

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Fundação Instituída nos termos da Lei nº 5.152, de 21/10/1966 – São Luís - Maranhão.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

WALTERLY SARAIVA BARROS

**VARIABILIDADE DA PLUMA DO RIO AMAZONAS NA COSTA
DO MARANHÃO, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA**

SÃO LUÍS – MA

2021

PPGOceano



WALTERLY SARAIVA BARROS

VARIABILIDADE DA PLUMA DO RIO AMAZONAS NA COSTA DO MARANHÃO, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Costeiros

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Jose da Silva Dias

SÃO LUÍS – MA

2021



Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Saraiva Barros, Walterly.

VARIABILIDADE DA PLUMA DO RIO AMAZONAS NA COSTA DO
MARANHÃO, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA / Walterly Saraiva
Barros. - 2021.

34 p.

Orientador(a): Francisco Jose da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Oceanografia/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São
Luís, 2021.

1. Adg. 2. MODIS. 3. Oceanografia por satélites. 4.
Salinidade sintética. 5. SeaWiFS. I. da Silva Dias,
Francisco Jose. II. Título.



Walterly Saraiva Barros

**VARIABILIDADE DA PLUMA DO RIO AMAZONAS NA COSTA
DO MARANHÃO, MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão
como requisito para obtenção do título
de Mestre em Oceanografia.

Aprovada em ____/____/____.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias (ICMar/UFMA)

Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Júnior (ICMar/UFMA)

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra (Deoli/UFMA)

São Luís – MA

2021



Esqueça.

Sorria.

Deixe ir.



AGRADECIMENTOS

Agradeço aos “migs” Rulio Jordan, Luys Sérgio Cabral, Willmara Guimarães e James Diniz por sempre aguentarem me ouvir, apesar dos pesares. Suas palavras de incentivo foram fundamentais.

Agradecimento à Erlle Dairlane pelos altos papos sobre livros, filmes, séries e também pelos *happy hours*. Admiro toda sua devoção ao grupo de pesquisa.

Agradecimentos ao grupo de pesquisa do laboratório multiusuário Monitoramento Oceânico por Satélite (MoceanS) e aos colegas que lá fiz: Raíssa Teixeira, Philipe Riskalla, Vitor Galazzo, Andrea de Lima e à Aline de Matos Valério por toda ajuda e parceria, sem vocês nada disto seria possível..

Agradecimento à Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE pelo recebimento e suporte recebido, à Agência Espacial Americana pelos dados e principalmente e ao Dr. Milton Kampel pelas instruções e ensinamentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão – FAPEMA agradeço pela bolsa de Estágio Nacional e Mestrado que me foi concedida.

Agradecimentos especiais aos professores do Mestrado, em especial ao Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Jr e ao orientador Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias pela paciência em resolver a parte burocrática que cabe à orientação e por concederem espaço no Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI).

E por último, mas não menos importante, agradeço imensamente aos meus colegas de turma do mestrado em Oceanografia, em especial à Juliana Coelho e Débora Privado, só nós sabemos dos perrengues que passamos e das crises que tivemos no decorrer desses anos. Eu admiro muito a força de vontade de todos!

Obrigado à Universidade Federal do Maranhão e ao PPG-Oceano pela oportunidade.



SUMÁRIO

	Nº de página
RESUMO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. JUSTIFICATIVA	8
3. HIPÓTESE	9
4. OBJETIVOS	9
4.1 Geral	9
4.2 Específicos	9
5. ÁREA DE ESTUDO	9
6. MATERIAL E MÉTODOS	11
6.1 Dados de sensores remotos em plataformas orbitais	11
6.2 Salinidade Sintética	12
6.3 EOFs	13
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
7.1 Variabilidade espaço-temporal da pluma pela Margem Equatorial Brasileira pelo MODIS-Aqua	14
7.2 Sazonalidade da dispersão da pluma na costa do Maranhão	16
7.3 Retroflexão da pluma	19
7.4 Análise da EOFs e Componentes Principais (PCs)	21
7.6 Estimativa da Pluma a partir de dados de Salinidade Sintética	23
8. CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	31

LISTA DE FIGURAS



Figura 1: Retângulo envolvente de parte da Margem Equatorial Brasileira, compreendida entre Cabo Orange (AP) e Trairi (CE), incluindo a costa dos estados Pará, Maranhão, Piauí e parte do Cará, área de interesse do estudo, com especial ênfase à foz do Rio Amazonas e à costa do Maranhão.....	10
Figura 2: Esquematização das etapas sequenciais para a obtenção de salinidade sintética para a série de dados, onde algoritmo só foi possível ser aplicado ao produto adg ₄₄₃ do SeaWiFS.	13
Figura 3: Composição para o mês de junho de 2010, como exemplo do comportamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas com distribuição para norte de sua foz, sentido noroeste, em direção ao Caribe. A região bem mais a dentro da foz aparece como sem dado.....	15
Figura 4: Composição para o mês de março de 2011, como exemplo do comportamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas com distribuição mais ao sul de sua foz, onde apresenta maiores valores absorção de substância amarela e material detrítico, em direção à costa do Maranhão.	16
Figura 5: Médias mensais para a série temporal dos últimos 10 anos do comportamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas. Novembro apresenta os valores mais baixos de toda a série e começa a aumentar a partir de dezembro. Maior dispersão da pluma de maio a setembro.	17
Figura 6: Média dos meses de fevereiro a maio (2009 a 2019). Em fevereiro, a pluma começa a se distribuir mais para a porção leste da Margem Equatorial Brasileira, alcançando a costa do Maranhão, onde em abril ocorre um maior “confinamento” da pluma em longitudes mais ao leste e a partir de maio a dispersão começa a seguir para sentido noroeste.	18
Figura 7: Nos meses de julho a setembro, a pluma do Rio Amazonas acompanha a retroflexão da Corrente Norte do Brasil em sua Contracorrente Norte Equatorial. Detalhes do fenômeno de retroflexão da pluma para meses de julho de 2007, agosto de 2010 e setembro de 2011. Possível observar a formação de anéis.	20



- Figura 8: Função Ortogonal Empírica de Correlação 1 onde apresenta coeficientes de correlação positivos e negativos. Maiores correlações positivas próximos à costa da Margem Equatorial Brasileira, em porções mais ao leste da foz do Rio Amazonas. Também apresenta correlações positivas na porção de maiores latitudes Norte. Uma zona de alta correlação negativa está presente na região oeste da foz do rio e na porção do Atlântico Equatorial. 21
- Figura 9: Função Ortogonal Empírica de Correlação 2 que apresenta alta correlação negativa junto à costa, ao leste da foz do Rio Amazonas. 22
- Figura 10: Espectro da PC1 (em azul) e PC2 (em vermelho) para a série temporal dos últimos 10 anos, onde picos negativos coincidem com eventos climáticos como La Niña (2012) e El Niño (2010 e 2015). Maiores picos em decorrência de eventos climáticos extraordinários que se desenvolveram entre 2014 e 2017. 23
- Figura 11: Uma seção transversal da pluma idealizada, onde as regiões dinâmicas são separadas pelos processos de mistura vertical dominantes e são definidas no espaço de salinidade, em particular, pela faixa de valores de salinidade da superfície (traduzido e adaptado de Hetland, Hsu, 2013). 24
- Figura 12: Média da dispersão da pluma do Rio Amazonas para os meses de janeiro a junho ao longo da Margem Equatorial Brasileira, onde alcançam o litoral ocidental do Maranhão entre os meses de fevereiro a abril com menores valores de salinidade. 25
- Figura 13: Dispersão da pluma do Rio Amazonas para os meses de julho a dezembro ao longo da Margem Equatorial Brasileira, onde observa-se a retroflexão da Corrente Norte do Brasil em sua Contracorrente Norte Equatorial dos meses de julho a outubro. 26
- Figura 14: Recorte da costa do Maranhão onde é possível observar a distribuição da pluma com baixa salinidade, onde ocorre um crescimento da área de dispersão, em frente à região das Reentrâncias Maranhenses. 27
- Figura 15: No mês de abril é possível notar um aumento gradativo da dispersão pela costa do Maranhão, seguindo em maio, onde começa a diminuir e seguir em direção à costa amazônica, seguindo em direção ao noroeste. A partir de julho já é possível notar parte da retroflexão da pluma no Hemisfério Norte, intensificando nos meses de agosto e setembro. 28



Figura 16: No detalhe é possível notar que a retroflexão da pluma se desintensifica. Novembro e dezembro mostra uma baixa atividade de pluma fluvial na costa do Maranhão. 29



RESUMO

As plumas fluviais são importantes meios de transporte de sedimentos, nutrientes e até poluentes do continente para o oceano, afetando as características morfodinâmicas e biogeoquímicas da região onde se dispersa, o que torna seu estudo de alta importância. A pluma do rio Amazonas apresenta grande variabilidade devido à forçante oceanográfica ao longo do ano. Para detectar essa variabilidade, foram utilizados os produtos adg_{443} do MODIS-Aqua e salinidade sintética obtida do adg_{443} do SeaWiFS, onde foi aplicado algoritmo específico onde foi considerado pluma valores de salinidade menores ou iguais a 30 g.kg^{-1} . Tais dados foram então úteis para composição de séries temporais, seguido por EOFs e análise de componentes principais. Para aplicar a EOF, a sazonalidade dos dados foi removida e a anomalia foi usada para a análise final. Sazonalmente, de fevereiro a maio, a pluma do rio Amazonas muda para leste, chegando à Plataforma Continental do Maranhão, e de julho a setembro, a pluma se desvia do litoral sul-americano, após a retroflexão da Corrente Norte Brasileira seguindo a Contra-Corrente Norte Equatorial. As duas EOFs calculadas e suas Componentes Principais mostraram correlações positivas e negativas em torno da foz do rio Amazonas e relações com eventos climáticos extremos de 2014 a 2017, com aumento da precipitação e consequente aumento da dispersão de penas pela Margem Equatorial Brasileira.

Palavras-chave: oceanografia por satélites, adg , salinidade sintética, MODIS, SeaWiFS.



VARIABILITY OF THE AMAZON RIVER PLUME ON THE COAST OF MARANHÃO, BRAZILIAN EQUATORIAL MARGIN

ABSTRACT

River plumes are important means of transporting sediments, nutrients and even pollutants from the continent to the ocean, affecting the morphodynamic and biogeochemical characteristics of the region where it disperses, which makes its study of high importance. The plume of the Amazon River presents great variability due to oceanographic strength throughout the year. To detect this variability, modis-aqua adg₄₄₃ and synthetic salinity products obtained from SeaWiFS adg₄₄₃ were used, where a specific algorithm was applied where salinity values lower than or equal to 30 g.kg^{-1} were considered plume. Such data were then useful for time series composition, followed by EOFs and principal component analysis. To apply the EOF, the seasonality of the data was removed and the anomaly was used for the final analysis. Seasonally, from February to May, the plume of the Amazon River changes to the east, reaching the Continental Shelf of Maranhão, and from July to September, the plume strays from the South American coast, after the retroflexion of the Brazilian northern current. following the equatorial north countercurrent. The two calculated EOFs and their Main Components show positive and negative correlations around the mouth of the Amazon River and relationships with extreme weather events from 2014 to 2017, with increased precipitation and consequent increase in feather dispersion by the Brazilian Equatorial Margin.

