé-

dias de, respectivamente, $7,94 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e $7,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Essa sobreposição do CFSR ao ERAI também foi vista espacialmente ao longo das estações do ano, com o outono sendo o período de menores diferenças (Figura 4). Em contraponto, esse padrão energético foi desfeito de maneira preponderante em certas regiões costeiras, visto que o ERAI se estabeleceu como mais energético tanto na média geral (Figura 3B) como em todas as estações do ano (Figura 4).

A comparação entre reanálises também foi estendida à variabilidade da EC na superfície do mar, que foi avaliada através dos desvios padrões dos produtos. Esse aspecto, da mesma forma que as médias, apresentou-se maior no CFSR do que no ERAI, onde, para o período de 1979 a 2010, respectivamente, $6,52 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e $5,97 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

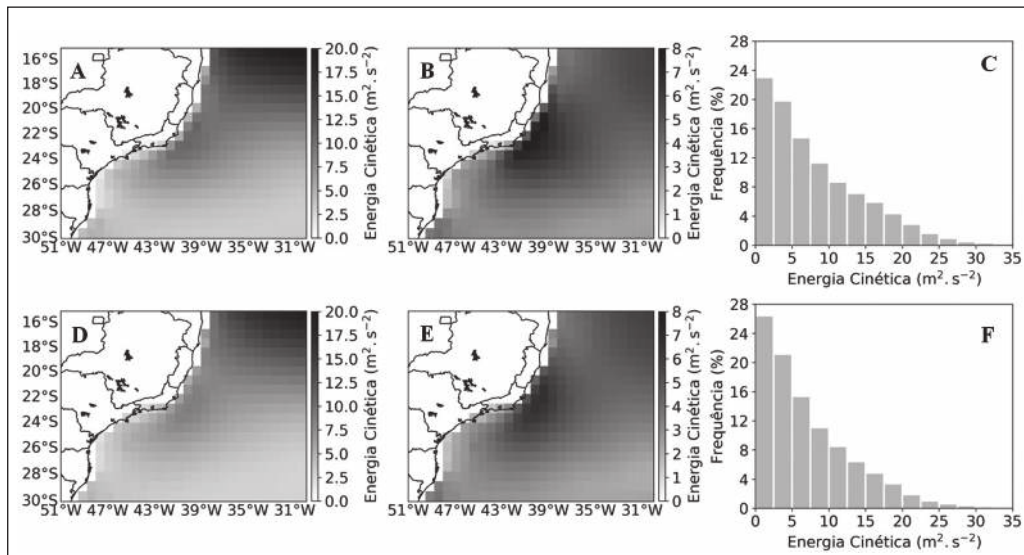


Figura 2 Caracterização da margem continental leste/sudeste Brasileira quanto à energia cinética do vento na superfície do mar, de acordo com as médias mensais das reanálises atmosféricas CFSR (A, B, C) e ERAI (D, E, F), de 1979 a 2010. O parâmetro em questão foi avaliado através de mapas médios (A, D) e de variabilidade (B, E) e histogramas (C, F).

