

QUAL O IMPACTO DA INTENSIFICAÇÃO DO CICLO HIDROLÓGICO DA BACIA AMAZÔNICA NO ATLÂNTICO TROPICAL OESTE?

Nelson de Almeida Gouveia¹, Douglas Francisco Marcolino Gherardi¹, Fabien Hubert Wagner¹, Luiz Eduardo Aragão¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE CP 515-12227-010- São José dos Campos - SP, Brasil; nelsongov89@gmail.com; douglas.gherardi@inpe.br; wagner.h.fabien@gmail.com; luiz.aragao@inpe.br

RESUMO

Nas últimas duas décadas, a bacia do rio Amazonas apresentou períodos de inundações e secas extremas, influenciando na vazão dos rios e consequentemente na descarga de água para o oceano Atlântico tropical Norte. Essas mudanças no ciclo hidrológico impactam diretamente na salinidade da superfície do mar (SSM). Dessa forma, este trabalho teve como objetivo analisar séries temporais de SSM no Oceano Atlântico Tropical Norte nos dois principais caminhos de exportação de água da pluma do rio Amazonas: (1) contracorrente norte equatorial e (2) região de formação de vórtices. A série temporal do SSM derivou de um modelo aditivo generalizado, que possui produtos derivados do sensor MODIS-Aqua como variáveis preditoras. No período analisado (2002 a 2016) os resultados mostram tendências negativas da SSM nas duas áreas, relacionadas com tendências positivas de precipitação na porção central e noroeste da Bacia Amazônica. Essa maior quantidade de água descarregada no oceano influencia principalmente o balanço de calor do Atlântico Tropical oeste.

Palavras-chave — sensoriamento remoto, bacia Amazônica, intensificação, ciclo hidrológico, salinidade.

ABSTRACT

Over the last two decades, the Amazon River basin presented periods of flood and drought extremes. These influenced the river flow and the water discharged to the ocean. The sea surface salinity (SSS) in the tropical western Atlantic is sensitive to the hydrological cycle changes. Thus, this work aimed to analyze the SSS time series in the Western Tropical North Atlantic in two main of water exporting pathways of the Amazon River plume: (1) North equatorial countercurrent and in the (2) region of rings formation. The SSS time series derived from generalized additive model that used MODIS-Aqua products as predictive variables. In the period analyzed (2002-2016) the SSS presented negative trends, in both region, suggesting a relation with precipitation increase in the central and northwest portion of the Amazon basin. This large amount of water to the ocean influence mainly the heat budget and ocean circulation of western Tropical Atlantic.

Key words — Remote Sensing, Amazon river basin, hydrological cycle intensification, Salinity.

1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos identificaram alta frequência de inundações e secas extremas na bacia do rio Amazonas (BRA) nas últimas décadas [1-5]. Esta intensificação do ciclo hidrológico pode estar relacionada com anomalias positivas da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical Norte, que provoca o aumento da umidade transportada para a BRA pelos ventos alísios de nordeste [1,2].

A BRA introduz, anualmente, $6,6 \times 10^3 \text{ km}^3$ de água doce no Oceano Atlântico [6]. Esta água doce descarregada no oceano forma a pluma do rio Amazonas, que ao longo do ano se estende por mais de 1000 km da foz [7,8]. Além disso, esta pluma possui um papel importante no clima de outras regiões, como no Mar do Caribe, do Golfo do México e da América Central [9,10].

Essa descarga do rio Amazonas vai influenciar os padrões de SSM, tornando esta variável uma boa indicadora de possíveis impactos no ciclo hidrológico [11]. Assim, a análise da variabilidade temporal da SSM pode ajudar na compreensão de processos ligados ao ciclo hidrológico do Atlântico tropical oeste. Existem alguns métodos de obter a SSM da região da pluma do Rio Amazonas, como relações empíricas com outras variáveis oceânicas (eg.: Coeficiente de absorção da matéria orgânica) [7,12] e recentemente por meio de dois Satélites o *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) e *AQUARIUS*, que iniciaram suas atividades a desde 2010 e 2011, respectivamente.

