



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG**  
**DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA**  
**OCEANOGRAFIA**



**CRISTIELEN ALVES PEREIRA**

**MODELO DE PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DE BEHRENFELD-FALKOWSKI  
DERIVADO DO SENSOR MODIS/Aqua PARA A PLUMA DO RIO AMAZONAS**

Recife  
2018

CRISTIELEN ALVES PEREIRA

**MODELO DE PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DE BEHRENFELD-FALKOWSKI  
DERIVADO DO SENSOR MODIS/Aqua PARA A PLUMA DO RIO AMAZONAS**

Trabalho de Monografia apresentado ao Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do curso de Bacharelado em Oceanografia

**Orientadora:** Prof. Dra. Dóris Regina Aires Veleda

Recife  
2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

P436m Pereira, Cristielen Alves.  
Modelo de produtividade primária de Behrenfeld-Falkowski derivado do sensor MODIS/Aqua para a Pluma do Rio Amazonas / Cristielen Alves Pereira- 2018.  
52 folhas, il., tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Dóris Regina Aires Veleda.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Oceanografia, 2018.  
Inclui Referências.

1. Oceanografia. 2. Pluma do Rio Amazonas. 3. Síntese de matéria orgânica.  
4. Sensoriamento remoto I. Veleda, Dóris Regina Aires (Orientadora). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.) BCTG/2018-480

CRISTIELEN ALVES PEREIRA

**MODELO DE PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DE BEHRENFELD-FALKOWSKI  
DERIVADO DO SENSOR MODIS/Aqua PARA A PLUMA DO RIO AMAZONAS**

Trabalho de Monografia apresentado ao Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do curso de Bacharelado em Oceanografia

Data de aprovação:  
Nota:

BANCA EXAMINADORA:

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dóris Veleda (orientadora)**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

---

**Dr. Pedro Tyaquiçã da Silva Santos (titular)**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

---

**Prof. Dr. Fernando Antônio do Nascimento Feitosa**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

---

**Suplente: Msc. Luis Henrique Bezerra Alves**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

Dedico este trabalho aos meus pais, a minha avó e a minha tia por sempre me apoiarem.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão porque mesmo sem saber ou compreender o que eu estava fazendo da vida, mesmo sem saber o que é oceanografia me apoiaram e apoiam em todos os momentos. Agradeço a minha avó por todas as orações e palavras de conforto.

Agradeço a você tia. Se não fosse por você talvez eu não estivesse terminando o curso agora. Se não fosse o seu silêncio do outro lado do telefone enquanto o choro tomava conta (tantas vezes), se não fossem suas palavras me dando força e dizendo o quanto sou capaz talvez eu tivesse pegado minha mala e abandonado tudo. Obrigada.

Obrigada a minha orientadora, por todo conhecimento e apoio transmitido durante toda a confecção deste trabalho. Obrigada Dóris, esse ano você foi como uma brisa na minha vida.

Agradeço aos “Oceanógrafos Perdidos” por toda amizade, companheirismo e momentos de alegria compartilhados. Agradeço especialmente a você Syu, irmã do coração, que me apoiou, deu bronca e me ajudou durante todo esse período; e a você Kleyton, não faço ideia de como você me aguentou nesse último semestre (nem em todos esses anos), mas se não fosse por você eu teria surtado.

O que teria sido da minha graduação sem você André? Obrigada por ser mais que o secretário do curso, por ser meu amigo. Sei que você é uma das pessoas que mais torce pelo meu sucesso e acredita em mim, obrigada.

Agradeço a todos os companheiros de laboratório pelo apoio, especialmente a Pedro, por ter me ensinado tanto.

## RESUMO

A produção primária (PP) é a síntese da matéria orgânica a partir de compostos inorgânicos. Ela alimenta a vida nos oceanos, conduz ciclos químicos e diminui o carbono atmosférico, sendo assim, imprescindível sua medição. Medição essa que pode ser realizada tanto por métodos diretos quanto indiretos. Entretanto, apesar dos métodos diretos serem mais precisos, os dados obtidos por eles são escassos em vista do oceano global e, em sua maioria, não oferecem cobertura temporal. Diante disso, os dados de satélite (método indireto) forneceram uma revolução dentro da oceanografia. Através de sensores instalados em plataformas espaciais, o sensoriamento remoto fornece os parâmetros necessários para a utilização de modelos de PP. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi a aplicação do Modelo de Produtividade Verticalmente Generalizado (VGPM), proposto por Behrenfeld-Falkowski, na pluma de um dos mais extensos sistemas hídricos do globo, o Rio Amazonas. Foram utilizados dados *in situ* de clorofila-a (*Chl\_a*), de temperatura da superfície do mar (TSM) e de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) obtidos através dos cruzeiros oceanográficos Camadas Finas III (CFIII) e V (CFV). Esses dados serviram para calibrar e validar os dados de satélite e assim aplicar no VGPM. Através de dados de satélite corrigidos e não corrigidos a partir dos dados *in situ* foram geradas figuras de concentração e distribuição de *Chl\_a* e, por conseguinte, figuras de concentração de PPL através do modelo. Os valores de *Chl\_a* foram superestimados tanto para o CFIII quanto para o CFV, fato provavelmente relacionado com a matéria orgânica dissolvida cromófora (CDOM) que interferiu na detecção de *Chl\_a* pelo sensor do satélite. Como o VGPM também utiliza esses dados, as concentrações de PPL também foram superestimadas, mostrando a importância do pré-tratamento e sugerindo a utilização de outro modelo que não sofra tanta interferência da zona costeira. Pode-se dizer que a Pluma do Rio Amazonas possui alta PPL, entretanto as concentrações obtidas aqui são superiores às concentrações reais. A metodologia utilizada neste trabalho ressalta a importância de métodos indiretos para medição de PPL, deixando claro que há limitações e reforça a necessidade de obtenção de dados *in situ*, tanto para validar e calibrar dados de satélite quanto para compreensão da dinâmica física, química, biológica e geológica de locais complexos como plumas de rios.

**Palavras-chave:** Pluma do Rio Amazonas. Síntese de matéria orgânica. Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

The primary production (PP) is the synthesis of organic matter from inorganic compounds. It feeds life in the oceans, conducts chemical cycles, and decreases atmospheric carbon dioxide, so its measurement is imperative. Measurement that can be performed by both direct and indirect methods. However, although the direct methods are more accurate, the data obtained by them are scarce when compared with global ocean's size. Additionally, direct methods usually do not provide temporal coverage. In view of this, satellite data (indirect method) represents a revolution within oceanography. Through sensors installed on space platforms, remote sensing provides the parameters required for the use of PP models. Therefore, the main objective of this work was the application of the Vertically Generalized Productivity Model (VGPM), proposed by Behrenfeld-Falkowski, in the plume of one of the most extensive water systems of the globe, the Amazon River. In situ data of chlorophyll-a (*Chl\_a*), sea surface temperature (SST) and photosynthetically available radiation (PAR) obtained through the oceanographic cruises Camadas Finas III (CFIII) and V (CFV). These data served to calibrate and validate the satellite data and thus apply in the VGPM. Through corrected and uncorrected satellite data from the in situ data, *Chl\_a* concentration and distribution figures were generated and, therefore, PPL concentration figures through the model. *Chl\_a* values were estimated for both CFIII and CFV, a fact probably related to the dissolved organic matter (CDOM) that interfered with the detection of *Chl\_a* by the satellite sensor. As VGPM also uses these data, PPL concentrations were also overestimated, showing the importance of pretreatment and suggesting the use of another model that does not suffer as much interference from the coastal zone. It can be said that the Plume of the Amazon River has high PPL, however the concentrations obtained here were higher than the real concentrations. The methodology used in this study highlights the importance of indirect methods for PPL measurement, making it clear that there are limitations and reinforces the need to obtain data in situ, both to validate and calibrate satellite data and to understand the physical, chemical, biological and geological dynamics of complex sites such as river plumes.