Keywords: satellite oceanography, adg, synthetic salinity, MODIS, SeaWiFS..



1. INTRODUÇÃO

Em pesquisa realizada utilizando *Regional Ocean Modeling System* (ROMS), Fagundes (2016), integrado ao Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), obteve resultados de modelos onde sugeriam a ocorrência de uma pluma fluvial de baixa salinidade proveniente do Rio Amazonas sobre a Plataforma Continental do Maranhão, na Margem Equatorial Brasileira.

Plumas fluviais são importantes meios para o transporte de sedimento, nutrientes e até mesmo poluentes do continente para o oceano e sua entrada estabelece gradiente de densidade entre as massas de água doce dos rios e salgada do mar, fornecendo assim importante força motriz para a circulação costeira, tanto nos estuários quanto na plataforma continental (GONG et al., 2019), afetando as características morfodinâmicas e biogeoquímicas da área onde atua, o que torna seu estudo de alta importância.

Mendes et al. (2014) descreveram que não é fácil generalizar a origem e o comportamento de dispersão de plumas estuarinas, visto que os mesmos apresentam particularidades em cada sistema costeiro ou estuarino, porém são facilmente reconhecidas através de certos padrões comuns característicos e, portanto, são possíveis de serem detectadas e visualizadas usando dados de sensores remotos. Para esse fim, geralmente são utilizados dados de cor do oceano, clorofila, material particulado em suspensão, matéria orgânica dissolvida colorida, temperatura, salinidade, além de outros parâmetros oceanográficos (ROBINSON, 2010).

Localizado na Margem Equatorial Brasileira, o Rio Amazonas apresenta grande volume de descarga fluvial. Esta é a principal fonte de água doce do mundo, com uma vazão média de aproximadamente $222.800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, representando o aporte de quase 20% da vazão global de água doce na Plataforma Continental Equatorial do Oceano Atlântico (GOULDING et al., 2003; BARTHEM et al. 2004). Assim, conseqüentemente, aporta uma enorme quantidade de sedimento para o oceano (MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010). Com isso, sua pluma apresenta diferentes padrões de dispersão durante o ano, com baixa salinidade, grandes quantidades de nutrientes e material em suspensão e dissolvidos (HU et al., 2004; MOLLERI, 2010).



A pluma do Rio Amazonas flui geralmente para noroeste, em direção ao Caribe, sendo transportada no oceano pela Corrente Norte do Brasil, respondendo à variabilidade de ventos alísios NE e SE, bem como correntes de marés (MÜLLER-KRAGER et al., 1988; SALISBURY et al., 2011), entretanto, novos estudos têm demonstrado que seu comportamento pode variar no tempo e no espaço (IBÁNHEZ et al., 2016; LEFÈVRE et al., 2017).

Grandes plumas estuarinas, como a do Rio Amazonas, são locais de intensa complexidade ecológica e transformação biogeoquímica onde desempenham um papel importante nos processos físicos oceânicos (HICKEY et al., 2010; MCKEE et al., 2004), atuando também no ciclo do carbono global, muitas vezes funcionando como sumidouro (COOLEY et al., 2007; HOPKINS et al., 2013; SUBRAMANIAM et al., 2008) ou como fonte (TAKAHASHI et al., 2009; LANDSCHÜTZER et al., 2014).

Diante das características da dinâmica da pluma do rio Amazonas que se apresenta variável devido a ação de correntes e ventos ao longo do ano, provocando o seu transporte para o norte no verão austral e para leste no outono austral (MÜLLER-KRAGER et al., 1988; LENTZ, 1995; FRATANTONI, GLICKSON, 2002; COLES et al., 2013; FOLTZ et al., 2015), surgiu então a oportunidade de analisar eventos de dispersão da pluma do rio Amazonas para a costa do Maranhão, que ainda são pouco conhecidos e documentados na literatura, se mostrando como um fenômeno altamente pertinente ao monitoramento de sua dinâmica e comportamento.

O presente trabalho teve como objetivos analisar e caracterizar a variabilidade espaço-temporal da dispersão da pluma, além de descrever em escala sazonal a sua dispersão para a Plataforma Continental do Maranhão.

2. JUSTIFICATIVA

A pluma desempenha forte influência no aporte de nutrientes e na dinâmica de microorganismos que atuam no aumento da atividade biológica e também no sequestro de carbono (ARAUJO et al., 2017). Desse modo, o aporte de nutrientes pelo Rio Amazonas suporta a produção primária no oceano, na parte distal da pluma, onde a água oceânica tropical tende a ser desprovida de nutrientes (ARAUJO et al., 2017; YEUNG et al., 2012).

Devido à influência que exerce nos processos de aporte de nutrientes, contribuição para o aumento da produção primária e sequestro de carbono, monitorar o comportamento da pluma do Rio Amazonas e sua influência para a costa do Maranhão é relevante tanto



para a compreensão quanto para a modelagem de sistemas de provisão desses processos. Entretanto, por se tratar de um fenômeno extenso e variável, esse monitoramento se torna inviável de ser realizado apenas por coletas em campo, sem que haja a cobertura espaço-temporal necessária. Nesse caso, o uso de sensoriamento remoto possibilita um acompanhamento sinóptico da pluma, ideal para tal atividade.

3. HIPÓTESE

Durante alguns meses do ano, a Pluma do Rio Amazonas sofre alguns desvios em sua dispersão e alcança posições mais ao leste da Margem Equatorial Brasileira, contornando as ações oceanográficas da Corrente Norte do Brasil e chegando à Plataforma Continental do Maranhão.

4. OBJETIVOS

4.1 Geral

Analisar a variabilidade espaço-temporal da pluma do Rio Amazonas com ênfase nos eventos de dispersão para a Plataforma Continental do Maranhão utilizando dados de sensores remotos.

4.2 Específicos

- Avaliar a variabilidade espaço-temporal do coeficiente de absorção pela matéria orgânica dissolvida e detritos estimado por satélite;
- Analisar a variabilidade espaço-temporal da dispersão da pluma do Rio Amazonas utilizando salinidade sintética da superfície do mar;
- Caracterizar eventos de dispersão da pluma para a Plataforma Continental do Maranhão.

5. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região da Margem Equatorial Brasileira (Figura 1), na porção compreendida entre as coordenadas 9.34 N, -50.98 O e -4.02 S, -35.51 O, definida de acordo com o interesse para a pesquisa.



Figura 1: Retângulo envolvente de parte da Margem Equatorial Brasileira, compreendida entre Cabo Orange (AP) e Trairi (CE), incluindo a costa dos estados Pará, Maranhão, Piauí e parte do Cará, área de interesse do estudo, com especial ênfase à foz do Rio Amazonas e à costa do Maranhão.

Atuando sobre a Margem Equatorial Brasileira, está a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuantes nos trópicos (FISH et al, 1996) e que, ao longo do ano, alcança posição mais ao norte durante os meses de junho a setembro, e posição mais ao sul, durante o mês de abril (MOLLERI et al, 2010).

Os ventos dominantes nesta região são de sudeste (SE) e nordeste (NE) e suas variações estão diretamente relacionadas com o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (BAPTISTA, 2003; LENTZ, 1995).

Entre os meses de novembro a março está compreendido o período de chuvas ou de forte convecção na região Amazônica, sendo que o período de seca, com pequena atividade convectiva, ocorre entre os meses de maio e setembro. Os meses de abril e outubro são caracterizados como meses de transição entre um regime e outro (FISCH et al., 1996).



Em termos oceanográficos, a circulação da região adjacente à Plataforma Continental próxima da superfície é caracterizada pela presença da Corrente Norte do Brasil (CNB) e a sua componente em superfície, a Subcorrente Norte do Brasil (SCNB), ambas são derivadas da bifurcação da Corrente Sul Equatorial e que transportam água quente do Atlântico Sul para o Noroeste ao longo da Costa Equatorial Brasileira, em direção ao Atlântico Norte. A CNB apresenta variações de direção ao longo da Costa Norte Brasileira, de acordo com padrões diversos dos ventos e da localização no trajeto da corrente (SILVA et al., 2009).

Na costa ocidental do Maranhão, incluída na zona da Amazônia Costeira, se encontram as Reentrâncias Maranhenses, região considerada a maior área contínua de manguezais do mundo. Os manguezais se dispõem de modo frequente nas margens das águas estuarinas, com extensas planícies lamosas que emergem durante as marés baixas e estão relacionados às baixas salinidades.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Dados de sensores remotos em plataformas orbitais

Para a composição de dados ópticos do comportamento da pluma do Rio Amazonas e assim gerar uma série temporal de imagens de satélite representativa para a região de estudo, foi utilizado um produto coeficiente de absorção pela matéria colorida e detritos na banda espectral de 443 nm do algoritmo quase-analítico (adg_443_qaa), doravante denominado adg₄₄₃.

Esses dados são de imagem mapeada padrão nível 3, do Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS) a bordo do satélite Aqua da NASA, com resolução espacial de 4km. Os dados de nível 3 são variáveis geofísicas derivadas que foram agregadas/projetadas em uma grade espacial bem definida durante um período de tempo bem definido (NASA, 2020), neste caso, médias mensais para um período de 10 anos, compreendido entre julho de 2009 e julho de 2019.

Além de dados do MODIS-Aqua, também foi utilizado o produto de adg₄₄₃ derivada do algoritmo semi-analítico Garver-Siegel-Maritorena do sensor SeaWiFS (adg_443_gsm) (MARITORENA et al., 2002).

Os dados do SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*) são de médias mensais com resolução espacial de 9 km, compreendida entre outubro de 1997 e dezembro de 2012.



Estes dados do produto adg_{443} do SeaWiFS foram posteriormente processados e convertidos em salinidade sintética, para representar a salinidade da superfície do mar de acordo com a metodologia proposta por Molleri et al. (2010).

Todos esses dados de sensores remotos são disponibilizados gratuitamente pelo Goddard Space Flight Center da NASA, em <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.

Além de dados de adg_{443} MODIS e SeaWiFS, também é possível utilizar outros tipos de dados para o mesmo fim.

O motivo de escolha desse grupo de dados foi pela facilidade de visualização diante das condições físico-químicas de águas costeiras (como salinidade, turbidez, material em suspensão), uma vez que o propósito seria detecção da pluma por diferença de salinidades.

Além do mais, diante de diversas tentativas de utilizar apenas MODIS, outro fator que pesou definitivamente na escolha de dados do sensor SeaWiFS foi porque já existia um algoritmo testado, validado e aplicado também à pluma do rio Amazonas.

6.2 Salinidade Sintética

Para obter dados de salinidade sintética, fez-se então o uso do produto adg_{443} do SeaWiFS, uma vez que o algoritmo desenvolvido por Molleri et al. (2010) foi devidamente validado para o sensor em questão.

A metodologia proposta por Molleri et al. (2010) para obter a salinidade sintética consiste em correlacionar linearmente os valores de salinidade *in situ* com os valores correspondentes do adg_{443} proveniente da reflectância nas cenas SeaWiFS, uma vez que existe essa correlação entre salinidade e matéria orgânica colorida (MOLLERI et al., 2010), que resultou em um algoritmo, conforme Eq. 1.

$$SSS = -126,032 (adg_{443}_{gsm}) + 37,259 \quad (1)$$

Como o algoritmo já havia sido previamente utilizado e validado, o mesmo foi então aplicado à série de dados provenientes do sensor SeaWiFS, conforme diagrama (Figura 2) para obtenção da salinidade sintética.