Atualmente ainda não se conhece os impactos dos eventos extremos que vêm ocorrendo na bacia Amazônica sobre a porção oeste do oceano Atlântico tropical. No entanto, sabe-se que a SSM é uma variável que pode indicar possíveis mudanças no ciclo hidrológico. Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a SSM (estimado a partir dos dados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS-Aqua) em duas vias de exportação de água: 1) A da retroflexão da corrente norte do Brasil e a 2) região de formação de vórtices.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo foi limitada entre as coordenadas longitudinais 35°W e 65°W; e latitudinais 20°N e 5°S (Figura 1). Os dados de SSM, foram obtidos do modelo aditivo generalizado desenvolvido por [13] no período de julho de 2002 a dezembro de 2016. Este modelo usa as bandas de reflectância de superfície e um e um produto de absorção da matéria orgânica e detritos obtidas do sensor MODIS-Aqua para estimar a SSM. Os autores mostraram que o modelo possui bom desempenho quando comparado a dados *in situ* ($R^2 = 0,92$; $rmse = 1,47$; $mae = 1,09$), além de se mostrar adequado para estudar processos oceanográficos [13]. Considerou-se o limiar de SSM de 35,5 para delimitar o perímetro da pluma do rio Amazonas, conforme [7, 12, 13].

2.1. Análise de tendência e decomposição por ondeleta

Analizou-se vetores temporais médios de SSM entre julho de 2002 e dezembro de 2016, para regiões representativas dos caminhos de exportação de água da contracorrente norte Equatorial (EA_{CCNE}) e da área de formação de vórtices (EA_{FV}). A escolha dessas áreas foi feita com base na análise visual de médias mensais de SSM calculados para os períodos de Janeiro-Fevereiro-Março-Abril-Maio (JFMAM) e Junho-Julho-Agosto-Setembro (JJAS). A escolhas destes está relacionado a sazonalidade da corrente norte do Brasil, com o propósito de verificar se o modelo consegue capturar em uma escala temporal média esses dois processos de mesoescala.

Com os vetores médios de EA_{CCNE} e EA_{FV} , realizou-se uma análise de tendência na série temporal, para isso ajustou-se uma reta na série temporal, e se testou a inclinação dessa reta com o teste estatístico F considerando a significância de 5%. Esse teste consiste em testar a significância do coeficiente angular da reta (β_1), considerando as hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_A) em (1).

$$\begin{cases} H_0: \beta_1 = 0 \\ H_A: \beta_1 \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Pra analisar as duas séries temporais em diferentes escalas de frequência e de tempo, utilizou-se a técnica de ondeleta utilizando a função de Morlet, de acordo com [14]. Foi analisada também a variância média das séries temporais em determinada faixa de tempo escolhida com base no resultado nos sinais estatisticamente significantes identificados no diagrama de ondeleta. Essa análise é feita com base na equação (2) (descrita por [14]), de onde se obtém a modulação de uma frequência por outra dentro da mesma série de tempo.

$$\bar{W}_n^2 = \frac{\delta_j \delta t}{C_\delta} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|W_n(s_j)|^2}{s_j} \quad (2)$$

Onde W são as flutuações de potencia de uma determinada frequência na série de tempo, podendo ser interpretada como a variância do sinal em uma faixa temporal específica (banda) ao longo do tempo. O fator C_δ obtem-se da reconstrução da função pela transformada de ondeleta, usando a ondeleta-mãe de Morlet (veja a tabela 2 do artigo [14]). O termo s indica a faixa de tempo escolhida W é a potência média da escala obtida como a soma ponderada do espectro de potência da ondeleta sobre as escalas temporais entre s_j e s_{j+1} . Os deltas representam a variação do tempo (t) com a faixa de tempo escolhida (j).

3. RESULTADOS

3.1. Avaliação dos processos sazonais capturados pelo Modelo de Salinidade e Análises das séries temporais

Os compostos sazonais mostram que de Janeiro a Maio a pluma possui uma posição média no sentido noroeste, acompanhando a linha de costa sul americana localiza próximo a costa (Figura 1a). Entre Junho e Setembro, o modelo captura a retroflexão para leste da corrente norte do Brasil entre 9°N e 10°N e mostra a maior dispersão da pluma, principalmente na região de formação dos vórtices (Figura 1b). Assim definiu-se EA_{CCNE} e EA_{FV} (polígonos pretos na Figura 1b).