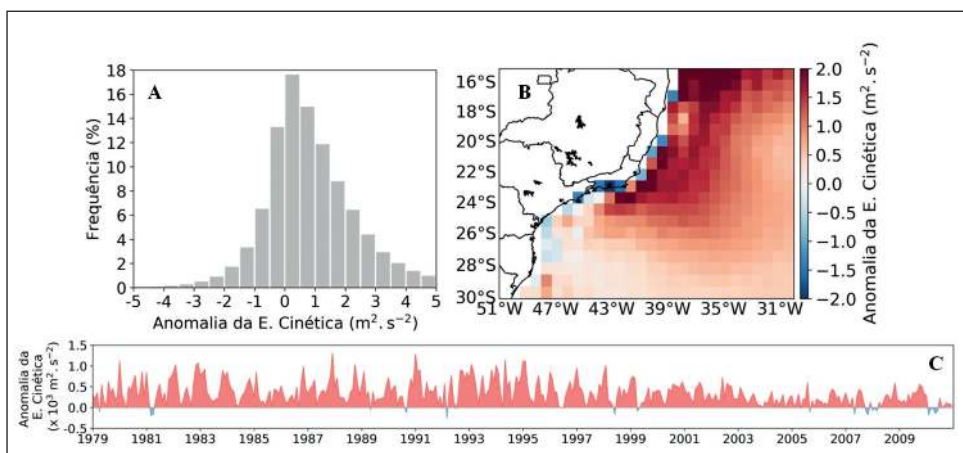


Figura 3 Caracterização da margem continental leste/sudeste Brasileira quanto à diferença da energia cinética do vento na superfície do mar entre as médias mensais das reanálises atmosféricas CFSR e ERAI, de 1979 a 2010. O parâmetro em questão foi avaliado através de histograma (A), mapa médio (B) e série temporal integrada a toda área de estudo (C). Diferenças positivas (negativas) indicam maiores marcações do CFSR (ERAI).

Comparação Climatológica do Vento na Superfície do Mar entre Duas Reanálises Atmosféricas Globais para a Margem Continental Leste/Sudeste Brasileira

Douglas Medeiros Nehme; Raquel Toste & Luiz Paulo de Freitas Assad

Já com a intenção de avaliar qual produto atmosférico melhor representava a realidade, parte de seus resultados de EC foram comparados a dados de satélite. O período dessas análises foi entre maio de 2007 e dezembro de 2010, intervalo de concomitância entre as reanálises e o sensor remoto ASCAT. De forma geral, o CFSR e o ERAI superestimaram as medições do satélite em 8% e 2%, respectivamente. Avaliando de forma mais profunda os padrões dos erros das reanálises em relação aos dados do ASCAT, notou-se que o ERAI apresentou um padrão mais equilibrado entre valores positivos (superestimação - 52%) e negativos (subestimação - 48%), enquanto para o CFSR os resultados positivos foram mais expressivos, 63% contra 37% de negativos (Figura 5A e Figura 5C). Estes aspectos se refletiram nas médias para esse período de comparação, onde o CFSR apresentou $7,87 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ e o ERAI e o ASCAT apresentaram, nessa ordem, $7,48 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ e $7,32 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$. Outro parâmetro que corroborou o melhor ajuste dos resultados do ERAI em relação ao sensor remoto foi o RMSE, que foi de $1,49 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$, enquanto o que relacionou o CFSR ao ASCAT foi de $1,86 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$.

O mesmo padrão foi notado espacialmente, com o CFSR superestimando os dados remotos ao longo de uma maior região da área de estudo, seja nas análises gerais (Figura 5B e Figura 5D) ou sazonais, com diferenças mais relevantes durante a primavera e o verão e menos intensas durante o outono. Isso demonstrou que os erros entre os resultados das reanálises e os dados remotos foram amplificados em períodos de maior energia (primavera e verão) e mais modestos em períodos de ventos menos intensos (outono), como corroborado através das retas de ajustes da Figura 6A e Figura 6B, que se afastaram da função identidade para maiores EC. Destaca-se que essa característica também ocorreu quando as reanálises foram comparadas entre si (Figura 6C).

Assim como para os valores médios o CFSR também superestimou a variabilidade do ASCAT, porém de forma menos intensa (5%), enquanto o ERAI teve seu resultado praticamente ajustado aos dados remotos. Entre maio de 2007 e dezembro de 2010, o CFSR, o ERAI e o ASCAT apresentaram, respectivamente, desvios padrões de $6,77 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$, $6,48 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ e $6,45 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$, o que revelou maior variabilidade dos resultados das reanálises nesse intervalo do que em relação ao período de 1979 a 2010.