**Keywords:** Plume Amazon River. Synthesis of organic matter. Remote sensing.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 -** Mapa da área de estudo mostrando a distribuição de *Chl\_a* em  $\text{mg/m}^3$  (escala  $\log_{10}$ ) na pluma do Rio Amazonas. Média climatológica para os meses de junho a agosto (2008 a 2018) derivada do MODIS/Aqua.....21
- Figura 2 -** Representação esquemática da dinâmica das principais correntes superficiais que influenciam na área de estudo, juntamente com um vórtice formado pela retrofleção da CNB. Média climatológica de *Chl\_a* para o mês de setembro (2008 a 2018) derivada do MODIS/Aqua.....24
- Figura 3 -** Média climatológica trimestral (2008 a 2018) da concentração de *Chl\_a* (escala  $\log_{10}$ ) derivada do MODIS/Aqua.....26
- Figura 4 -** Média climatológica trimestral (2008 a 2018) de TSM derivada do MODIS/Aqua.....27
- Figura 5 -** Média climatológica trimestral (2008 a 2018) de PAR derivada do MODIS/Aqua.....28
- Figura 6 -** Locais onde foram coletados dados de *Chl\_a* durante o CFIII (a) e CFV (b).....34
- Figura 7 -** Representação da distribuição de *Chl\_a* na área de estudo em  $\text{mg m}^{-3}$  (escala  $\log$ ) durante o CFIII. Em a) dados de satélite sem correção e em b) dados de satélite corrigidos a partir de dados *in situ*.....35
- Figura 8 -** Representação da distribuição de *Chl\_a* na área de estudo em  $\text{mg m}^{-3}$  (escala  $\log$ ) durante o CFIII. Em a) distribuição dos pontos de coleta dos dados *in situ* sem os pontos próximos à costa (SPC), plotados sobre os dados de satélite sem correção e em b) dados de satélite corrigidos a partir dos dados *in situ* apresentados em a).....36
- Figura 9 -** Representação da distribuição da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  na área de estudo durante o cruzeiro oceanográfico CFIII. Em a) dados de TSM do satélite sem tratamento e em b) corrigidos a partir de dados *in situ*.....36
- Figura 10 -** Representação da PPL do CFIII em  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  através do VGPM. Em a) dados sem correção e em b) dados SPC corrigidos.....39
- Figura 11 -** Representação da distribuição de *Chl\_a* na área de estudo em  $\text{mg m}^{-3}$  (escala  $\log$ ) durante o CFV. Em a) dados de satélite sem tratamento e b) dados de satélite corrigidos a partir de dados *in situ*.....40
- Figura 12 -** Representação da distribuição da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  na área de estudo durante o cruzeiro oceanográfico CFV. Em a) dados de TSM do satélite sem tratamento e b) corrigidos a partir de dados *in situ*.....41
- Figura 13 -** Representação da PPL do CFV em  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  através do VGPM. Em a) dados sem correção e b) dados corrigidos.....42

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> –	Descrição estatística dos dados de <i>Chl_a</i> ( <i>in situ</i> e de satélite e da correlação entre eles) dos Cruzeiros Oceanográficos CFIII, com e sem os pontos de coleta ao longa da costa (SPC) e CFV.....	38
-------------------	---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**AVHRR** - *Advanced Very High Resolution Radiometer*

**CCNE** - Contracorrente Norte Equatorial

**CDOM** - Material orgânico dissolvido cromóforo

**CFIII** - Camadas Finas III

**CFV** - Camadas Finas V

**CG** - Corrente da Guianas

**Chl** - Clorofila

**Chl-a** - Clorofila-a

**CNB** - Corrente Norte do Brasil

**CSE** - Corrente Sul Equatorial

**CZCS** - *Coastal Zone Color Scanner*

**ENOS** - *El Niño* -Oscilação Sul

**INCTAmbTropic** - projeto Ambientes Marinhos Tropicais: Heterogeneidade Espaço-Temporal e Respostas à Mudanças Climáticas

**IR** - Infravermelho

**MODIS** - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

**NASA** - *National Aeronautics and Space Administration*

**NOAA** - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

**PAR** - Radiação fotossinteticamente ativa

**PP** - Produção primária

**PPB** - Produção primária bruta

**PPL** - Produção primária líquida

**REVIZEE** - Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva

**RFA** - Radiação fotossinteticamente ativa

**SeaWiFS** - *Sea-Viewing Wide Field-of-View*

**SPD** - Sem os pontos da costa

**TSM** - Temperatura da superfície do mar

**VGPM** - Modelo de Produtividade Verticalmente Generalizado

**ZCIT** - Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

**C<sub>sat</sub>** - Concentração superficial de *Chl* derivada por satélite

**FV** - Função de volume

**H** - Comprimento do dia em horas

**K** - Coeficiente de atenuação da luz solar

**p<sup>b</sup><sub>opt</sub>** - Campo fotossintético ótimo

**Z** - Profundidade

**Z<sub>eu</sub>** - Zona eufótica

**Z<sub>pd</sub>** - Profundidade de penetração da luz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
1.2.1	Objetivos específicos.....	16
<b>2</b>	<b>SENSORIAMENTO REMOTO E OCEANOGRAFIA .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO: PLUMA DO RIO AMAZONAS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Características químicas, biológicas e geológicas .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Hidrodinâmica e climatologia .....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Dados <i>in situ</i> e de satélite.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelo De Produtividade Verticalmente Generalizado (VGPM) .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>Clorofila - <i>a</i> (<i>Chl_a</i>) .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Temperatura Da Superfície Do Mar (TSM) .....</b>	<b>33</b>
<b>4.5</b>	<b>Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) .....</b>	<b>33</b>
<b>4.6</b>	<b>Tratamento dos dados.....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Camadas finas III.....</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Camadas finas V.....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Produção primária (PP) é a síntese da matéria orgânica a partir de compostos inorgânicos, ela envolve os fluxos de dióxido de carbono, oxigênio, minerais e água e a acumulação de biomassa (RICKLEFS, 2010). Outro conceito importante é o de produtividade primária que representa a taxa de PP, ou seja, o quanto de matéria orgânica é gerada em um local durante um determinado período. Essa produtividade pode representar a produção primária bruta (PPB) que é a taxa total de carbono orgânico produzido pelos organismos autótrofos ou a produção primária líquida (PPL), que é a PPB subtraindo a respiração efetuada (CHAVEZ, *et al.*, 2011; SIGMAN & HAIN, 2012).

A capacidade que alguns organismos possuem de captar a energia solar e convertê-la em energia química é a base para a vida na Terra (RICKLEFS, 2010). Conhecidos como produtores primários, eles são em sua maioria detentores de clorofila-a (*Chl\_a*) e realizam a fotossíntese, método dominante de PP (GARRISON, 2010). Eles são representados pelas plantas no ambiente terrestre e principalmente pelo fitoplâncton no meio marinho. Estudos apontam que a produtividade terrestre é maior que a marinha (50 a 70 bilhões de toneladas métricas por ano e de 35 a 50 bilhões de toneladas métricas por ano, respectivamente), entretanto a biomassa total de produtores é muito menor no meio marinho de 1 a 2 bilhões de toneladas métricas enquanto que cerca de 600 a 1.000 bilhões de toneladas nos continentes (GARRISON, 2010), mostrando que os produtores primários marinhos são muito mais eficientes.

A PP alimenta a vida nos oceanos, conduz ciclos químicos e diminui o carbono atmosférico (SIGMAN & HAIN, 2012), isso faz com que sua medição seja imprescindível para compreensão desse ecossistema e tudo que o envolve. Medição essa que pode ser realizada tanto por métodos diretos quanto indiretos (VERNET & SMITH, 2007). Os métodos diretos são aqueles que envolvem coleta de dados *in situ*, eles apresentam maior precisão, entretanto são caros e o número de medidas é muito pequeno quando se compara ao oceano global (BEHRENFELD & FALKOSWSKI, 1997, VERNET & SMITH, 2007), além disso, com exceção de pontos contínuos de coleta como as boias oceanográficas, não oferecem cobertura temporal (VERNET & SMITH, 2007). Já nos métodos indiretos não há contato com o meio amostrado e sim a utilização de sensores que captam propriedades da matéria como a refração e reflexão da luz (VERNET & SMITH, 2007). Esse método oferece cobertura global e espacial, entretanto está sujeito à dependência de dados *in situ* (calibrar e validar) (LE TRAON, 2011; LE TRAON *et al.*, 2015) e apresenta certas limitações para medições em áreas costeiras.