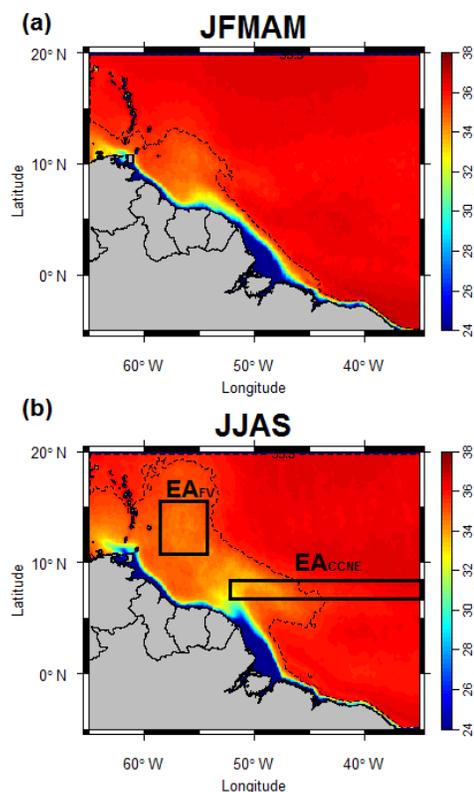


Figura 1. Mapas de SSM dos compostos dos meses de (a) Janeiro, Fevereiro, Março, Abril Maio (JFMAM) e (b) Junho, Julho, Agosto e Setembro (JJAS). As linhas tracejadas em (a) e (b) indicam o limite da pluma do rio Amazonas ($SSM < 35,5$).

Os retângulos indicam onde foram extraídas as séries temporais de SSM para EA_{FV} e EA_{CCNE} . Note na escala de cor que a SSM é adimensional

3.2. Análise das Séries temporais EA_{FV} e EA_{CCNE}

A análise de tendência das séries temporais de SSM tanto de EA_{FV} quanto de EA_{CCNE} (linhas vermelhas nas Figuras 2a e 2b, respectivamente) apresentam tendência negativa significativa ao longo dos 15 anos ($p < 0,05$).

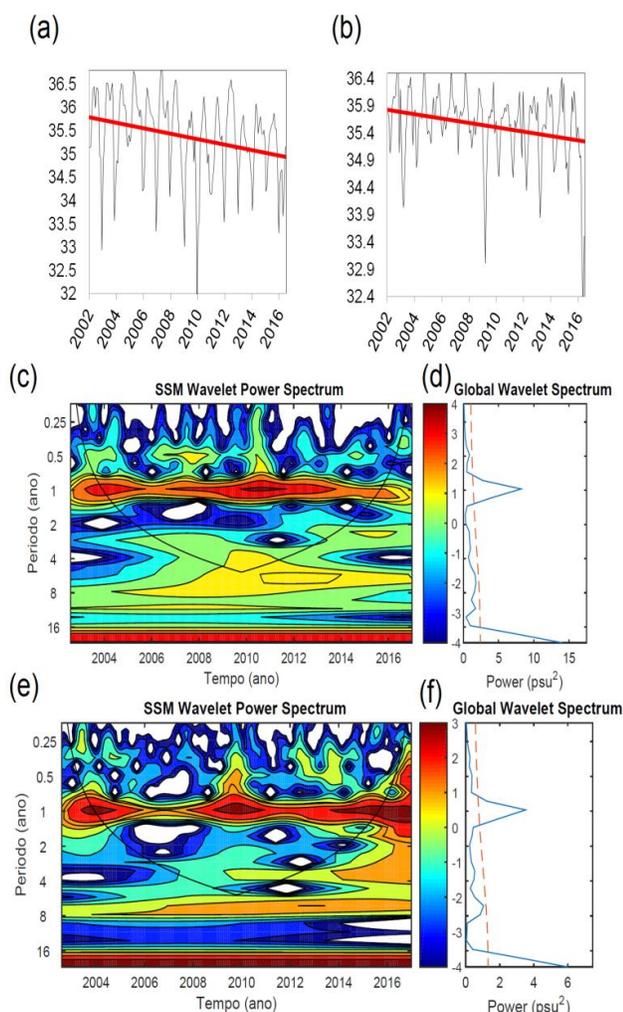


Figura 2. Séries temporais de SSM das áreas (a) EA_{FV} e (b) EA_{CCNE} com suas tendências ajustadas (linhas vermelhas). (c) Diagrama de ondoleta para (c) EA_{FV} com o espectro global (d) e Diagrama de ondoleta para (e) EA_{CCNE} juntamente com o seu (f) espectro global. As linhas tracejadas vermelhas representam o nível de confiança de 95% assumindo os respectivos ruídos vermelhos.