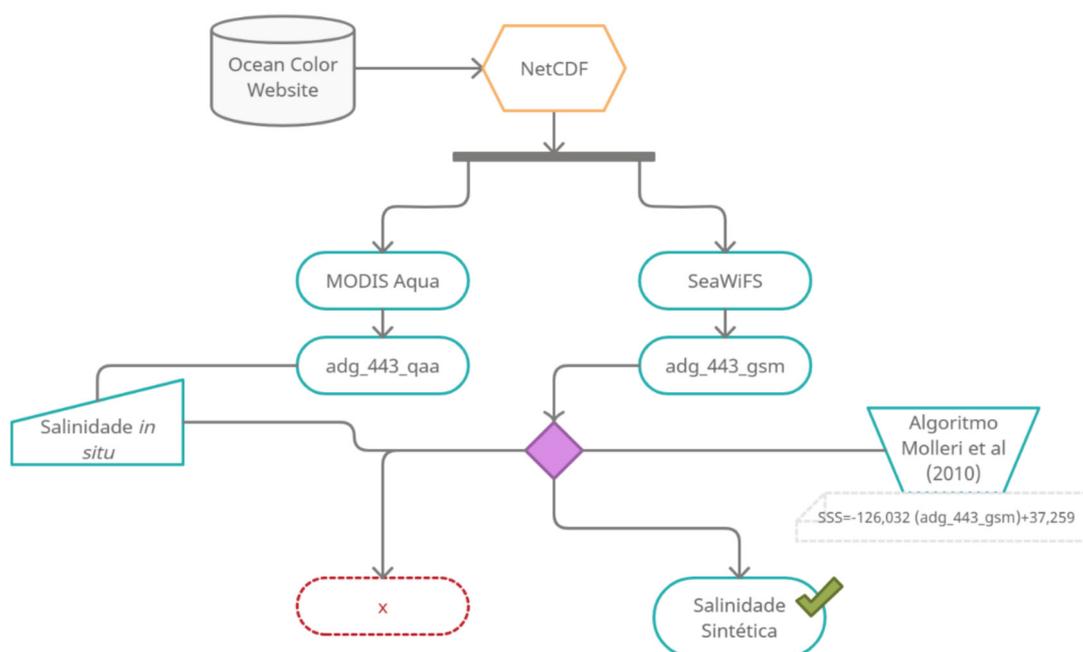


Figura 2: Esquematização das etapas sequenciais para a obtenção de salinidade sintética para a série de dados, onde algoritmo só foi possível ser aplicado ao produto adg_{443} do SeaWiFS.

A leitura digital, tratamento e processamento das imagens foi realizada em linguagem de programação Python 3.7 (2019).

6.3 EOFs

A fim de examinar a variabilidade e a assinatura da pluma do Rio Amazonas para o conjunto de dados, realizou-se análise de Função Ortogonal Empírica (EOF) de correlação, aplicada exclusivamente à série de dados do produto adg_{443} do MODIS-Aqua. Essa técnica encontra os padrões espaciais de variabilidade e sua variação de tempo, e dá uma medida da "importância" de cada padrão (HOPKINS et al., 2013). A intenção é avaliar se é um sinal suficientemente dominante, e identificar, quando possível, os condutores físicos da variabilidade, junto às componentes principais para cada uma das EOFs geradas. Em aplicações típicas, as primeiras EOFs representam uma grande parte da variação total, permitindo que o estudo de um ou dois modos forneça informações sobre a variabilidade presente no conjunto de dados. O método de análise é puramente matemático e não depende de nenhuma propriedade física da quantidade sendo analisada (DAWSON, 2016).

A biblioteca eofs v1.4.0 foi utilizada para aplicar EOF em interface Python que oferece alto nível para calcular funções ortogonais empíricas (EOFs) e quantidades



relacionadas, com foco na correção e facilidade de uso. A biblioteca está implementada de forma hierárquica modular, permitindo cálculos usando matrizes simples ou a inclusão de metadados. O software fornece um pacote conveniente para usuários que desejam executar análises de EOF em Python e integra-se a bibliotecas populares da ciência atmosférica e climática (DAWSON, 2016).

Como procedimento, foram mascarados valores indefinidos (NaN) de adg_{443} , onde foram substituídos por valor zero e também foi removida a sazonalidade da série de dados, fazendo a diferença entre o valor real e a média da série de dados para que pudesse ser aplicado à biblioteca eofs. As anomalias do adg_{443} foram utilizadas então para calcular a função ortogonal empírica de correlação e extrair o espectro de suas componentes principais (PCs).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Variabilidade espaço-temporal da pluma pela Margem Equatorial Brasileira pelo MODIS-Aqua

A série temporal de 120 meses da pluma identificada através do produto do adg_{443} , compreendida para a área do estudo em questão apresentou resultados interessantes quanto à sua dispersão, evidenciando variabilidade no espaço e no tempo ao longo de uma grande parcela da Margem Equatorial Brasileira, tanto com tendências de fluxo para noroeste, em direção ao Caribe quanto em direção leste/sudeste, pela Plataforma Continental do Maranhão durante alguns períodos do ano.

Como consequência de eventos de crescente, cheia e seca do rio e consequentemente sua vazão, advecção por correntes, precipitação e influência de ventos sazonais (GRODSKY et al., 2014; COLES et al., 2013; HU et al., 2004; VALERIO, 2018), a pluma do Rio Amazonas de apresenta comportamentos que são reflexos a esses eventos, com diversos padrões na sua extensão pelo Oceano Atlântico Equatorial. Para estimativa da pluma por meio do produto adg_{443} , foi considerado pluma somente os valores iguais ou superiores as 0,15 de absorção a 443nm m^{-1} .

As Figuras 3 e 4 demonstram alguns dos comportamentos da pluma do Rio Amazonas, ao longo da série temporal dos últimos 10 anos. Em determinados meses, a pluma flui para latitudes mais ao norte, seguindo as forçantes da CNB e em outros meses a mesma fica “confinada” mais a leste, junto a plataforma continental, em latitudes mais ao sul (MÜLLER-KRAGER et al., 1988; SALISBURY et al., 2011).

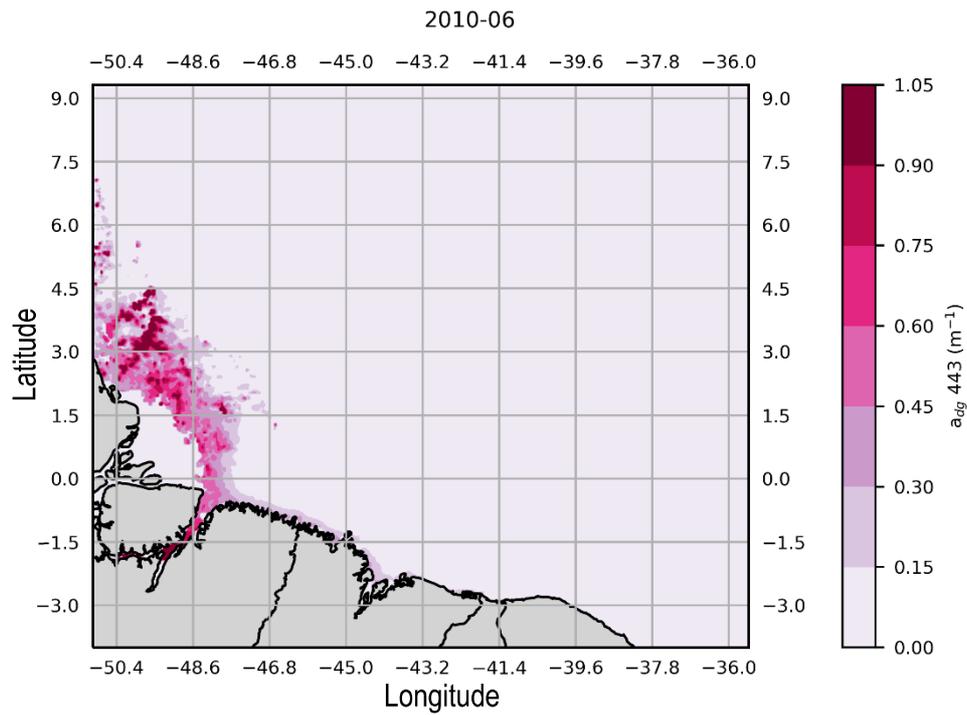


Figura 3: Composição para o mês de junho de 2010, como exemplo do comportamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas com distribuição para norte de sua foz, sentido noroeste, em direção ao Caribe. A região bem mais a dentro da foz aparece como sem dado.

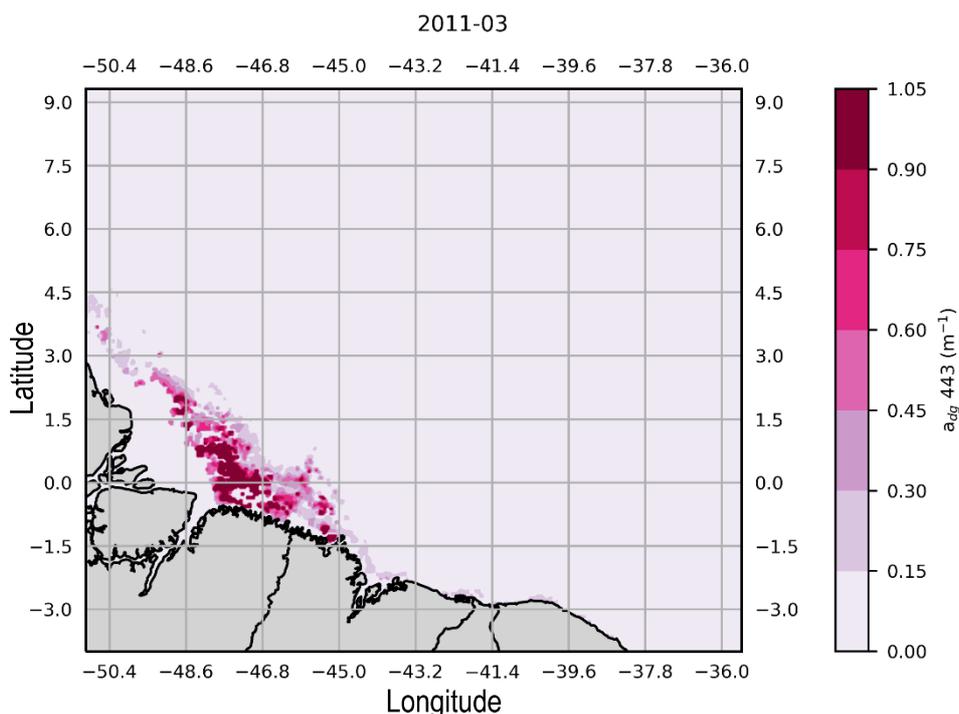


Figura 4: Composição para o mês de março de 2011, como exemplo do comportamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas com distribuição mais ao sul de sua foz, onde apresenta maiores valores absorção de substância amarela e material detrítico, em direção à costa do Maranhão.

7.2 Sazonalidade da dispersão da pluma na costa do Maranhão

De acordo com as médias mensais para a série temporal, algumas feições sazonais são dispostas para a região de atuação da pluma do Rio Amazonas no Oceano Atlântico Equatorial. As médias de cada mês, dispostas sequencialmente na Figura 5, apresentam características da dispersão em resposta aos padrões de descargas anuais do rio.