Dois métodos diretos muito utilizados no meio aquático são aqueles que envolvem a quantificação da produção de oxigênio ou da assimilação do  $^{14}\text{C}$  (VERNET & SMITH, 2007). Segundo Ricklefs, (2010) a quantificação da PP a partir do oxigênio funciona da seguinte forma: as amostras de água são coletadas em dois tipos de garrafas, uma clara e outra escura. A garrafa clara permite que haja a entrada da luz do sol, por conseguinte a realização da fotossíntese e respiração. Já na garrafa escura ocorre apenas a respiração. Ambas são seladas e suspensas abaixo da superfície de um corpo d'água. No primeiro caso parte do oxigênio produzido pela fotossíntese é consumido pela respiração, no segundo o oxigênio é consumido sem que haja a reposição. Assim a PPB pode ser estimada adicionando-se a mudança na concentração de oxigênio da garrafa escura àquela da garrafa clara. Por outro lado, a técnica baseada na assimilação do  $^{14}\text{C}$  também envolve a utilização das garrafas “clara e escura”, contudo nesse caso há a necessidade de se encubar as garrafas durante determinado período com a presença do isótopo radioativo  $^{14}\text{C}$  (VERNET & SMITH, 2007). Esse método estima a absorção e assimilação de carbono inorgânico dissolvido na coluna d'água pelos organismos fitoplanctônicos (VERNET & SMITH, 2007).

Os métodos indiretos, entre eles o sensoriamento remoto, oferecem a base para a aplicação de modelos de PP. Esses modelos consistem em equações que acoplam diferentes tipos de informações relacionadas entre si e assim quantificam a PP na região estudada. O Rio Amazonas, um dos mais extensos sistemas hídricos do globo, é responsável por aproximadamente 16% das águas doces presentes no oceano Atlântico Tropical Norte (MULLER-KARGER *et al.*, 1988), com uma vazão média de  $120.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Uma vez que o Rio Amazonas flui através de densas bacias hidrográficas, carrega grandes quantidades de sedimentos, nutrientes, bem como partículas e Material Orgânico Dissolvido Cromóforo (CDOM) que, juntos, dão uma cor única à pluma, tornando-a visível do espaço como um marrom esverdeado estendendo-se várias centenas de quilômetros na parte oeste do Atlântico Norte (DEL VECCHIO & SUBRAMANIAM, 2004). Ele atinge seus picos de vazão no mês de maio (média de  $220.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) e o mínimo (média de  $100.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) em novembro (GEYER *et al.*, 1996). Essa vazão forma uma extensa pluma de água de baixa salinidade, penetrando até cerca de 230 km em direção ao Caribe em períodos de máxima descarga fluvial oceano Atlântico adentro (MASCARENHAS *et al.*, 2016). Stramma *et al.* (2003; 2005) citam a área de influência da pluma do Rio Amazonas como a região onde se efetua boa parte do transporte de calor e massa que ocorre entre os hemisférios. A variabilidade espacial e temporal da Pluma do Amazonas influencia diretamente tanto as condições da interação oceano-atmosfera, quanto à PP nas regiões adjacentes. A estimativa da produtividade primária a partir de dados *in situ*

demanda um grande investimento de tempo e recursos financeiros. O uso de modelos de PP a partir de dados de satélite contribui para ampliar esta informação tanto espacial quanto temporalmente.

## 1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo principal a estimativa espacial da produtividade primária na região da pluma do Rio Amazonas através da aplicação do modelo proposto por Behrenfeld-Falkowski (1997), utilizando dados de satélite do MODIS/Aqua e dados *in situ*.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Calibrar os dados de satélite a partir de dados *in situ*;
- Estimar a produtividade primária a partir de dados de satélite.
- Comparar os resultados de produtividade com e sem calibração de dados *in situ*.
- Comparar e analisar os resultados das campanhas CFIII e CFV.

## 2 SENSORIAMENTO REMOTO E OCEANOGRAFIA

O sensoriamento remoto consiste em um conjunto de tecnologias de captação e registro de informações através da absorção e emissão da radiação eletromagnética, neste processo não há contato direto com o objeto observado (FLORENZANO, 2011; HORNING, 2018; KWOK, 2018; LIU, 2007). Atualmente o sensoriamento remoto costuma utilizar sensores instalados em plataformas terrestres, aviões e satélites para caracterizar, identificar e compreender a superfície do planeta.

O aperfeiçoamento dessa ciência não ocorreu sozinho, se deu através de um esforço multidisciplinar que envolveu o avanço da física, química, engenharia, geociências, computação e diversas outras áreas (FLORENZANO, 2011). Para chegar ao ponto que se encontra hoje passou por um processo evolutivo que se iniciou com a criação da máquina fotográfica no século XIX, passou pelo registro de imagens de campos e cidades utilizando pombos correio e balões, pela criação do avião e de satélites artificiais (EMERY & CAMPS, 2017). Como a maioria das tecnologias existentes atualmente, houve um avanço muito maior durante períodos de guerra, dando ênfase a Segunda Guerra Mundial onde se começaram estudos na faixa do infravermelho com objetivo de detectar camuflagens e ao período da Guerra Fria em que houve o lançamento dos primeiros satélites artificiais (FLORENZANO, 2011). Em oceanografia o sensoriamento remoto representou uma revolução, atualmente é possível

detectar parâmetros derivados da cor do oceano como clorofila e material particulado em suspensão; batimetria, rugosidade, temperatura e salinidade da superfície do mar; altura de onda, cobertura de gelo, entre outros, com sensores instalados em plataformas espaciais (ACKER *et al.*, 2003; RAJEESH & DWARAKISH, 2015; ZHENG *et al.*, 2018).

O oceano é um imenso corpo de água que cobre cerca de 71% da superfície do planeta sendo de extrema importância para a regulação do clima, alimentação, navegação, turismo e para diversos outros processos econômicos e ecológicos. Tudo isso faz com que seja imprescindível que haja uma grande quantidade de dados sobre esse ambiente com ampla cobertura espacial e temporal, que só foi possível quando a oceanografia e o sensoriamento remoto deram as mãos. Porém, não foi um começo fácil, havia muita insegurança em relação a técnica. Os cientistas da época acreditavam no axioma de que se não era feito através de navios e dados *in situ* não era oceanografia (MUNK, 2000). Entretanto, se ainda hoje existem dificuldades para amostragem ampla e constante dos oceanos através da oceanografia tradicional, naquela época era bem mais complicado e o conhecimento muito mais escasso. MUNK (2000, p. 2), caracterizando a primeira fase da oceanografia moderna em uma única frase diz: “século de falta de amostragem”. Essa frase representa o século XX em que apesar do avanço científico e instrumental na área oceanográfica ainda havia muita dificuldade para monitorar e estudar os oceanos. Ele ainda completa dizendo “O que a oceanografia por satélites trouxe de mais importante não foram os sensores e nem mesmo a cobertura global, mas sim que pela primeira vez, os processos oceanográficos foram adequadamente amostrados” (MUNK, 2000, p. 3).

A primeira conferência para discutir as possibilidades de se conduzir pesquisas científicas sobre os oceanos a partir de dados obtidos do espaço ocorreu em 1964 e foi organizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Nessa conferência foram reunidas as informações obtidas até então e estabelecidas as primeiras diretrizes para essa nova forma de se fazer ciência (WILSON *et al.*, 2008). Em 1978 os EUA obtiveram sucesso no lançamento do primeiro satélite dedicado à observação e estudo dos oceanos, o SeaSat, que funcionou por cerca de 100 dias; a partir desse marco histórico inúmeros outros países se debruçaram no desenvolvimento de sensores, satélites e tecnologias voltadas para esse campo da ciência (ALLAN, 1981; ZHENG *et al.*, 2018).