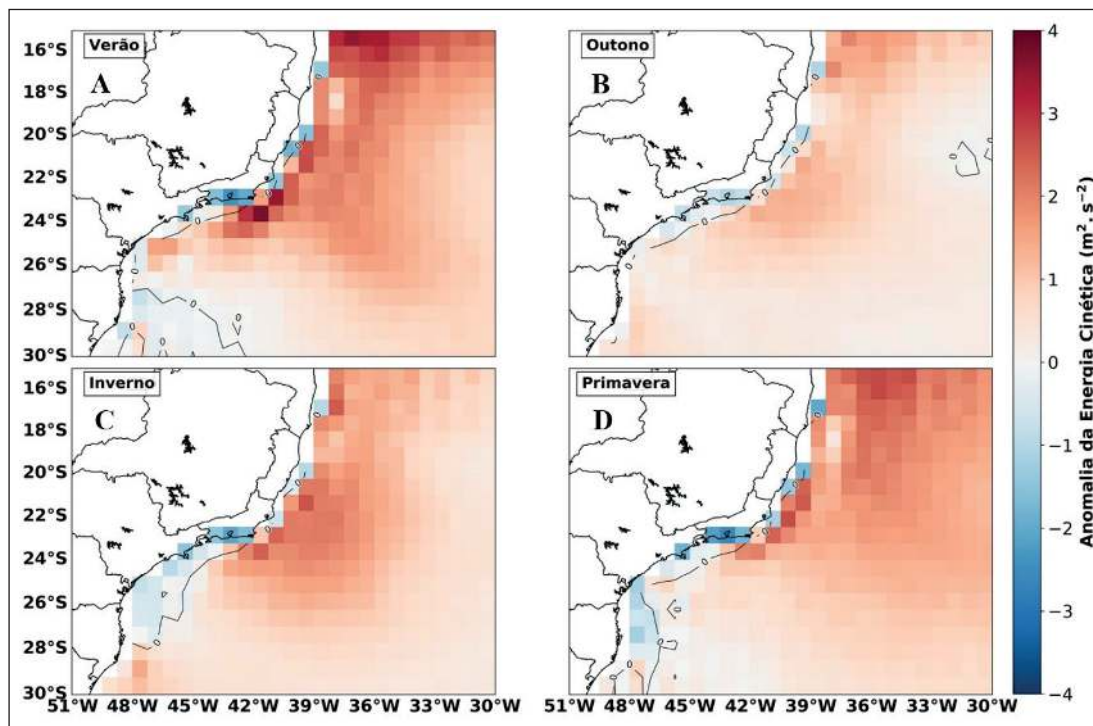


Figura 4 Caracterização da margem continental leste/sudeste Brasileira quanto à diferença sazonal da energia cinética do vento na superfície do mar entre as médias mensais das reanálises atmosféricas CFSR e ERAI, de 1979 a 2010. Diferenças positivas (negativas) indicam maiores marcações do CFSR (ERAI).

Figura 5 Caracterização da margem continental leste/sudeste Brasileira quanto ao erro da energia cinética do vento na superfície do mar entre as médias mensais da reanálise atmosférica CFSR e do sensor remoto ASCAT (A, B) e da reanálise atmosférica ERAI e do mesmo sensor (C, D), de maio de 2007 a dezembro de 2010. O erro foi avaliado através de histograma (A, C) e mapa médio (B, D). Valores positivos (negativos) indicam maiores marcações da reanálise em questão (do sensor ASCAT).