De acordo com estudos anteriores nessa região, o aumento do nível de água doce do Rio Amazonas começa pelo mês de dezembro. Em junho, o nível da água começa a diminuir, apresentando o mínimo de vazão no mês de novembro (MERTES, MAGADZIRE, 2008; MARTINES et al., 2003).

Sawakuchi et al., 2017 e Ward et al., 2015 em estudos anteriores definiram os períodos de sazonalidade da vazão do rio como “crescente” (janeiro, fevereiro, março), “cheia” (abril, maio, junho), “vazante” (julho, agosto, setembro) e “seca” (outubro, novembro, dezembro).

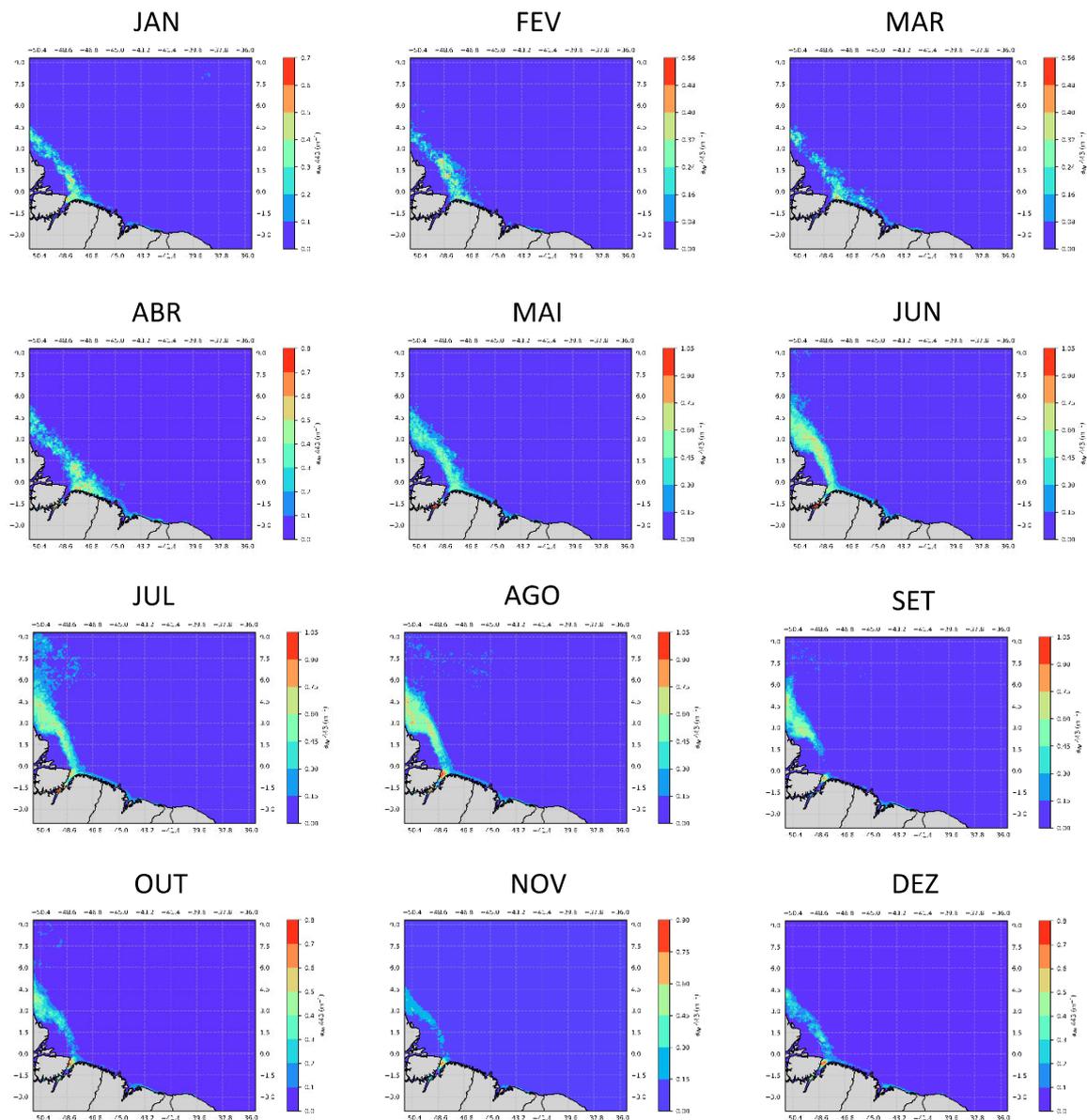


Figura 5: Médias mensais para a série temporal dos últimos 10 anos do comportamento da dispersão da pluma do Rio Amazonas. Novembro apresenta os valores mais baixos de toda a série e começa a aumentar a partir de dezembro. Maior dispersão da pluma de

Levando em consideração a sazonalidade da vazão do rio Amazonas, os três primeiros meses do ano apresentam um aumento da extensão de sua pluma pela Margem Equatorial Brasileira. Dos meses de fevereiro a maio o aumento é intensificado em decorrência dos regimes de chuvas na região amazônica, relacionados com a Zona de Convergência Intertropical que apresenta grande variação sazonal sobre o Oceano Atlântico, deslocando-se de 2°S a 5°S nos meses de março e abril, provocando o aumento do aporte de água fluvial na costa (MELO et al., 2009).

Tais regimes sazonais de chuvas provocam o aumento do nível da vazão do rio na “crescente” e “cheia” (Figura 6) e assim acabam aumentando o aporte de sedimento e outros materiais como matéria orgânica colorida dissolvida (CDOM), que representa uma importante fonte de carbono orgânico de origem terrestre para o Oceano Atlântico tropical (MEDEIROS et al., 2015). Os principais processos que influenciam a quantidade de matéria orgânica dissolvida (DOM) no sistema de plumas do rio Amazonas são o rápido consumo de DOM altamente instável próximo à foz do rio, a exportação da fração não degradada para as águas oceânicas, a proliferação de fitoplâncton e degradação fotoquímica de DOM (MEDEIROS et al., 2015). Todos esses processos acabam influenciando na dispersão da pluma observada pelo produto de absorção de substância amarela e material detritico do sensor MODIS-Aqua.

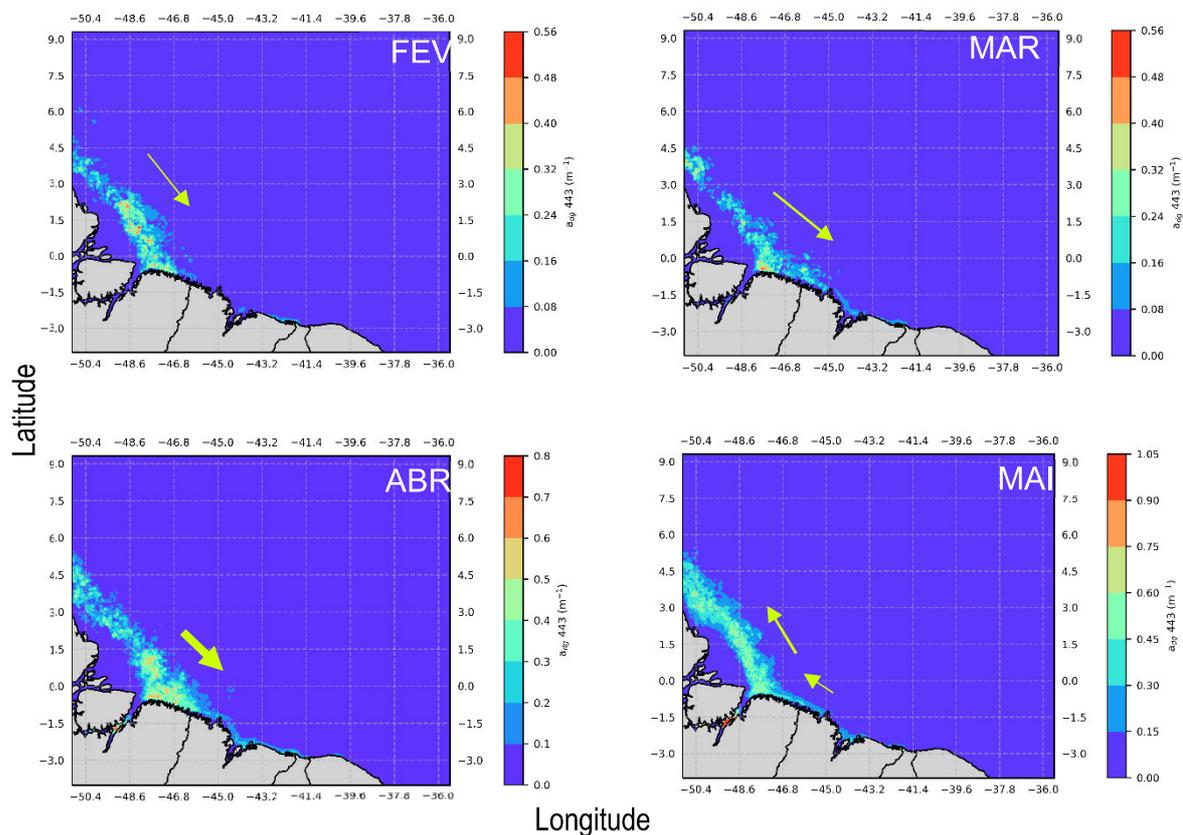


Figura 6: Média dos meses de fevereiro a maio (2009 a 2019). Em fevereiro, a pluma começa a se distribuir mais para a porção leste da Margem Equatorial Brasileira, alcançando a costa do Maranhão, onde em abril ocorre um maior “confinamento” da pluma em longitudes mais ao leste e a partir de maio a dispersão começa a seguir para sentido noroeste.



Nos meses de março e abril, a pluma encontra-se mais limitada a leste da foz do Rio Amazonas, se estendendo pela costa ocidental do Maranhão. Com posicionamento da ZCIT mais ao sul, ventos alísios de nordeste são mais atuantes nessa região, o que pode ocasionar essa distribuição para longitudes mais ao leste, pois no hemisfério sul, o transporte de massas na camada de Ekman se dá perpendicularmente à direção do vento para a esquerda.

7.3 Retroflexão da pluma

Em contraste aos meses de março e abril, cuja pluma se apresenta mais ao leste da foz, durante os meses de “vazante” do rio (julho, agosto, setembro), pôde ser observado que a pluma do Rio Amazonas se separa bruscamente da costa Sul-Americana (FRATANTONI, RICHARDSON, 2006) e flui seguindo a retroflexão (Figura 7) da Corrente Norte do Brasil (CNB) em torno de 5° N a 10° N, onde é transportada para o leste na Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (HU et al., 2004).