Em meados dos anos 80, com o amadurecimento do sensoriamento remoto oceânico, pesquisadores da oceanografia se empolgavam com a ideia de não só observar os oceanos através dos satélites, mas também de poderem interpretar fisicamente o que estava sendo visto; ao mesmo tempo diante deles haviam dois imensos desafios a serem superados: como relacionar as informações bidimensionais, e praticamente superficiais oriundas dos satélites com um

oceano tridimensional e como lidar com a imensa quantidade de dados que seriam gerados (WILSON, 2008). Mal sabiam eles que, juntos, dados de satélite e *in situ*, ofereceriam base para entendimento de fenômenos de pequena e larga escala da atmosfera, da superfície e do interior dos oceanos; os dados obtidos pelo sensoriamento remoto se amparariam nos dados *in situ*, necessitando do respaldo destes para calibrar e validar as observações, testar a estabilidade do satélite ao longo do tempo e checar a consistência entre os diferentes conjuntos de dados antes de serem assimilados em modelos oceânicos (LE TRAON, 2011; LE TRAON *et al.*, 2015). Estes autores também não sabiam que a tecnologia iria avançar de tal forma que seria possível não só tratar e armazenar os dados como também distribuí-los para o meio científico através de plataformas *online*.

A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é medida através de satélites desde 1967 (RAJEESH & DWARAKISH, 2015), sendo considerada uma das variáveis mais importantes para os oceanógrafos, pois é ela que governa a troca de energia entre o oceano e a atmosfera, controlando o clima, a intensidade e trajetória de furacões (ACKER *et al.*, 2003; LE TRAON, 2011); além disso, é peça chave para a oceanografia operacional e para a assimilação de modelos oceânicos dinâmicos (LE TRAON, 2011). Em 1978 foi lançado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) a bordo do TIROS-N o primeiro *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), radiômetro de alta resolução com bandas multiespectrais na faixa do infravermelho (IR) termal (ACKER *et al.*, 2003). Esse tipo de sensor é amplamente utilizado na atualidade e sua principal vantagem é minimizar os efeitos dos gases atmosféricos na obtenção das imagens.

O primeiro instrumento capaz de medir a concentração de pigmentos fotossintéticos através de imagens do oceano foi o CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*). Esse scanner foi instalado no satélite Nimbus 7, lançado em outubro de 1978 e operou por 8 anos; em 1997 o sensor SeaWiFS (*Sea-Viewing Wide Field-of-View*), versão melhorada do CZCS, entra na órbita terrestre (ACKER *et al.*, 2003). Após o SeaWiFS foram lançados inúmeros outros satélites com sensores capazes de captar a atividade biológica na superfície oceânica, entretanto o lançamento do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), inicialmente em 1999 no satélite Terra e depois em 2002 no satélite Aqua, representou uma nova geração de sensores de cor dos oceanos. O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais enquanto o CZCS e o SeaWiFS possuíam 6 e 8 bandas respectivamente. Com maior resolução espacial, temporal e espectral, e maior acurácia nos dados obtidos, o MODIS representou um grande avanço para a oceanografia (ZHENG *et al.*, 2018).

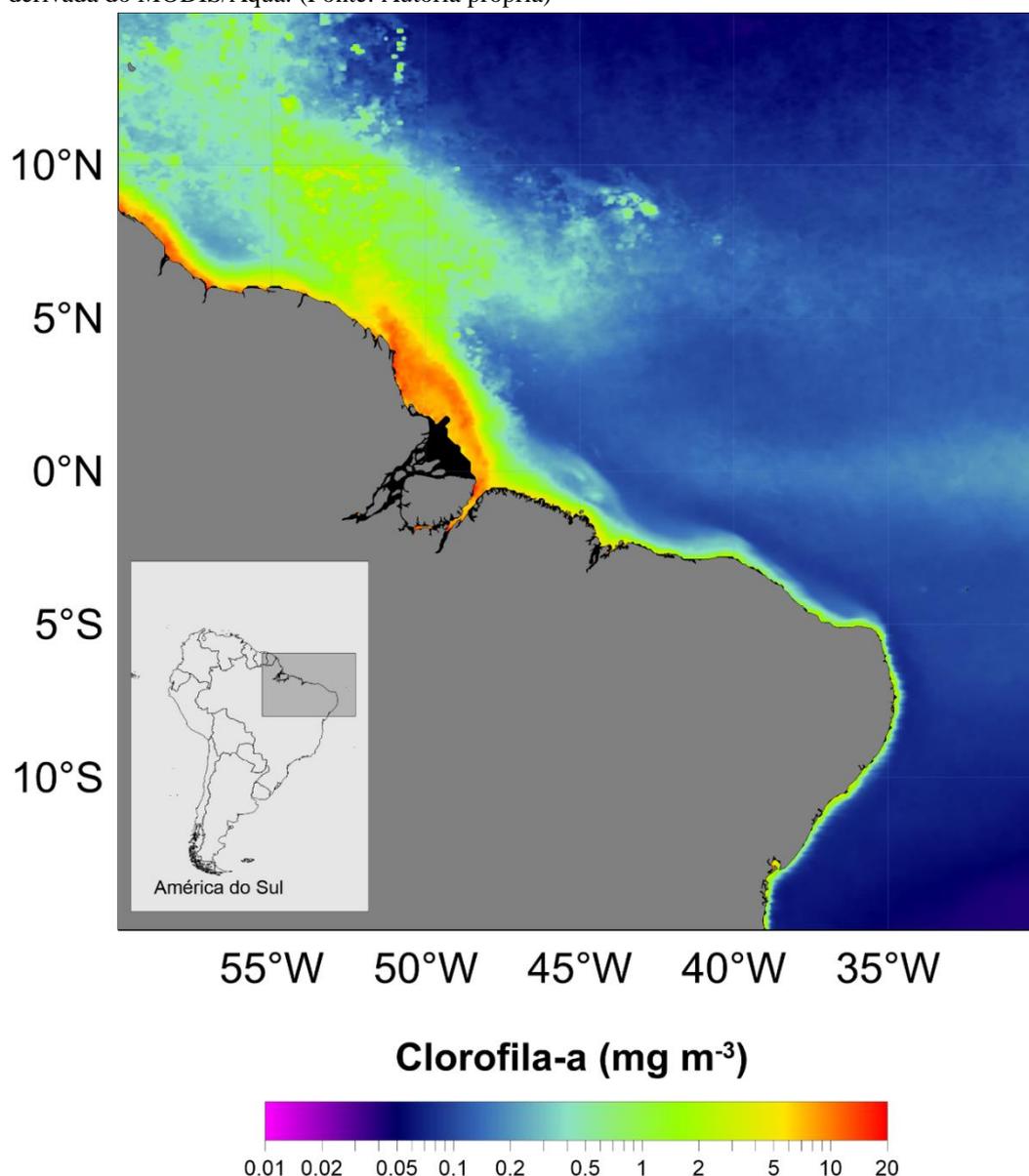
O desenvolvimento dos sensores de cor do oceano, tanto em resolução espacial e temporal, bem como melhoramento dos algoritmos deu um impulso nas pesquisas sobre produtividade primária do fitoplâncton (LEE *et al.*, 2015). A comunidade fitoplanctônica é a base da teia trófica e estão sujeitas à ação de diversos fatores (bióticos e abióticos) que alteram sua composição, biomassa e produtividade. As atividades realizadas por eles além de alimentar a vida nos oceanos, conduz ciclos biogeoquímicos e diminui o carbono atmosférico (SIGMAN & HAIN, 2012). Segundo Kirk (1994), o fitoplâncton possui a propriedade de ser opticamente ativo, o que viabiliza o uso da ferramenta do Sensoriamento Remoto e, através dos sensores de radiação, consegue fazer a análise e quantificação de pigmentos específicos do mesmo, tais como as clorofilas, carotenoides e ficobilinas. Dentre eles, o pigmento *Chl\_a* é o que mais se destaca como opticamente ativo, uma vez que está presente em todos os organismos fitoplanctônicos, permitindo a estimativa direta de sua biomassa (VINCENT *et al.*, 2004).