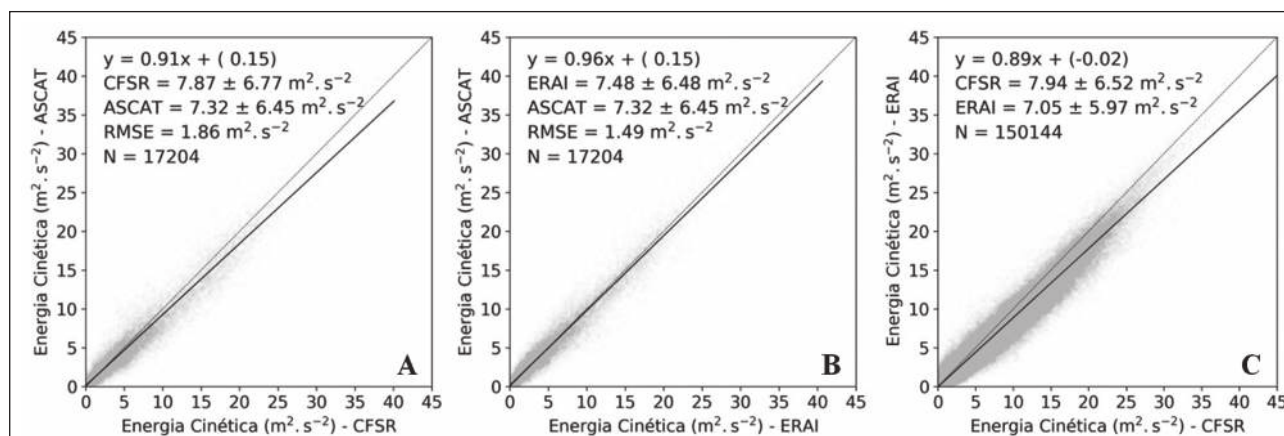
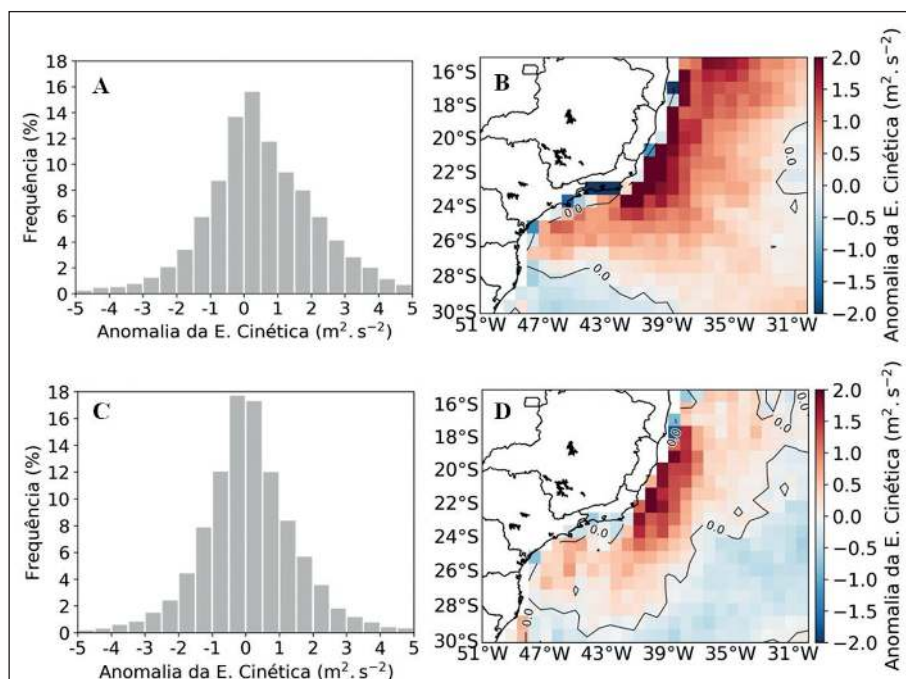


Figura 6 Gráficos de espalhamento da energia cinética do vento na superfície do mar entre as médias mensais da reanálise atmosférica CFSR e do sensor remoto ASCAT (A - maio de 2007 a dezembro de 2010), da reanálise atmosférica ERAI e do mesmo sensor (B - maio de 2007 a dezembro de 2010) e do CFSR e do ERAI (C - 1979 a 2010). As linhas cheias representam as retas de ajuste aos resultados e as retas tracejadas as funções identidade.

4 Discussão

Como descrito na seção anterior, o CFSR e o ERAI caracterizaram de forma similar e coerente à realidade a margem continental leste/sudeste brasileira quanto à circulação atmosférica em superfície e, conseqüentemente, a EC, demonstrando um gradiente energético de sul para norte (Figura 2A e Figura 2D) e com a região costeira entre o Rio de Janeiro (RJ) e Vitória (ES) como a de maior variabilidade

(Figura 2B e Figura 2E - Castelao & Barth, 2006; Mazzini & Barth, 2013). Tendo em vista a influência atmosférica sobre o processo de ressurgência que ocorre nessa região de mudança da direção da linha de costa, notou-se que os períodos de máximo (verão) e mínimo (outono) da EC foram coincidentes aos desse processo costeiro (Calado *et al.*, 2010; Castelao & Barth, 2006; Mazzini & Barth, 2013).

Quando comparadas entre si, ficou clara a maior energia existente no CFSR sobre a superfície

do mar (Figura 3), seja espacial (Figura 3B) ou temporalmente (Figura 3C), assim como observado por Stopa & Cheung (2014) para a costa Norte Americana e por Lavidas *et al.* (2017) para a costa da Escócia. De maneira geral, entre 1979 e 2010, essa reanálise foi 13% mais energético que o ERAI. Sugere-se que esse padrão esteja associado às diferentes resoluções horizontais dos produtos, $0,31^\circ$ (≈ 38 km) no CFSR e $0,70^\circ$ (≈ 79 km) no ERAI, resultando na distinta representação de fenômenos atmosféricos, em especial os de menor escala, possivelmente subestimados pelo produto menos resoluto. E mesmo havendo a degradação espacial do CFSR antes das análises, tais discrepâncias se mantiveram, mesmo que em menores intensidades.