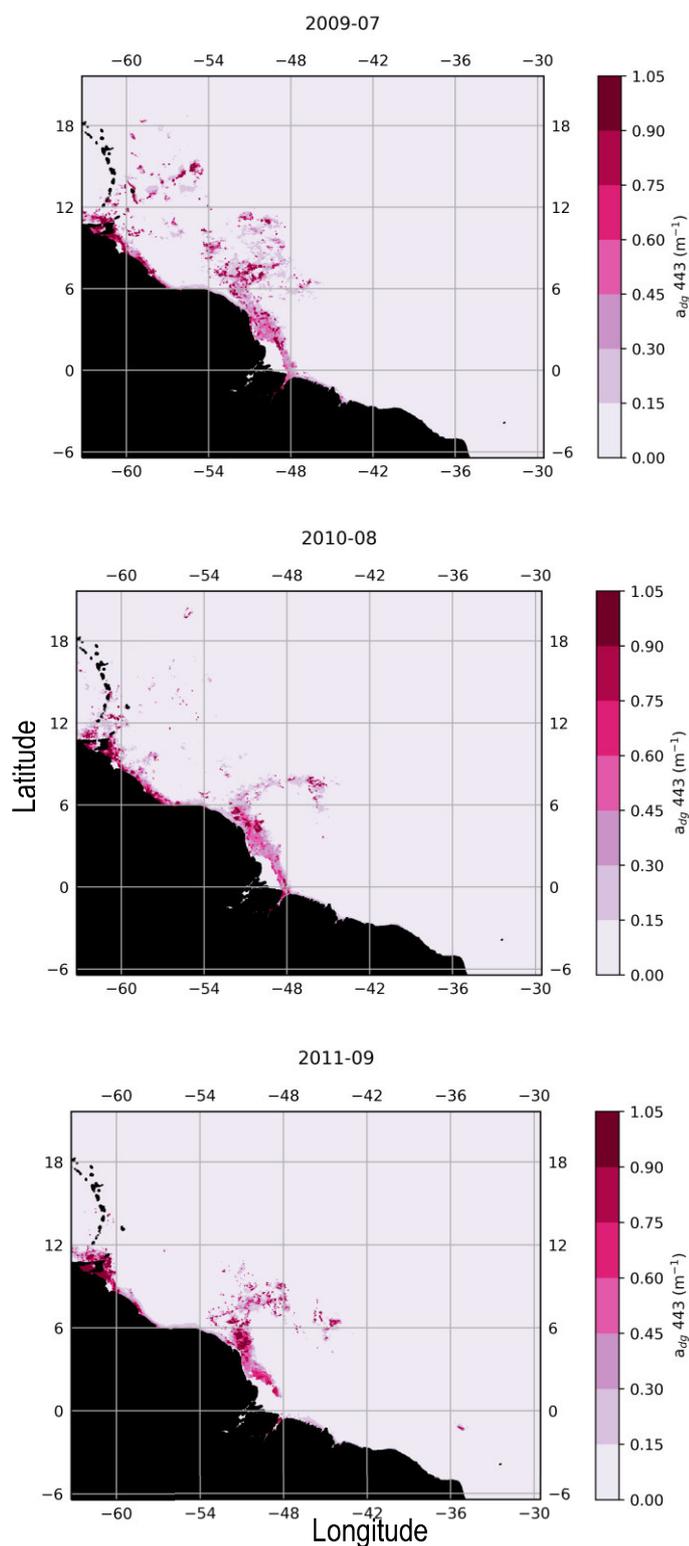


Figura 7: Nos meses de julho a setembro, a pluma do Rio Amazonas acompanha a retroflexão da Corrente Norte do Brasil em sua Contracorrente Norte Equatorial. Detalhes do fenômeno de retroflexão da pluma para meses de julho de 2007, agosto de 2010 e setembro de 2011. Possível observar a formação de anéis.

7.4 Análise da EOFs e Componentes Principais (PCs)

A primeira EOF (Figura 8) representa uma grande parte da variação total, no qual mostra um padrão do sinal existente na região, onde a pluma, devido a um “aprisionamento”, possivelmente em decorrência de ventos alísios de nordeste pela posição da Zona de Convergência Intertropical mais ao sul (MELO et al., 2009), se dispersa para leste ao longo da Margem Equatorial Brasileira em períodos de fevereiro a maio, com maior amplitude em abril e contrário a isso, em sentido oposto, mostra a direção no sentido noroeste, quando a pluma flui seguindo a Corrente Norte Brasileira. Quando ocorre o fluxo para leste, o fluxo para noroeste perde intensidade.

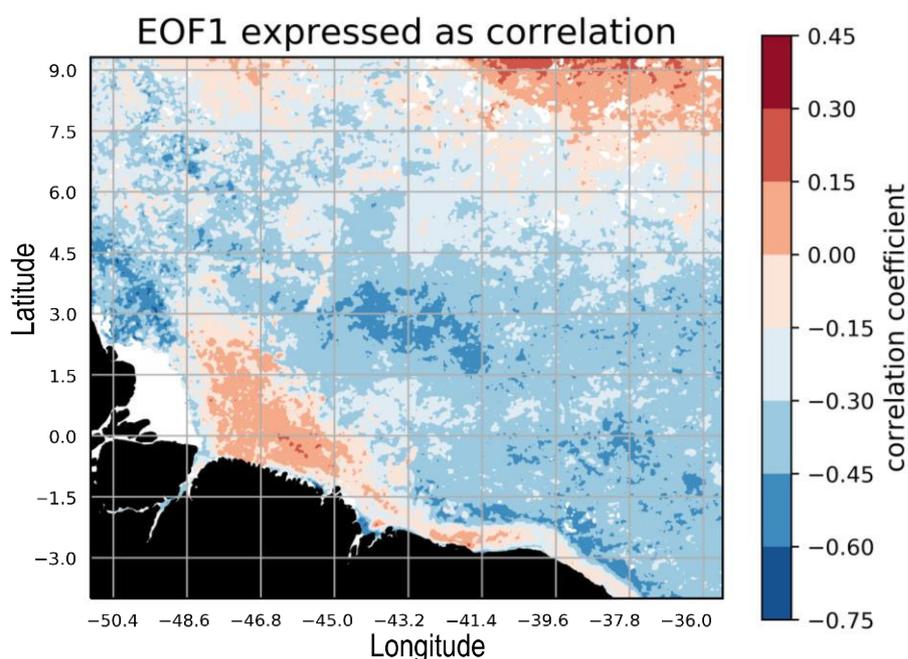


Figura 8: Função Ortogonal Empírica de Correlação 1 onde apresenta coeficientes de correlação positivos e negativos. Maiores correlações positivas próximos à costa da Margem Equatorial Brasileira, em porções mais a leste da foz do Rio Amazonas. Também apresenta correlações positivas na porção de maiores latitudes Norte. Uma zona de alta correlação negativa está presente na região oeste da foz do rio e na porção do Atlântico Equatorial.

A EOF2 apresenta dominância de baixa correlação positiva e alta correlação negativa junto a foz do rio e Margem Equatorial Brasileira, sentido leste. Em direção oposta, a correlação é levemente positiva com porções negativamente correlacionadas (Figura 9).

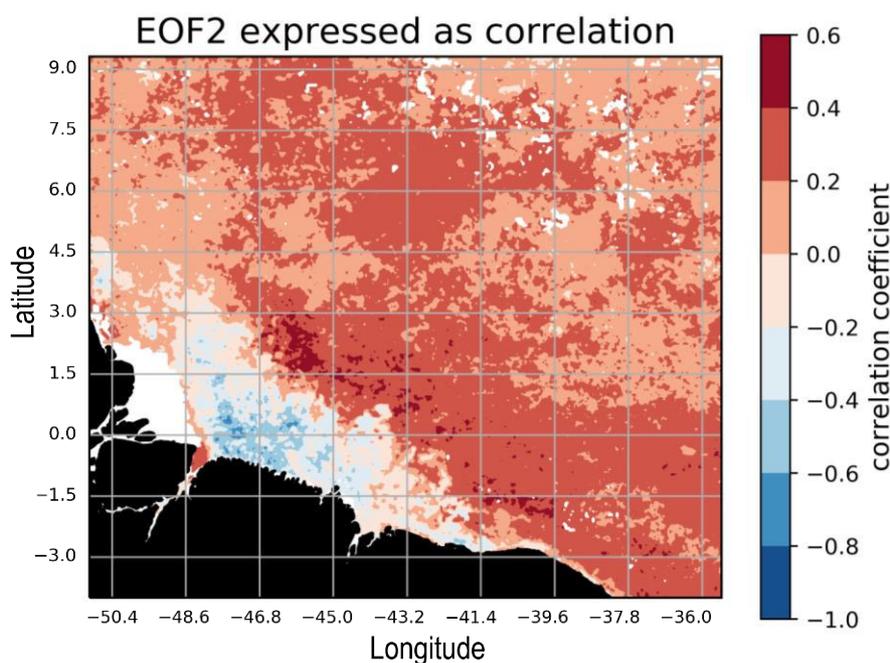


Figura 9: Função Ortogonal Empírica de Correlação 2 que apresenta alta correlação negativa junto à costa, ao leste da foz do Rio Amazonas.

No que diz respeito aos espectros das Componentes Principais 1 e 2 (PC1 & PC2), alguns eventos climáticos, entre 2011 e 2017 podem ter sinais evidenciados (Figura 10), já que foram anos muito chuvosos, quando ocorreu La Niña (2012), provocando grande volume de chuva para aquela região em 2014 e coincidem com os maiores picos negativos (VALERIO, 2018). Em comparação, 2015 foi um ano muito seco, apresenta menor pico (ocorreu El Niño). A PC1 apresenta espectros de padrões climatológicos da pluma do Rio Amazonas para a série de dados aqui apresentada.

No espectro da PC2, em contraste com a PC1, apresenta variabilidade sazonal ligada às chuvas e picos estariam relacionados a eventos climáticos extremos.

O ano de 2014 foi caracterizado por uma inundação recorde na Bacia Amazônica (VALERIO, 2018) que começou com um evento de La Niña em 2012 aumentando o regime de chuvas e seguiu com uma anomalia positiva da SST no Atlântico tropical ao sul do Equador e no Pacífico tropical ocidental (MARENGO, ESPINOZA, 2016; ESPINOZA et al., 2014; SATYAMURTY et al., 2013).

Esses eventos combinados provocaram maior escoamento do rio que chegou no oceano, onde apresentam maior pico para o espectro da PC2 em 2017. Quanto maior o volume do rio, maior a vazão e conseqüentemente maior quantidade de matéria orgânica,

material particulado dissolvido e em suspensão sendo aportado para o oceano.