### 3 ÁREA DE ESTUDO: PLUMA DO RIO AMAZONAS

#### 3.1 Localização

O Rio Amazonas é o maior e mais caudaloso rio do planeta com uma bacia hidrográfica de aproximadamente 7.000.000 km<sup>2</sup>, nasce nos Andes Peruanos e desagua no Oceano Atlântico, apesar do território brasileiro possuir sua maior porção (63,88%) ele também passa pela Colômbia, Bolívia, Equador, Guiana, Peru e Venezuela (MMA, 2006). Ao longo de seu percurso, seu forte fluxo assoreia e carrega uma grande quantidade de sedimentos, além disso, ele recebe águas de vários outros rios e matéria orgânica proveniente da floresta no seu entorno. Localizada no setor oeste do Oceano Atlântico tropical entre as latitudes 5° S e 15° N e longitudes 30° E e 60° W (Figura 1), a pluma do Rio Amazonas, decorrente da enorme descarga de água doce, sedimentos e nutrientes possui características químicas, físicas, biológicas e geológicas específicas. Ela apresenta grande importância no sequestro de CO<sub>2</sub> da atmosfera (CHEN *et al.*, 2012; SUBRAMANIAM *et al.*, 2008), na manutenção e intensificação de ciclones tropicais (FFILED, 2007), e seu fluxo oceano adentro é intensamente influenciado pelo regime de ventos, descarga do rio e pelas correntes superficiais com destaque para a Corrente Norte de Brasil (CNB) (MULLER-KARGER *et al.*, 1988).

**Figura 1** - Mapa da área de estudo mostrando a distribuição de *Chl\_a* em  $\text{mg}/\text{m}^3$  (escala  $\log_{10}$ ) na pluma do Rio Amazonas. Média climatológica para os meses de junho a agosto (2008 a 2018) derivada do MODIS/Aqua. (Fonte: Autoria própria)



### 3.2 Características químicas, biológicas e geológicas

A comunidade fitoplanctônica muda ao longo da pluma do Rio Amazonas em decorrência da distribuição de nutrientes (SUBRAMANIAM, *et al.*, 2008). A região próxima à boca do estuário, início da pluma, é marcada pela dominância de diatomáceas (GOES *et al.*, 2014; SUBRAMANIAM, *et al.*, 2008; TEIXEIRA & TUNDISI, 1967; WOOD, 1966), Subramaniam *et al.* (2008) associa isso com a alta concentração de nutrientes com destaque para o silício, elemento essencial para a formação das carapaças desses organismos. Já nas

regiões em que a pluma tem mais contato com o oceano há o predomínio de organismos flagelados (SUBRAMANIAM, *et al.*, 2008; TEIXEIRA & TUNDISI, 1967; WOOD, 1966).

A Plataforma Continental Amazônica é a mais larga do Brasil, variando de 100 Km a 330 Km, sua profundidade varia de 80 m a 120 m (COUTINHO, 2000) e é marcada pela presença de sedimentos lamosos, canyons e de um extenso delta submarino em frente a Foz do Rio Amazonas (COUTINHO, 2000; DAMUTH & KUMAR, 1975). Segundo McKee *et al.* (2004) o Rio Amazonas está em primeiro lugar quanto a descarga de sedimentos no oceano, esses sedimentos podem ser formados por material orgânico ou inorgânico, permanecer na superfície como material particulado em suspensão, se dissolver ou afundar cobrindo a superfície da plataforma. Nittrouer *et al.* (1986) atentam para a importância de estudos sobre a turbidez provocada pelo sedimento suspenso associado a grandes sistemas de dispersão como as plumas, eles falam que o estudo da turbidez é essencial para a compreensão de uma ampla gama de processos químicos, biológicos e geológicos.

Apesar da riqueza de nutrientes a produtividade primária pode ser limitada pela elevada concentração de material particulado em suspensão, pois partículas na água restringem a entrada da luz necessária para a fotossíntese. Segundo Smith e Demaster (1996) a pluma do Rio Amazonas pode ser dividida em três zonas de acordo com a turbidez e a salinidade. A primeira, por ser diretamente afetada pela descarga fluvial, é rica em nutrientes e possui baixa salinidade, entretanto, a alta turbidez limita a atividade fotossintética. A segunda zona é marcada por possuir alta produtividade primária, ela representa a transição entre águas costeiras e oceânicas, portanto, além de possuir os nutrientes necessários ainda permite a entrada de luz suficiente para que a fotossíntese aconteça. A terceira zona é dominada por água oceânica, sendo assim, possui alta salinidade, baixa turbidez, poucos nutrientes e baixa produção fitoplanctônica.

Na maioria dos sistemas aquáticos a respiração dos organismos supera a produção primária bruta, devido a isso grande parte de rios e estuários são fontes de CO<sub>2</sub>, entretanto, a alta taxa de atividade fotossintética faz com que plumas de rios exerçam papel contrário, sendo assim consideradas sumidouros (CHEN *et al.*, 2012). As águas do Rio Amazonas são supersaturadas de CO<sub>2</sub> tornando esse ambiente fonte desse gás para a atmosfera (RICHEY *et al.*, 2002). Ao se analisar o início da pluma, ambiente caracteristicamente estuarino, rico em nutrientes, mas com baixa atividade fotossintética devido á turbidez provocada pela descarga é possível inferir que essa região é fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Já a região onde águas estuarinas e oceânicas se misturam, classificada como zona II por Smith e Demaster (1996), é considerada uma região de sumidouro devido as altas taxas fotossintéticas (TERNON *et al.*,

2000), por outro lado, Subramaniam *et al.* (2008) falam que a intensa fixação de nitrogênio nesta região é o principal caminho de sequestro de CO<sub>2</sub> pela pluma.

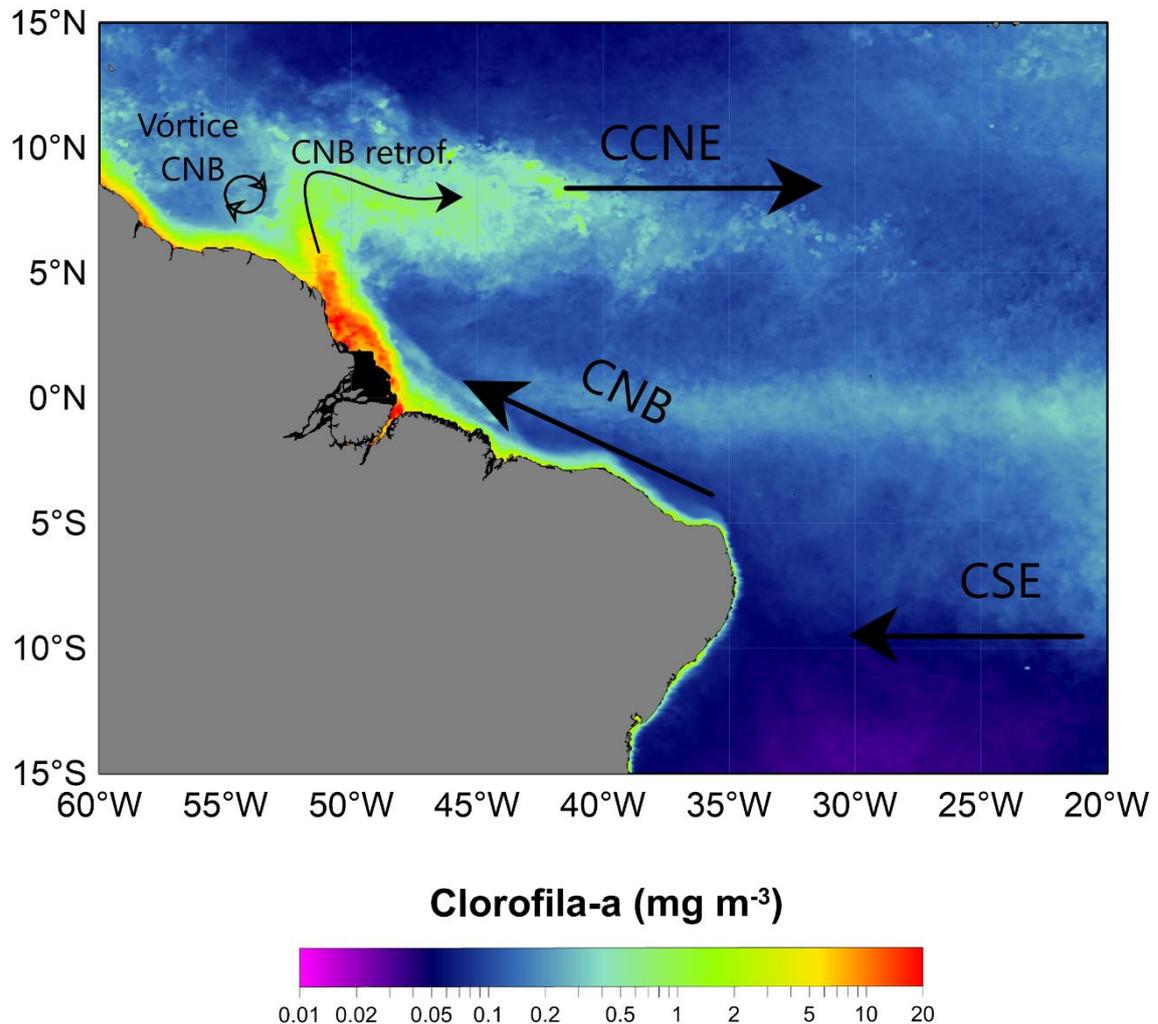
Em seu trabalho Santos e Medeiros *et al.* (2008) analisam variáveis químicas e biológicas das águas na plataforma do Rio Amazonas. Eles observaram a presença de uma termoclina permanente, com limite inferior a 100 m de profundidade. Suas análises de oxigênio dissolvido e saturado apresentam valores altos na região costeira que diminuem em direção ao oceano aberto, fato relacionado à descarga do rio, sedimentação fora da área de descarga e atividade fotossintética; além disso, em áreas oceânicas, altas concentrações de oxigênio dissolvido foram observadas em regiões mais profundas, provavelmente onde ainda há luz suficiente para a ocorrência de fotossíntese. Nutrientes inorgânicos foram encontrados até 120 km da costa, sendo que as concentrações de silicatos foram mais significativas e o nitrato foi a forma dominante do nitrogênio.