Já a comparação espacial entre os produtos demonstrou um sistemático domínio de diferenças negativas de EC nas regiões costeiras (Figura 3B). Sugere-se que essa característica também esteja relacionada às diferentes resoluções espaciais dos produtos, visto que a linha de costa considerada no CFSR era melhor resolvida. Assim, áreas caracterizadas como continente em sua grade poderiam ser tratadas como oceano no ERAI, o que impactaria diretamente na rugosidade da superfície do modelo, freando os ventos sobre o continente e assim causando as diferenças negativas observadas (Figura 3B e Figura 4 - Carvalho *et al.*, 2014).

Em relação às análises temporais, notou-se amplo domínio das diferenças positivas ao longo de todo o período avaliado, entretanto diminuindo de intensidade com o passar do tempo, em especial na última década (Figura 3C). Isso se confirmou pela diminuição das taxas de superestimação da EC do ERAI pelo CFSR, que passaram de 13% (período total - 1979 e 2010) para 5% (período de comparação com os dados do ASCAT - maio de 2007 e dezembro de 2010). Essa diminuição provavelmente está associada a maior disponibilidade de observações *in situ* e remotas atualmente, fator que controlaria a evolução das simulações no hemisfério sul (Bengtsson *et al.*, 2007).

As duas reanálises superestimaram os dados do ASCAT, sendo o CFSR, em média, 8% mais energético e o ERAI 2%. Carvalho *et al.* (2012) também

observaram maiores velocidades dos ventos dessas duas reanálises ao forçarem um modelo atmosférico para a Península Ibérica e compararem seus resultados a dados de boias. Entretanto, no caso do presente estudo essa maior energia existente nos resultados das reanálises, em parte, pode estar relacionada ao mecanismo físico de inferência dos ventos na superfície do mar pelos escaterômetros. Esses sensores capturam as mudanças de rugosidade da superfície e as associam à velocidade dos ventos nas primeiras camadas da atmosfera. Entretanto, na presença de correntes marinhas, essa rugosidade não se relacionaria, exclusivamente, à intensidade do vento, mas sim à diferença entre essa variável e a velocidade das correntes, ou seja, a intensidade efetiva (Plagge *et al.*, 2012; Zhai *et al.*, 2012). Porém, os resultados presentes nos modelos atmosféricos são da própria velocidade do vento, que na existência de correntes marinhas é ligeiramente diferente da velocidade efetiva. Por essas discrepâncias serem pequenas em relação à intensidade média dos ventos, em geral uma ordem de grandeza menor (Zhai *et al.*, 2012), e difíceis de serem mensuradas, são descartadas (Plagge *et al.*, 2012; Zhai & Greatbatch, 2007). Entretanto, em condições específicas, como na região equatorial, sobre as correntes de contorno oeste e áreas costeiras a circulação oceânica é mais intensa e induz a superestimações consideráveis (Plagge *et al.*, 2012).

Em termos de erro, o ERAI foi o mais ajustado aos dados de satélite, com RMSE de $1,49 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, enquanto o CFSR apresentou $1,89 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Em relação aos coeficientes de correlação, o ERAI apresentou 0,96 e o CFSR teve 0,91. Assim ficou claro que ambas as reanálises se ajustaram satisfatoriamente aos dados do ASCAT, mas com os melhores resultados obtidos pelo ERAI. Isso, entre outros fatores, pode estar relacionado ao seu método de assimilação de dados mais robusto, o 4D-VAR, assim como sugerido por Hodges *et al.* (2011) e Tabata *et al.* (2011). Sua utilização provavelmente compensaria a menor disponibilidade de dados para o Atlântico Sul, enquanto para o CFSR, o NCEP aplicou o método 3D-VAR e priorizou a sua evolução em relação a sua antecessora através da melhora das resoluções espacial e temporal (Saha *et al.*, 2010). Entretanto, mesmo sabendo que o CFSR apresentou altas correlações e baixos erros aos dados do ASCAT e que as

degradações das reanálises foram necessárias para que as comparações fossem fisicamente coerentes, esse fato afetou sua principal vantagem, característica comprovada por Carvalho *et al.* (2014) em comparação a outros produtos de modelagem e dados de satélite.