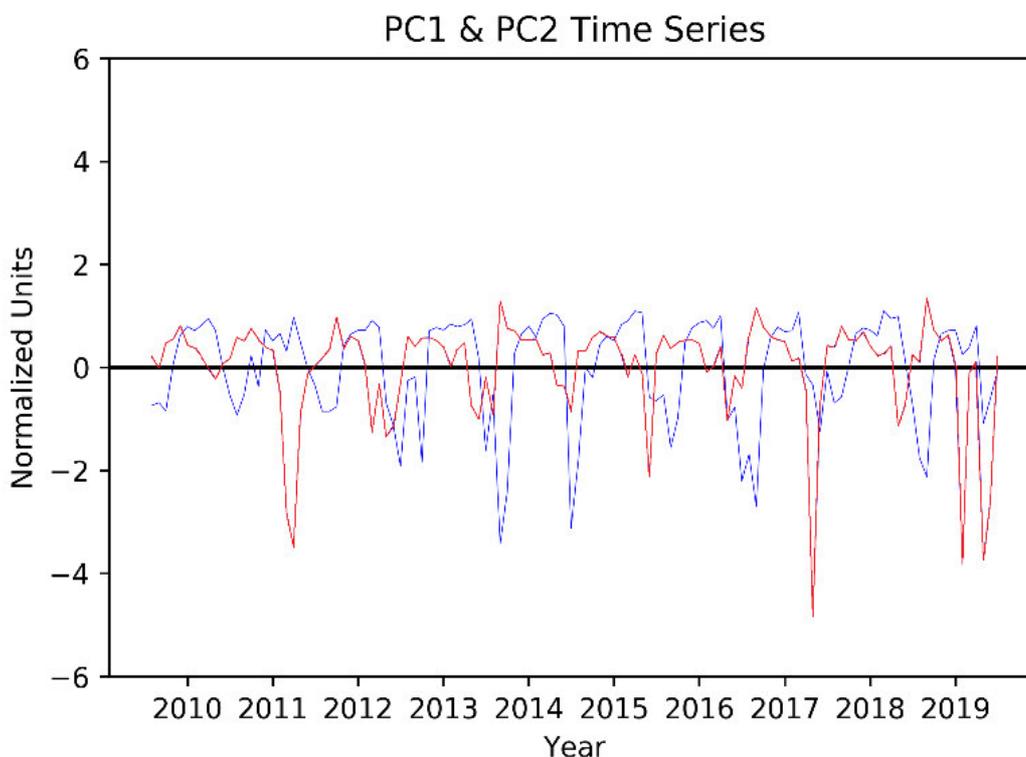


Figura 10: Espectro da PC1 (em azul) e PC2 (em vermelho) para a série temporal dos últimos 10 anos, onde picos negativos coincidem com eventos climáticos como La Niña (2012) e El Niño (2010 e 2015). Maiores picos em decorrência de eventos climáticos extraordinários que se desenvolveram entre 2014 e 2017.

7.6 Estimativa da Pluma a partir de dados de Salinidade Sintética

A posição das plumas dos rios pode ser afetada pelas marés, ventos, batimetria e mudanças na linha de costa. Por esse motivo, as plumas podem mudar de forma drasticamente ao longo do tempo. Assim, utilizando a salinidade como parâmetro, é possível então observar e descrever diferentes regiões dinâmicas em uma pluma, pelos diferentes valores de salinidade, na qual ocorrem processos que definem cada região especificamente (Figura 11).

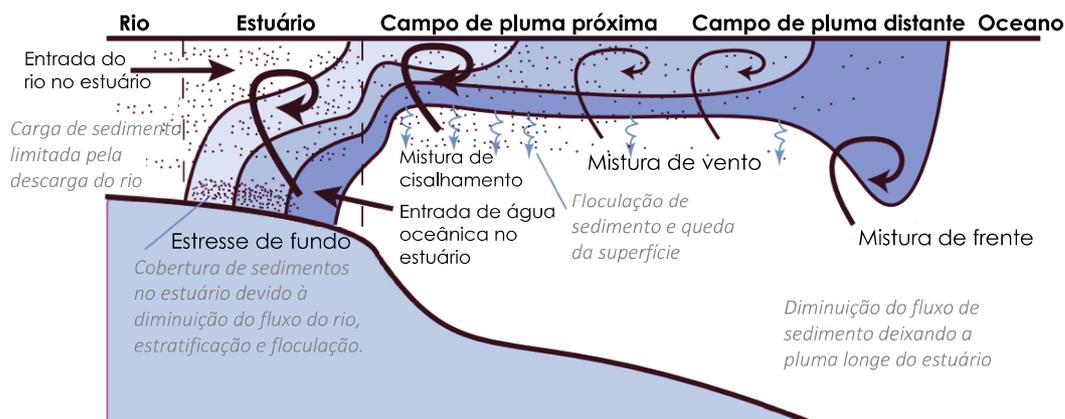


Figura 11: Uma seção transversal da pluma idealizada, onde as regiões dinâmicas são separadas pelos processos de mistura vertical dominantes e são definidas no espaço de salinidade, em particular, pela faixa de valores de salinidade da superfície (traduzido e adaptado de Hetland, Hsu, 2013).

A partir dos dados das médias mensais de salinidade sintética obtidos para a série temporal pelo algoritmo Moller et al. (2010), foram considerados como pluma apenas salinidades menores ou iguais a 30 g.kg^{-1} e as zonas de dados com valores indefinidos (NaN) foram mascarados.

Os resultados indicam uma expressiva sazonalidade na variação da área, sendo que as maiores dispersões para a Costa Ocidental do Maranhão foram observadas entre os meses de fevereiro, março e abril com a diminuição a partir do mês de maio, quando retrocede em direção NO (Figura 12). Nos meses de julho a setembro foi possível observar a retroflexão da pluma, causada pela Corrente Norte do Brasil na Contracorrente Norte Equatorial (Figura 13).

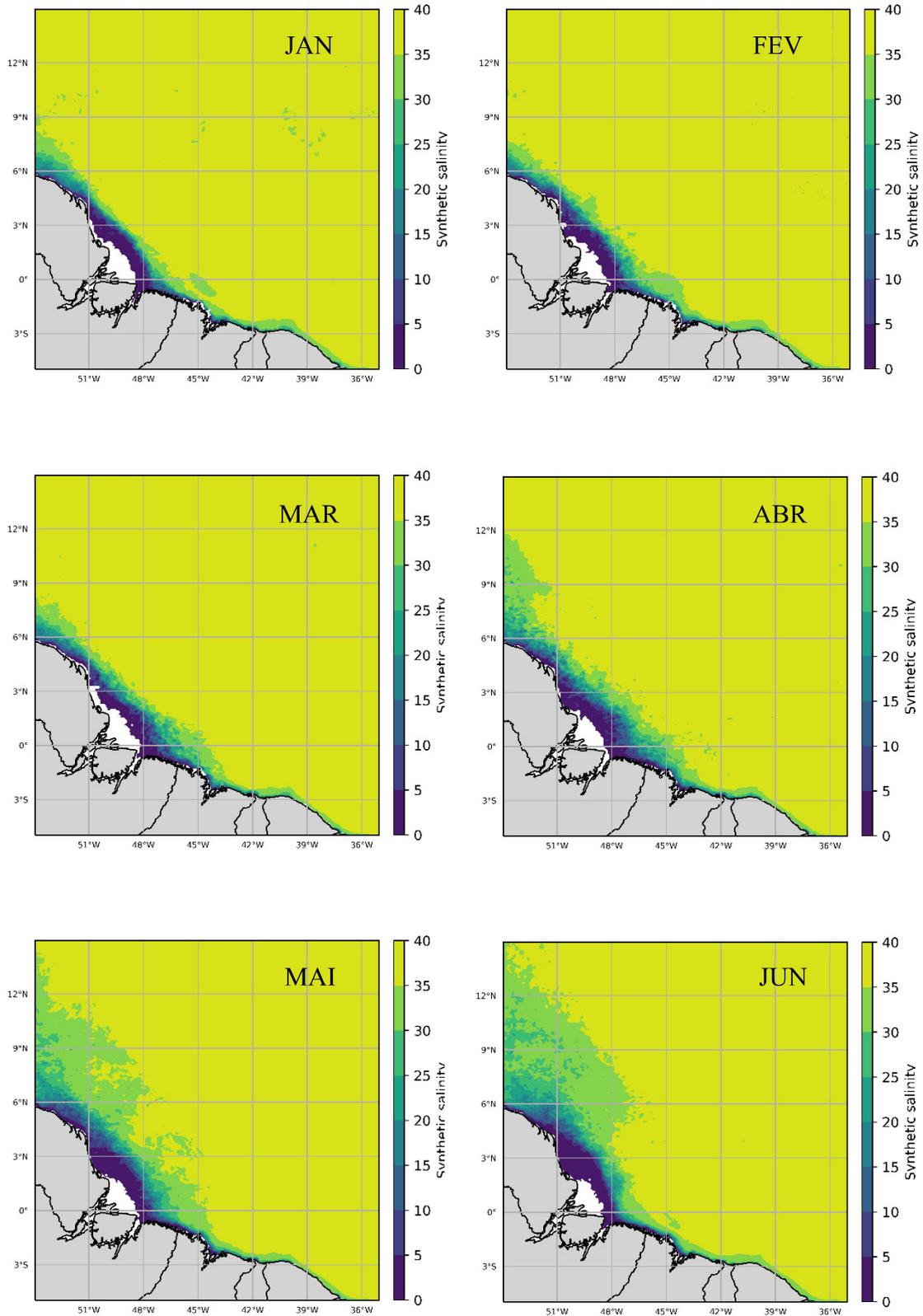


Figura 12: Média da dispersão da pluma do Rio Amazonas para os meses de janeiro a junho ao longo da Margem Equatorial Brasileira, onde alcançam o litoral ocidental do Maranhão entre os meses de fevereiro a abril com menores valores de salinidade.

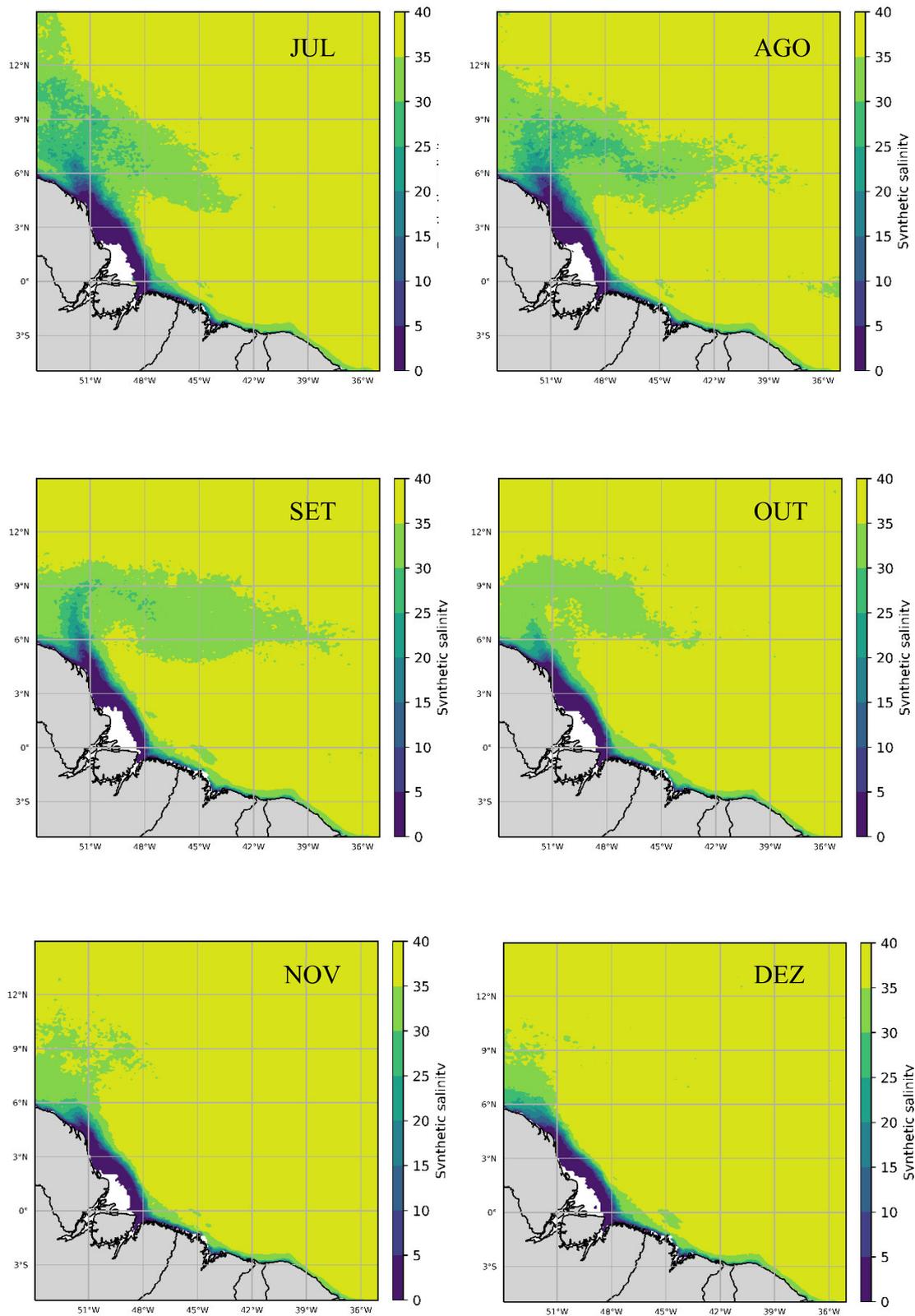


Figura 13: Dispersão da pluma do Rio Amazonas para os meses de julho a dezembro ao longo da Margem Equatorial Brasileira, onde observa-se a retroflexão da Corrente Norte do Brasil em sua Contracorrente Norte Equatorial dos meses de julho a outubro.