As águas da pluma são marcadas por possuírem baixa salinidade quando comparadas com as águas oceânicas ao redor (GOES *et al.*, 2014; LENTZ & LIMEBURNER, 1995; HELLWEGER & GORDON, 2002), esse parâmetro pode funcionar como marcador. Isso permitiu a alguns autores acompanhar a dispersão da pluma e concluir que durante alguns meses do ano, devido à dinâmica de correntes e descarga do rio, as águas do Amazonas chegam a locais como o Mar do Caribe, Barbados e Porto Rico (HELLWEGER & GORDON, 2002).

### **3.3 Hidrodinâmica e climatologia**

A pluma do Rio Amazonas possui diferentes padrões de dispersão sazonal. Em seu trabalho Muller-Karger *et al.* (1988) utilizando boias e imagens do CZCS puderam acompanhar o deslocamento da pluma ao longo do ano. Eles constataram que em alguns meses a concentração de pigmentos fotossintéticos e sedimentos são transportados ao longo da costa até sofrerem retroflexão para leste, nos demais meses o fluxo segue para norte. Eles concluem que esse padrão de dispersão está diretamente relacionado com a dinâmica de correntes e descarga do rio.

**Figura 2:** Representação esquemática da dinâmica das principais correntes superficiais que influenciam na área de estudo, juntamente com um vórtice formado pela retrofleção da CNB. Média climatológica de Chl\_a para o mês de setembro (2008 a 2018) derivada do MODIS/Aqua. (Fonte: Autoria própria)



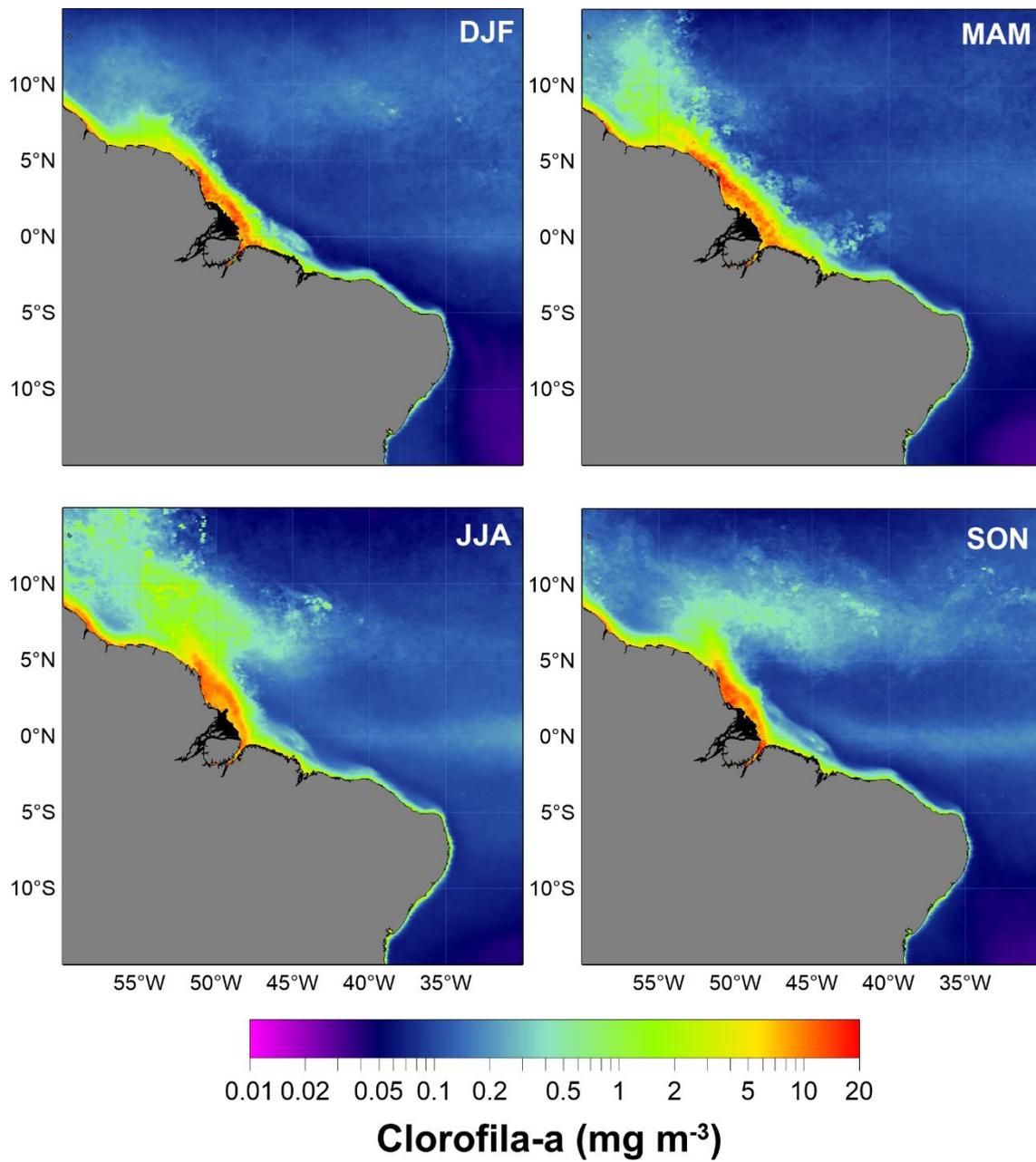
A CNB é uma intensa corrente de borda oeste e domina a circulação na região da pluma do Amazonas. Essa corrente é alimentada pela Corrente Sul Equatorial (CSE) e se desloca para norte onde entre 6°N e 8°N, de setembro a dezembro, a maior parte do seu fluxo sofre retroflexão alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) e produzindo vórtices (FRATANTONI & RICHARDSON, 2006; HELLWEGER & GORDON, 2002) (Figura 2). Segundo Garzoli *et al.* (2004) a retroflexão existe o ano inteiro, entretanto é mais intensa no outono boreal. Nos demais meses do ano, a maior parte do fluxo da corrente continua para norte e alimenta a Corrente das Guianas (CG) (STRAMMA & SCHOTT, 1997). Correntes de superfície, como as citadas anteriormente, são formadas pela tensão de cisalhamento do vento. A região de estudo se encontra dentro da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), local onde os ventos alísios se encontram, portanto, essa dinâmica sazonal da CNB se deve ao enfraquecimento, ora dos alísios de nordeste ora dos alísios de sudeste.