5 Conclusões

No presente estudo duas reanálises atmosféricas globais, o CFSR e o ERAI, foram climatologicamente comparadas em relação à circulação sobre a superfície do mar para a margem continental leste/sudeste brasileira. Com a intenção de subsidiar estudos sobre a hidrodinâmica nessa região, avaliou-se o conteúdo de EC em superfície nas reanálises. A representatividade desses resultados foi avaliada pela comparação com dados do sensor remoto ASCAT.

Quando comparadas entre si, ficou nítida a maior energia existente no CFSR em relação ao ERAI, assim como observado por Stopa & Cheung (2014) e Lavidas *et al.* (2017). Esse padrão foi percebido nas análises espaciais e temporais, com a maior parte da área de estudo sendo representada por diferenças positivas de EC, o que possivelmente ocorreu pelas diferentes resoluções espaciais dos produtos. As avaliações temporais também demonstraram maior energia do CFSR, entretanto essas diferenças diminuíram com o passar dos anos, em especial na última década, passando de 13% a 5%. Esse fato estaria provavelmente associado à maior disponibilidade de observações no hemisfério sul atualmente e, conseqüentemente, na área de estudo.

Quando confrontadas aos dados remotos, as reanálises apresentaram satisfatórios resultados de correlação e erro, havendo, porém a superestimação por parte do CFSR, em 8%, e do ERAI, em 2%. Entretanto esse processo tende, em parte, a estar associado aos dados de escatômetro, sensor como o ASCAT, pois eles não obtêm a velocidade do vento propriamente dita, variável presente nos modelos, mas sim a velocidade efetiva do vento, ou seja, a diferença entre a velocidade superficial do oceano e a velocidade do vento logo acima (Plagge *et al.*, 2012; Zhai & Greatbatch, 2007).

Mesmo as duas reanálises apresentando satisfatório ajuste aos dados do ASCAT, o ERAI teve os melhores resultados. Sugere-se que o mais avançado método de assimilação de dados aplicado, o 4D-VAR, tenha sido preponderante, assim como proposto em

outros estudos (Hodges *et al.*, 2011; Tabata *et al.*, 2011). A utilização desse método provavelmente compensou a menor disponibilidade de dados para o Atlântico Sul, quando comparado a outras regiões, enquanto para o CFSR, o NCEP aplicou o método 3D-VAR e priorizou a evolução dessa reanálise em relação a sua antecessora através da melhora de suas resoluções espacial e temporal (Saha *et al.*, 2010), porém ao degradá-las para que as comparações desse estudo fossem possíveis, o CFSR foi penalizado.

Diversos outros estudos já fizeram comparações entre essas duas reanálises atmosféricas para diferentes variáveis, regiões do globo e objetivos. Através dessa literatura, foi possível perceber que de modo geral o CFSR apresentou vantagem ao ser utilizado em estudos que valorizavam suas maiores resoluções espacial e temporal, como na comparação de seus resultados a dados pontuais (boias meteorológicas e estações meteorológicas) ou em estudos de circulações locais. Já o ERAI se destacou em análises que as resoluções não eram questões centrais, por exemplo, quando aplicado como condição inicial e de contorno de modelos numéricos e comparado a dados de satélite. Adicionalmente, recentes estudos de modelagem de ondas (Akpınar & Ponce de León, 2016; Lavidas *et al.*, 2017; Stopa & Cheung, 2014; Van Vledder & Akpınar, 2015) trouxeram importantes compreensões, como: (i) o CFSR tende a superestimar os ventos em superfície e apresenta maior variabilidade; (ii) os dados de vento do ERAI apresentam menores erros e menor variabilidade; (iii) o CFSR apresenta melhor performance na caracterização e modelagem de eventos extremos; (iv) o ERAI apresenta maior homogeneidade ao longo do tempo, sendo mais confiável à modelagem de processos de longo prazo, porém deve ser aplicado com cuidado na caracterização e modelagem de eventos extremos; (v) os modelos de ondas são criticamente sensíveis à resolução espacial do forçante atmosférico e nem tanto à resolução temporal, dando vantagem ao CFSR.