Com maior atenção à costa do Maranhão, em recorte, composições de médias mensais da dispersão da pluma do Rio Amazonas em salinidade sintética pelo litoral Ocidental do Estado, zona de extensa área contínua de manguezais, as Reentrâncias Maranhenses, onde nota-se forte presença da pluma do Rio Amazonas, que se intensifica nos meses de fevereiro a maio (Figuras 14, 15, 16)

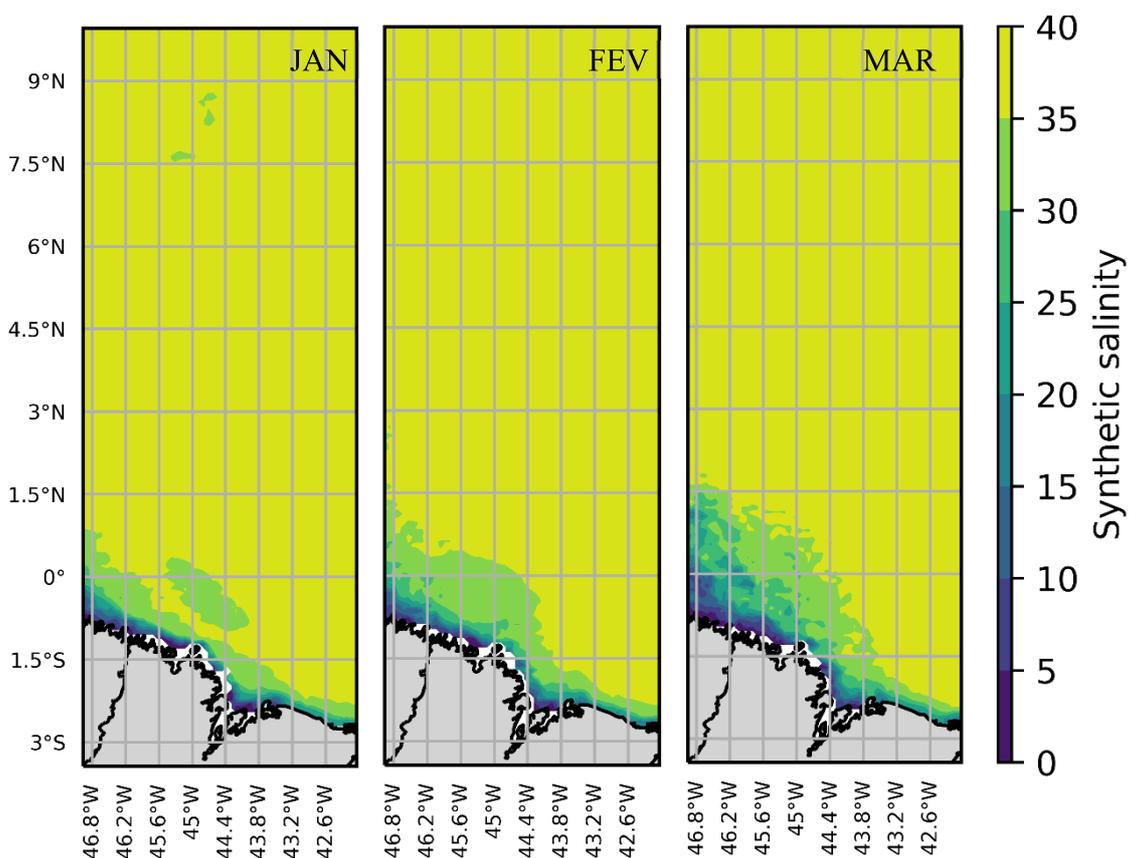


Figura 14: Recorte da costa do Maranhão onde é possível observar a distribuição da pluma com baixa salinidade, onde ocorre um crescimento da área de dispersão, em frente à região das Reentrâncias Maranhenses.

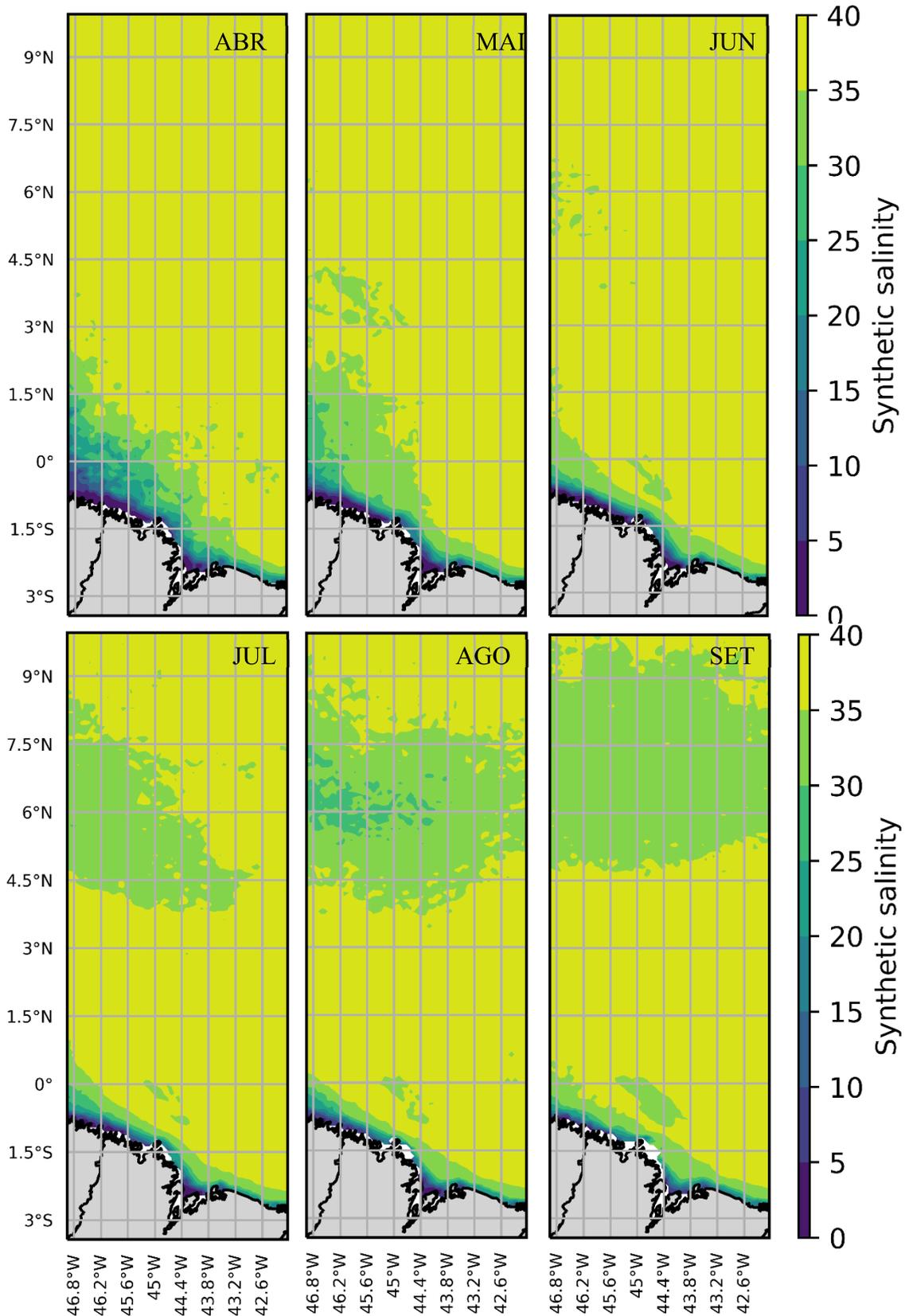


Figura 15: No mês de abril é possível notar um aumento gradativo da dispersão pela costa do Maranhão, seguindo em maio, onde começa a diminuir e seguir em direção à costa amazônica, seguindo em direção ao noroeste. A partir de julho já é possível notar parte da retroflexão da pluma no Hemisfério Norte, intensificando nos meses de agosto e setembro.

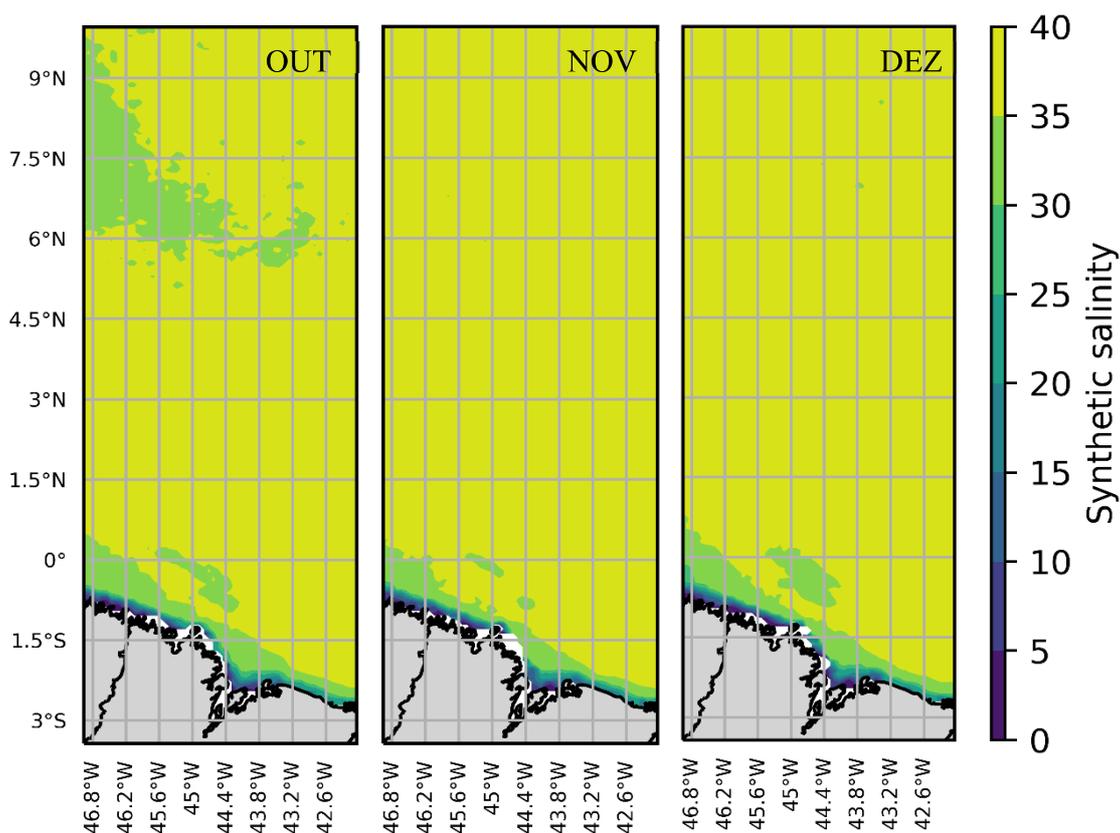


Figura 16: No detalhe é possível notar que a retroflexão da pluma se desintensifica. Novembro e dezembro mostra uma baixa atividade de pluma fluvial na costa do Maranhão.