Outro fator importante é a descarga do Rio Amazonas que está diretamente relacionada com os índices de precipitação na região. A ZCIT é uma forte zona de evaporação e devido a confluência dos ventos as nuvens ficam retidas nesse local contribuindo para grandes índices pluviométricos, entretanto ela se desloca latitudinalmente ao longo do ano sobre o Atlântico Equatorial em função da temperatura da superfície do mar (TSM) (AIMOLA & MOURA, 2016). Nos meses de junho a setembro, verão no Hemisfério Norte, quando a TSM no Atlântico Sul está mais baixa ela migra para norte; já nos meses entre dezembro e março, verão no Hemisfério Sul e TSM mais alta nessa região ela se desloca para o sul provocando as maiores descargas fluviais do ano. Apesar de sua grande influência a ZCIT não está sozinha na determinação do clima, entre os demais fatores que colaboram, um dos mais importantes para variações interanuais é *El Niño* -Oscilação Sul (ENOS).

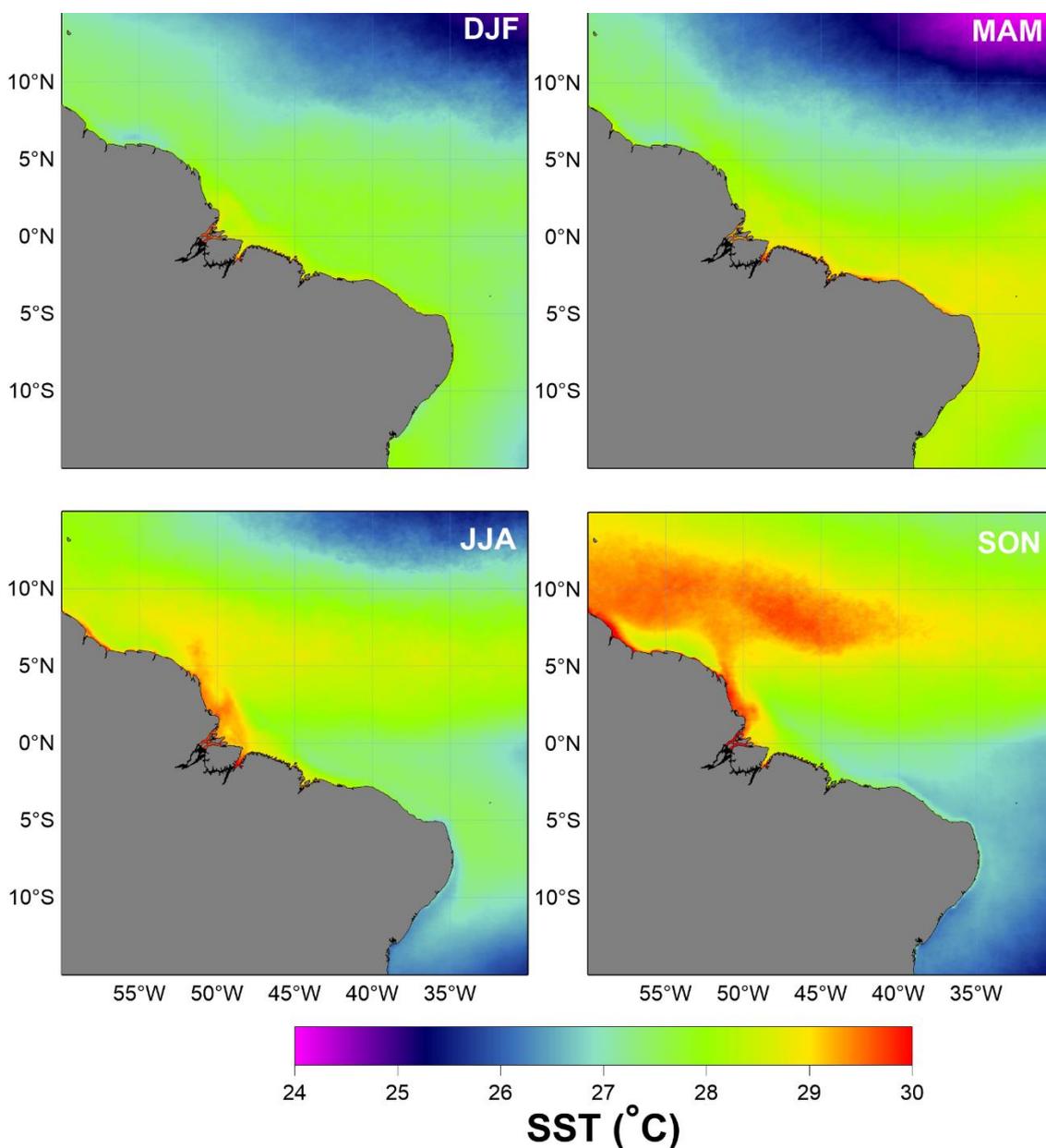
O ENOS é formado por dois fenômenos individuais que possuem forte conexão, a Oscilação Sul e o *El Niño*. A Oscilação Sul é a variação das zonas de alta e baixa pressão sobre o Oceano Pacífico gerando anomalias positivas em que há o enfraquecimento dos ventos alísios e o aquecimento da TSM (*El Niño*), ou anomalias negativas que são caracterizadas pelo fortalecimento dos alísios e resfriamento da TSM no Oceano Pacífico (*La Niña*) (GARRISON, 2010). Anomalias positivas do ENOS provoca os menores índices pluviométricos anuais na região da Amazônia enquanto que anomalias negativas favorecem o aumento de precipitações (HOUNSOU-GBO, *et al.*, 2016; MARENGO & HASTENRATH, 1993; MARENGO, *et al.*, 2001; MOLION, 1987; NOBRE, *et al.*, 2007; RAO & HADA, 1990).

A média climatológica trimestral de 2008 a 2018 mostra a concentração e dispersão da *Chl\_a* ao longo do ano (Figura 5). Durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro a *Chl\_a* é mantida acumulada sobre a plataforma, provavelmente devido a intensidade dos ventos alísios de nordeste, mais fortes nessa época do ano. Em março, abril e maio ela se estende para noroeste, além da plataforma. Junho, julho e agosto são marcados por uma dispersão além da plataforma continental em um padrão de retroflexão indo para leste. Já a média climatológica para os meses de setembro, outubro e novembro mostra a maior parte da *Chl\_a* sendo levada pela retroflexão.