6 Referências

- Akpınar, A. & Ponce de León, S. 2016. An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 73: 61–75.
- ANTAQ. 2016. *Desempenho do Setor Aquaviário 2016: Oportunidades e melhorias portuárias*. Relatório técnico, São Paulo, Brasil.
- Bengtsson, L.; Arkin, P.; Berrisford, P.; Bougeault, P.; Folland, C.K.; Gordon, C.; Haines, K.; Hodges, K.I.; Jones, P.; Kallberg, P.; Rayner, N.; Simmons, A.J.; Stammer, D.; Thorne, P.W.; Uppala, S.; & Vose, R.S. 2007. The need for a dynamical climate

Comparação Climatológica do Vento na Superfície do Mar entre Duas
Reanálises Atmosféricas Globais para a Margem Continental Leste/Sudeste Brasileira

Douglas Medeiros Nehme; Raquel Toste & Luiz Paulo de Freitas Assad

- reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(4): 495–501.
- Calado, L.; Da Silveira, I.C.A.; Gangopadhyay, A. & de Castro, B.M. 2010. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22° S, Brazil). *Continental Shelf Research*, 30(10-11): 1181–1188.
- Carvalho, D.; Rocha, A. & Gómez-Gesteira, M. 2012. Ocean surface wind simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data along the Iberian Peninsula coast. *Ocean Modelling*, 56: 31–42.
- Carvalho, D.; Rocha, A.; Gómez-Gesteira, M. & Silva Santos, C. 2014. Comparison of reanalyzed, analyzed, satellite-retrieved and NWP modelled winds with buoy data along the Iberian Peninsula coast. *Remote Sensing of Environment*, 152:480–492.
- Castelao, R.M. & Barth, J.A. 2006. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophysical Research Letters*, 33(3): 2–5.
- Cavalcanti, I.F.A. & Kousky, V.E. 2009. Frentes Frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; JUSTI DA SILVA, M.G.A. & SILVA DIAS, M.A.F. (Eds.). *Tempo e Clima no Brasil*. 1 ed., Oficina de Textos, cap. 9, pp. 135–148, São Paulo. ISBN: 978-85-86238-92-5.
- Chaudhuri, A.H.; Ponte, R.M. & Forget, G. 2016. Impact of uncertainties in atmospheric boundary conditions on ocean model solutions. *Ocean Modelling*, 100: 96–108.
- Chaudhuri, A.H.; Ponte, R.M.; Forget, G. & Heimbach, P. 2013. A comparison of atmospheric reanalysis surface products over the ocean and implications for uncertainties in air-sea boundary forcing. *Journal of Climate*, 26(1): 153–170.
- Dee, D.P. 2014. *Final publishable summary report for ERA-CLIM*. Relatório técnico. Reading, United Kingdom. Disponível em: <https://cordis.europa.eu/docs/results/265229/final1-fr-20140228.pdf>. Acessado em: 10/01/2019.
- Dee, D.P.; Balsameda, M.A.; Balsamo, G.; Engelen, R.; Simmons, A.J. & Thépaut, J. 2014. Toward a consistent reanalysis of the climate system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(8): 1235–1248.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balsameda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, I.; Kållberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.; Park, B.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656): 553–597.
- Degola, T.S.D. 2013. *Impactos e variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 92p.
- Escoffier, C. & Provost, C. 1998. Surface forcing over the south west Atlantic according to NCEP and ECMWF reanalyses over the period 1979-1990. *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(5-6): 537–542.
- Figa-Saldaña, J.; Wilson, J.J.W.; Attema, E.; Gelsthorpe, R.; Drinkwater, M.R. & Stoffelen, A. 2002. The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(3): 404–412.
- Flemming, N.C. 2002. Strategic planning for Operational Oceanography. In: PINARDI, N. & WOODS, J. (Eds.). *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications*. Springer, p. 1–18.