Os diagramas de ondoleta de EA_{FV} (Figura 2c) e EA_{CCNE} (Figura 2e) apresentam apenas um pico significativo acima do nível de confiança de 95% para os espectros globais das ondoletas dentro do cone de influência (Figura 2d-f). Esses picos estão relacionados a frequência anual em ambas as séries. Note que para as duas áreas os diagramas de ondoletas apresentam espectros de potências mais fortes no início (2002-2005) e no meio da série (2008-2011).

Nos dois diagramas, percebe-se que a maior concentração de energia está entre a banda de 8–16 meses. Com base nisso usou-se esses valores de escala de tempo na equação 2 para analisar a variância desse sinal ao longo do tempo (Figura 3). Percebendo-se que os maiores valores de variância encontram-se nos anos de 2004 e 2011 para EA_{FV} e 2004 e 2010 para EA_{CCNE} . A SSM de EA_{FV} e EA_{CCNE} apresentam comportamentos similares entre os anos de 2002 e 2012, com um sinal cíclico de tendências de períodos de maior variabilidade seguido por outros de menor. Após 2012 EA_{FV} apresenta tendência de redução na variabilidade enquanto EA_{CCNE} apresenta um aumento, atingindo o seu máximo no ano de 2016, sugerindo uma intensificação nesse sinal anual. No entanto, percebe-se que ambas as regiões apresentam tendência de redução nos valores de SSM (Figura 2 a b), só que os resultados apontam que a partir de 2012 essa tendência se desenvolve de maneira estável em EA_{FV} e comportamento instável em EA_{CCNE} .

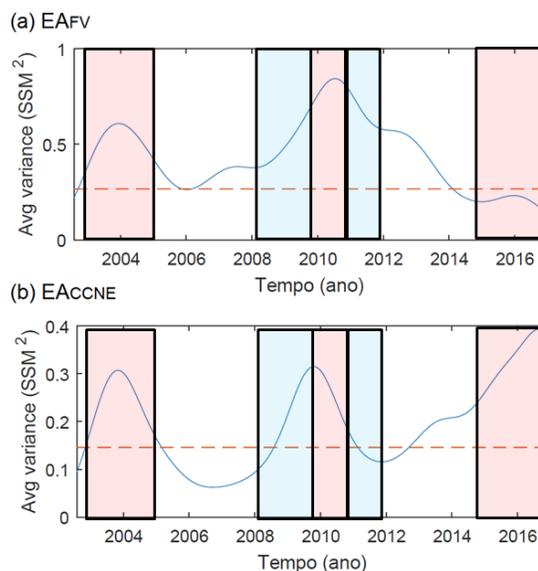


Figura 3. Evolução temporal da variância média da SSM na faixa entre 8-16 meses para EA_{FV} (a) e EA_{CCNE} (b). As linhas tracejadas vermelhas representam o nível de confiança de 95% as quais são geradas através de uma comparação com um ruído de fundo (ruídos vermelhos (não mostrados)). São apresentadas anomalias positivas (polígonos vermelhos) e negativas (polígonos azuis) do Multivariate El Niño Index (MEI)

4. DISCUSSÃO

Em ambas as regiões a SSM apresenta tendência de diminuição, sugerindo que isso pode estar associado a intensificação do ciclo hidrológico da Bacia Amazônica (Figura 2 a e b). As tendências de aumento da temperatura do mar provocam a saturação do vapor de água atmosférico sobre o Atlântico Tropical oeste, o qual é transportado pelos ventos alísios para dentro da bacia Amazônica [1,2]. Provocando tendências de aumento na precipitação na porção central e oeste da bacia durante o período chuvoso (entre Dezembro a Maio), juntamente com um aumento nas amplitudes das vazões entre os anos 1990-2010 [2]. Sugere-se, portanto, ação desse fenômeno sobre a estação chuvosa tem uma contribuição maior sobre a SSM do que sobre a estação seca. Isso justifica-se pelo fato de que se ambos tivessem impactos de mesma magnitude a SSM tenderia a responder com aumento da amplitude do sinal e não é o que se percebe.

Além disso, o aumento de água doce para o oceano, irá ocasionar a formação de uma camada barreira mais espessa. Essa camada tende a armazenar mais calor e reduzir as misturas verticais, provocando um aumento da TSM [15]. Artigos mostram que existe uma relação entre o aumento de TSM e a formação de furacões [15]. Possivelmente essa alteração do ciclo hidrológico pode intensificar os furacões.