Junto à costa, região com maior quantidade de material em suspensão, se encontram regiões sem dados (em branco), principalmente na região das Reentrâncias Maranhenses. Em áreas costeiras, o material proveniente de descargas fluviais, a ressuspensão do sedimento por marés, ondas e tempestades, bem como componentes biologicamente ativos na coluna de água também podem alterar a cor das águas próximas à costa (KRASNOPOLSKY et al., 2016). Essa intensa interação continente-oceano tende a provocar a superestimação dos valores, por isso são mascarados, criando *gaps*.

8. CONCLUSÃO

Através do produto do coeficiente de absorção pela matéria orgânica e detritos a 443nm do Algoritmo Quasi-Analítico (adg_443_qaa) do sensor MODIS-Aqua e pela salinidade sintética obtida do produto adg_443_gsm do SeaWiFS foi possível visualizar



o comportamento da pluma do Rio Amazonas pela Margem Equatorial Brasileira e sua dispersão pela costa do Maranhão. A pluma apresentou padrões de variabilidade característicos e sazonais, em resposta às condições de vazões e comportamento do fluxo da Corrente Norte do Brasil.

Conclui-se que durante os primeiros meses do ano, em resposta ao aumento da vazão e também à posição mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical, a pluma mantém-se confinada junto à Margem Equatorial Brasileira, em posição mais ao leste da foz do Rio Amazonas, atingindo porções Plataforma Continental ocidental do Maranhão. Sempre que o fluxo é para posição de longitudes mais ao leste, o fluxo para noroeste perde intensidade.

Sazonalmente, durante os meses de julho, agosto e setembro, a pluma flui para noroeste e se desprende da costa Sul-Americana, onde ocorre a retroflexão seguindo a Contracorrente Norte Equatorial. O produto do adg443 do MODIS com sua resolução espacial de 4 km serviu como um bom recurso para observação do comportamento da pluma e sua variabilidade, como o esperado.

A salinidade sintética obtida pelo algoritmo desenvolvido por Moller et al. (2010), mesmo com resolução espacial de 9 km se mostrou bastante eficiente, onde foi possível observar o comportamento da pluma e sua dispersão com valores de salinidade mais baixos ao longo da costa onde atua.

Padrões relacionados com o fluxo da vazão do rio e possivelmente relacionado com eventos climáticos extremos e locais também foram observados.

Os resultados aqui apresentados se mostraram adequados para entender dinâmica da pluma e devem ser analisados com base em outras forçantes que interagem com a pluma, para uma melhor compreensão dessa interação.



REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M. C. **Uma análise do campo de vento de superfície sobre o Oceano Atlântico Tropical e Sul usando dados do escaterômetro do ERS.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2003.
- BARTHEM, R. B. et al. Amazon Basin, GIWA Regional assessment 40b. **Sweden, University of Kalmar/UNEP, 60p**, 2004.
- 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**, v. 118, n. 12, p. 6894-6913, 2013.
- COOLEY, S. R. et al. Seasonal variations in the Amazon plume-related atmospheric carbon sink. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 3, p. 15, 2007.
- DAWSON, Andrew. eofs: A Library for EOF Analysis of Meteorological, Oceanographic, and Climate Data. **Journal of Open Research Software**, v. 4, p. 4–7, 2016.
- ESPINOZA, Jhan Carlo et al. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, p. 124007, 2014.
- FAGUNDES, M. **Influência da pluma do Amazonas sobre a dinâmica da plataforma continental do Estado do Maranhão.** [s.l.] Universidade Federal do Maranhão, 2016.
- FISCH, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. A. Clima da Amazônia climanalise-boletim de monitoramento e análise climática. **Edição Comemorativa de**, v. 10.
- FOLTZ, Gregory R.; SCHMID, Claudia; LUMPKIN, Rick. Transport of surface freshwater from the equatorial to the subtropical North Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 45, n. 4, p. 1086-1102, 2015.
- FRATANTONI, David M.; GLICKSON, Deborah A. North Brazil Current ring generation and evolution observed with SeaWiFS. **Journal of Physical Oceanography**, v. 32, n. 3, p. 1058-1074, 2002.
- FRATANTONI, David M.; RICHARDSON, Philip L. The evolution and demise of North Brazil Current rings. **Journal of Physical Oceanography**, v. 36, n. 7, p. 1241-1264, 2006.
- GONG, Wenping et al. Plume-to-plume interactions in the Pearl River Delta in winter. **Ocean & Coastal Management**, v. 175, p. 110-126, 2019.
- GOULDING, Michael et al. The Smithsonian atlas of the Amazon. 2003.
- GRODSKY, Semyon A. et al. Haline hurricane wake in the Amazon/Orinoco plume: AQUARIUS/SACD and SMOS observations. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 20, 2012.
- HETLAND, R. D.; HSU, T. J. Freshwater and sediment dispersal in large river plumes. In: ALLISON, M. A.; BIANCHI, T. S.; CAI, W.-J. (Eds.). **Biogeochemical Dynamics at Major River-Coastal Interfaces: Linkages with Global Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 55–85.
- HICKEY, B. M. et al. River Influences on Shelf Ecosystems: Introduction and synthesis. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 115, n. 2, p. 1–26, 2010.
- HOPKINS, J. et al. Detection and variability of the Congo River plume from satellite



derived sea surface temperature, salinity, ocean colour and sea level. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 365–385, dez. 2013.

HU, Chuanmin et al. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observation from space and S-PALACE floats. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 10-11, p. 1151-1171, 2004.

IBÁNHEZ, J. Severino P.; ARAUJO, Moacyr; LEFÈVRE, Nathalie. The overlooked tropical oceanic CO₂ sink. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 8, p. 3804-3812, 2016.

KRASNOPOLSKY, V. et al. Neural networks technique for filling gaps in satellite measurements: Application to ocean color observations. **Computational Intelligence and Neuroscience**, v. 2016, 2016.

LANDSCHÜTZER, P. et al. Recent variability of the global ocean carbon sink. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 28, n. 9, p. 927-949, 2014.

LEFÈVRE, Nathalie et al. Net heterotrophy in the Amazon Continental Shelf changes rapidly to a sink of CO₂ in the Outer Amazon Plume. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 278, 2017.

LENTZ, Steven J. The Amazon River plume during AMASSEDS: subtidal current variability and the importance of wind forcing. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 100, n. C2, p. 2377-2390, 1995.

MARENGO, José Antonio; ESPINOZA, Jhan Carlo. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARITORENA, S; SIEGEL, D. A.; PETERSON, A. R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied optics**, v. 41, n. 15, p. 2705-2714, 2002.

MARTINEZ, Jean-Michel et al. Analysis of multitemporal MODIS and Landsat 7 images acquired over Amazonian floodplains lakes for suspended sediment concentrations retrieval. In: **INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM**. 2003. p. III: 2122-2124.

MEDEIROS, Patricia M. et al. Fate of the Amazon River dissolved organic matter in the tropical Atlantic Ocean. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 5, p. 677-690, 2015.

MELO, ABC de; CAVALCANTI, IF de A.; SOUZA, P. P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. **Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos**, 2009.

MENDES, R. et al. Observation of a turbid plume using MODIS imagery: The case of Douro estuary (Portugal). **Remote sensing of environment**, v. 154, p. 127-138, 2014.

MERTES, L. A. K.; MAGADZIRE, T. T. Large rivers from space. **Large Rivers: Geomorphology and Management**, p. 535–552. 2008.

MCKEE, B. A. et al. Transport and transformation of dissolved and particulate materials on continental margins influenced by major rivers: Benthic boundary layer and seabed processes. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 7–8, p. 899–926, 2004.

MOLLERI, G. S. F.; NOVO, E. M. L. D. M.; KAMPEL, M. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. **Continental Shelf Research**,



v. 30, n. 3–4, p. 342–352, 27 fev. 2010.

MÜLLER-KARGER, F. E. et al. Pigment distribution in the Caribbean Sea: Observations from space. **Progress in Oceanography**, v. 23, n. 1, p. 23-64, 1989.

Müller-Krager, F.E., McClain, C.R., Richardson, P.L. The dispersal of the Amazon water. **Nature** 333, 56–59, 1988.

NASA. **Ocean color web: Product definitions**. Disponível em: <<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/products/#>>. Acesso em: 19 out. 2020.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. **Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Absorption due to gelbstof and detritus at 443 nm- QAA model Data**; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi:10.5067/AQUA/MODIS/L3B/QAA/2018. Acesso em 08/29/2019

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. **Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Garver-Siegel-Maritorena (GSM) Model Data**; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: data/10.5067/ORBVIEWS-2/SEAWIFS/L3M/GSM/2018. Acessado em 28/01/2020.

ROBINSON, I. S. **Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography**. Springer Science & Business Media, 2010.

SALISBURY, J. et al. Spatial and temporal coherence between Amazon River discharge, salinity, and light absorption by colored organic carbon in western tropical Atlantic surface waters. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 116, n. C7, 2011.

SATYAMURTY, P. et al. A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 7, p. 1396-1401, 2013.

SAWAKUCHI, H. O. et al. Carbon dioxide emissions along the lower Amazon River. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 76, 2017.

SILVA, AC da et al. Observações hidrológicas e resultados de modelagem no espalhamento sazonal e espacial da pluma de água Amazônica. **Acta Amazon**, v. 39, p. 361-370, 2009.

SUBRAMANIAM, Ajit et al. Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 30, p. 10460-10465, 2008.

TAKAHASHI, Taro et al. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea–air CO₂ flux over the global oceans. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 56, n. 8-10, p. 554-577, 2009.

TEAM, Python Core. Python: A dynamic, open source programming language. **Python Software Foundation**, v. 78, 2015.

VALERIO, Aline De Matos. **Assesment of the spatiotemporal variability of optical and biogeochemical parameters in the lower Amazon region and of the carbon content in the Amazon River continuum using in situ and remote sensing data**. National Institute for Space Research, 2018.

WARD, Nicholas D. et al. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River—Óbidos to the ocean. **Marine Chemistry**, v. 177, p. 244-256, 2015.