- Fujiwara, M.; Wright, J.S.; Manney, G.L.; Gray, L.J.; Anstey, J.; Birner, T.; Davis, S.; Gerber, E. P.; Harvey, V.L.; Hegglin, M.I.; Homeyer, C.R.; Knox, J.A.; Krüger, K.; Lambert, A.; Long, C.S.; Martineau, P.; Molod, A.; Monge-Sanz, B.M.; Santee, M.L.; Tegtmeier, S.; Chabrilat, S.; Tan, D.G.H.; Jackson, D.R.; Polavarapu, S.; Compo, G.P.; Dragani, R.; Ebisuzaki, W.; Harada, Y.; Kobayashi, C.; McCarty, W.; Onogi, K.; Pawson, S.; Simmons, A.; Wargan, K.; Whitaker, J. S. & Zou, C.Z. 2017. Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2): 1417–1452.
- Hodges, K.L.; Lee, R.W. & Bengtsson, L. 2011. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *Journal of Climate*, 24(18): 4888–4906.
- Knoppers, B.; Ekau, W. & Figueiredo, A.G. 1999. The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport. *Geo-Marine Letters*, 19(3): 171–178.
- Lavidas, G.; Venugopal, V. & Friedrich, D. 2017. Sensitivity of a numerical wave model on wind re-analysis datasets. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 77: 1–16.
- Legler, D.M.; Freeland, H.J.; Lumpkin, R.; Ball, G.; McPhaden, M.J.; North, S.; Crowley, R.; Goni, G.J.; Send, U. & Merrifield, M.A. 2015. The current status of the real-time in situ global ocean observing system for operational oceanography. *Journal of Operational Oceanography*, 8: s189–s200.
- Mazzini, P.L.F. & Barth, J.A. 2013. A comparison of mechanisms generating vertical transport in the Brazilian coastal upwelling regions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(11): 5977–5993.
- MET OFFICE, 2010. *The Beaufort Scale*. Relatório técnico, Exeter, United Kingdom. Disponível em: https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/mohippo/pdf/s/j/10_0425_fact-sheet_6_beaufort.pdf. Acessado em 10/01/2019.
- Metzger, E.J. 2003. Upper ocean sensitivity to wind forcing in the South China Sea. *Journal of Oceanography*, 59(6): 783–798.
- Plagge, A.M.; Vandemark, D. & Chapron, B. 2012. Examining the impact of surface currents on satellite scatterometer and altimeter ocean winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(12): 1776–1793.
- Saha, S.; Moorthi, S.; Pan, H.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; Tripp, P.; Kistler, R.; Woollen, J.; Behringer, D.; Liu, H.; Stokes, D.; Grumbine, R.; Gayno, G.; Wang, J.; Hou, Y.; Chuang, H.; Juang, H.H.; Sela, J.; Iredell, M.; Treadon, R.; Kleist, D.; Van Delst, P.; Keyser, D.; Derber, J.; Ek, M.; Meng, J.; Wei, H.; Yang, R.; Lord, S.; van den Dool, H.; Kumar, A.; Wang, W.; Long, C.; Chelliah, M.; Xue, Y.; Huang, B.; Schemm, J.; Ebisuzaki, W.; Lin, R.; Xie, P.; Chen, M.; Zhou, S.; Higgins, W.; Zou, C.; Liu, Q.; Chen, Y.; Han, Y.; Cucurull, L.; Reynolds, R.W.; Rutledge, G. & Goldberg, M. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8): 1015–1057.
- Satyamurty, P.; Nobre, C.A. & Silva Dias, P.L. 1998. South America. *Meteorological Monographs*, 27(49): 119–139.
- Schiller, A. & Brassington, G.B. 2011. *Operational Oceanography in the 21st Century*. Springer. Australia.
- Stopa, J.E. & Cheung, K.F. 2014. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Modelling*, 75: 65–83.
- Tabata, Y.; Hashiguchi, H.; Yamamoto, M.K.; Yamamoto, M.; Yamanaka, M.D.; Mori, S.; Syamsudin, F. & Manik, T. 2011. Lower tropospheric horizontal wind over Indonesia: A comparison of wind profiler network observations with global reanalysis. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(9): 986–995.
- Van Vledder, G.P. & Akpınar, A. 2015. Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields. *Applied Ocean Research*, 53: 161–178.
- Zhai, X. & Greatbatch, R.J. 2007. Wind work in a model of the northwest Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 34(4): 1–4.
- Zhai, X.; Johnson, H.L.; Marshall, D.P. & Wunsch, C. 2012. On the Wind Power Input to the Ocean General Circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 42(8): 1357–1365.