[9,10] mostram que a pluma do rio Amazonas afeta o clima de outras regiões, de modo que as anomalias positivas de TSM na pluma do rio Amazonas influenciam o clima de verão no oeste do Atlântico Norte, Mar do Caribe, Golfo do México e América Central. Como a pluma é limitada pela SSM, sugere-se que esse processo também pode afetar o clima dessas regiões. Outro impacto dessa redução da SSM via aumento de vazão do rio Amazonas é uma modificação na circulação oceânica, como constatado em experimentos de simulações numéricas por [8] considerando cenários com e sem a influência do rio Amazonas. Por fim, os três picos de variância percebidos na Figura 3 (2002-2005/ 2008-2011/ 2015-2016) podem estar relacionados ao El Niño Oscilação sul, que altera os padrões de precipitação da bacia Amazônica e consequentemente aumentando a variância da SSM no oceano.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, identificaram-se tendências negativas significantes na SSM nos dois caminhos de exportação de água na porção oeste do Atlântico Tropical Norte (EA_{FV} e EA_{CCNE}) entre Julho de 2002 e Dezembro de 2016 (Figura 2). Sugerindo uma possível relação com as tendências positivas de precipitação na porção central e oeste da bacia durante a estação chuvosa identificadas em [1].

Os aumentos das variâncias nos anos entre 2002-2005, 2008-2011, 2015-2016 podem estar relacionados ao ENOS. Pelo fato de alterar os padrões de precipitação na bacia do

rio Amazonas, o qual é consequentemente propagado via pluma do rio Amazonas até EA_{FV} e EA_{CCNE} .

6. REFERÊNCIAS

- [1] GLOOR, M. et al. Recent amazon climate as background for possible ongoing and future changes of amazon humid forests. *Global Biogeochemical Cycles*, Wiley Online Library, v. 29, n. 9, p. 1384–1399, 2015.
- [2] GLOOR, M. et al. Intensification of the amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 40, n. 9, p. 1729–1733, 2013.
- [3] ESPINOZA, J. C. et al. The extreme 2014 flood in south western amazon basin: the role of tropical-subtropical south atlantic sst gradient. *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, v. 9, n. 12, p. 124007, 2014.
- [4] MARENGO, J. A. et al. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the amazon region. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 38, n. 12, 2011.
- [5] ESPINOZA, J. C. et al. Spatio-temporal rainfall variability in the amazon basin countries (brazil, peru, bolivia, colombia, and ecuador). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 29, n. 11, p. 1574–1594, 2009.
- [6] DAI, A.; TRENBERTH, K. E. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations. *Journal of hydrometeorology*, v. 3, n. 6, p. 660–687, 2002.
- [7] FOURNIER, S. et al. Comparison of spaceborne measurements of sea surface salinity and colored detrital matter in the amazon plume. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 120, n. 5, p. 3177–3192, 2015.
- [8] COLES, V. J. et al. The pathways and properties of the amazon river plume in the tropical north atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 118, n. 12, p. 6894–6913, 2013.
- [9] JAHFER, S.; VINAYACHANDRAN, P.; NANJUNDIAH, R. S. Long-term impact of amazon river runoff on northern hemispheric climate. *Scientific reports*, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 10989, 2017.
- [10] VIZY, E. K.; COOK, K. H. Influence of the amazon/Orinoco plume on the summertime atlantic climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 115, n. D21, 2010.
- [11] DU, Y. et al. Decadal trends of the upper ocean salinity in the tropical indo-pacific since mid-1990s. *Scientific reports*, Nature Publishing Group, v. 5, p. 16050, 2015.
- [12] GOUVEIA, N. d. A. et al. Relação entre salinidade e produção primária marinha na pluma do rio amazonas. In: GHERARDI, D. F. M.; ARAGÃO, L. E. O. e. C. d. (Ed.). Anais... São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.p. 3640–3647. ISBN 978-85-17-00088-1.
- [13] GOUVEIA, N. A. et al. The salinity structure of the amazon river plume drives spatiotemporal variation of oceanic primary productivity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, in press, 2018
- [14] TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, American Meteorological Society, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1998.
- [15] GRODSKY, S. A. et al. Haline hurricane wake in the amazon/orinoco plume: AQUARIUS/SACD and SMOS observations. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 39, n. 20, oct 2012.