**Figura 3:** Média climatológica trimestral (2008 a 2018) da concentração de *Chl\_a* (escala  $\log_{10}$ ) derivada do MODIS/Aqua. (Fonte: Autoria própria)

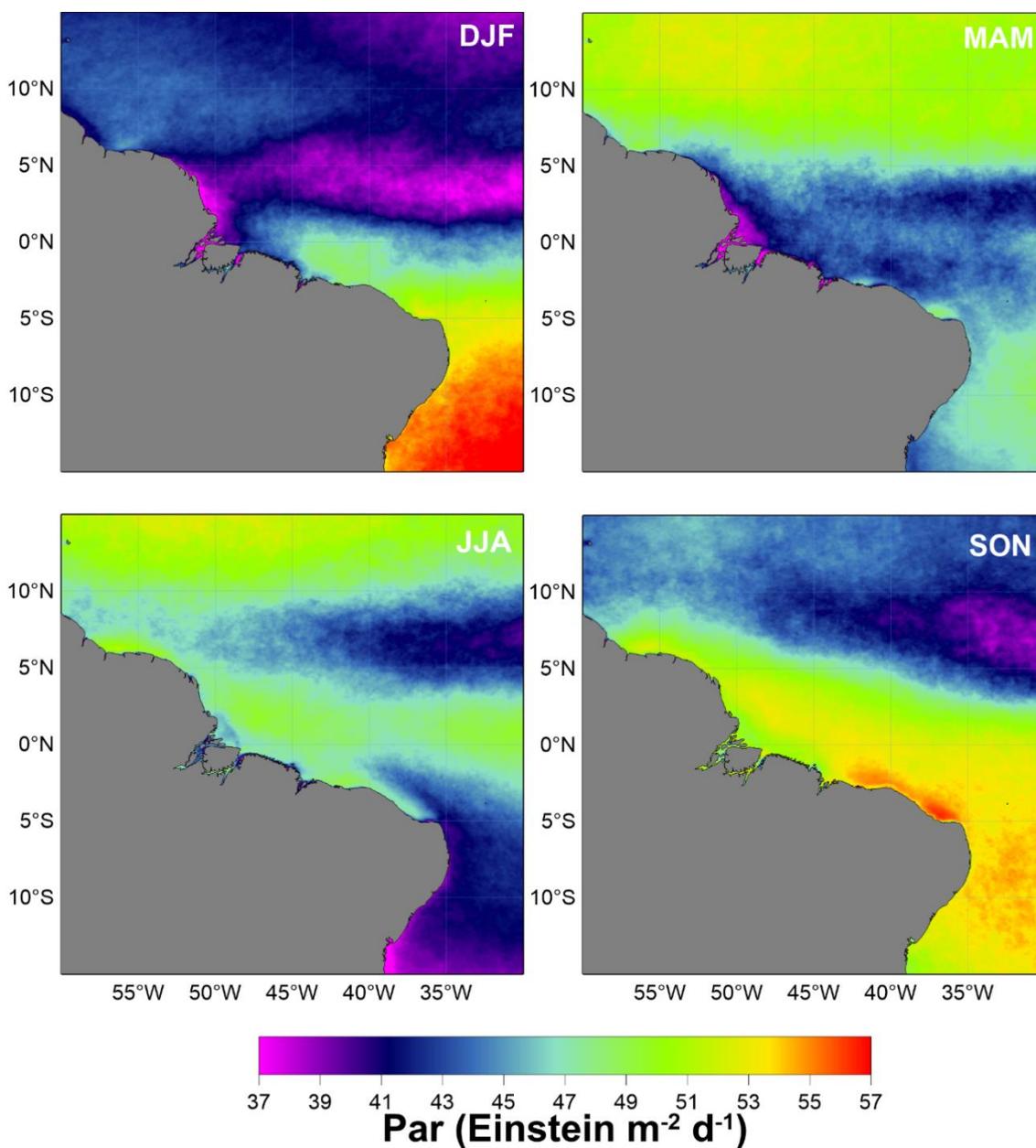


**Figura 4:** Média climatológica trimestral (2008 a 2018) de TSM derivada do MODIS/Aqua. (Fonte: Autoria própria)



A média climatológica trimestral da TSM de 2008 a 2018 mostra a sua intensidade e dispersão ao longo do ano (Figura 6). A TSM variou de 24°C a 30°C ao longo do ano sendo que os meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio apresentam as menores temperaturas (de 25,5°C a 28°C) entre 5°N e 10°N. A TSM aumenta no período de junho, julho e agosto, com boa parte da região ficando com temperaturas entre 28°C e 29°C. Já os meses de setembro, outubro e novembro apresentam temperaturas altas na maior parte da área de estudo, entre 28°C e 30°C, sendo que as maiores temperaturas apresentam uma dispersão similar à de *Chl\_a* no mesmo período (Figura 5).

**Figura 5:** Média climatológica trimestral (2008 a 2018) de PAR derivada do MODIS/Aqua. (Fonte: Autoria própria)



A figura 7 mostra a média climatológica trimestral da radiação fotossinteticamente ativa (RFA, ou PAR como é mais conhecida) do ano de 2008 a 2018. Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro apresentam os menores valores na região de estudo (entre 37 e aproximadamente 45 Einstein m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). A média climatológica de março, abril e maio mostra maiores valores na área de estudo que o trimestre anterior (entre 41 e aproximadamente 52 Einstein m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Nos meses de junho, julho e agosto o PAR variou de 37 e aproximadamente 53 Einstein m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, sendo que

entre 5°N e 10°N ele foi mais baixo. Os maiores valores ocorreram nos meses de setembro, outubro e novembro tanto na linha do Equador quanto ao sul e um pouco ao norte, até 5°N.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Dados *in situ* e de satélite

A base de dados *in situ* utilizada para o trabalho é proveniente dos cruzeiros oceanográficos CFIII e CFV realizados pelo Navio Oceanográfico Cruzeiro do Sul – H 38 da Marinha do Brasil. Esses dados são referentes ao período de coleta na região de estudo, de 09 de outubro a 01 de novembro de 2012 e de 18 a 24 de setembro de 2014, CFIII e CFV respectivamente. Através desses cruzeiros variados parâmetros foram obtidos, como temperatura, salinidade, radiação solar, além da concentração de clorofila. Eles estão inseridos em uma série de grandes projetos desenvolvidos ao longo da Plataforma Continental Amazônica, tais como o Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVIZEE) e o projeto Ambientes Marinhos Tropicais: Heterogeneidade Espaço-Temporal e Respostas à Mudanças Climáticas (INCTAmbTropic).

A obtenção dos dados bióticos e abióticos derivados de imagens de satélite foram através do sensor MODIS. O seu funcionamento se dá através da quantificação da concentração de vegetais na superfície marinha e a consequente variabilidade na cor dos oceanos, com o intuito de avaliar a contribuição do oceano em questão no ciclo global do carbono e outros processos bioquímicos. O sensor MODIS faz parte de um projeto denominado Aqua, que tem como objetivo principal fornecer dados quantitativos bióticos e abióticos dos oceanos como subsídio para a comunidade científica. Para esse trabalho houve a utilização dos dados de concentração de *Chl\_a*, TSM e PAR. Com exceção dos demais parâmetros, os dados de TSM serão oriundos do sensor AVHRR a bordo dos satélites do projeto NOAA.

A estimativa da produção primária se baseou no protocolo de Behrenfeld-Falkowski (1997), que relaciona a limitação de distribuição vertical do fitoplâncton à quantidade de luz disponível e a concentração de nutrientes na coluna d'água. O resultado disso é a correlação direta entre a concentração de clorofila na coluna d'água e na camada superficial, desta forma, tanto mensurar o teor de clorofila na superfície como acima da profundidade da zona eufótica ( $Z_{eu}$ ), pode ser usado como uma medida de estimativa de PP e biomassa fitoplanctônica.

## 4.2 Modelo De Produtividade Verticalmente Generalizado (VGPM)

Proposto por Behrenfeld-Falkowski (1997), o Modelo de Produtividade Verticalmente Generalizado ou, como conhecido na literatura, Vertically Generalized Production Model (VGPM), é um algoritmo baseado na quantidade de *Chl* e normalmente utilizado para estimar a PPL oceânica. Como pode ser observado na relação abaixo, a PPL representa uma taxa que varia de forma previsível com a *Chl*:

$$PPL = f(Chl) \quad (1)$$

Para que o cálculo da produtividade seja efetuado através do VGPM há a necessidade dos seguintes dados de entrada: *Chl*, TSM e PAR. Essas variáveis são essenciais para a resolução da equação abaixo:

$$PPL = C_{sat} * p_{opt}^b * H * FV \quad (2)$$

Onde:

$C_{sat}$  é a concentração superficial de *Chl* derivada por satélite;

$p_{opt}^b$  é o campo fotossintético ótimo (uma função polinomial de sétima ordem da TSM);

H é o comprimento do dia em horas;

FV é a função de volume.

O  $C_{sat}$  é correlacionado com a biomassa fitoplanctônica na coluna d'água e é calculado como se segue:

$$C_{sat} = \frac{\int_0^{Zpd} c(z).exp(-2KZ)dz}{\int_0^{Zpd} exp(-2KZ)dz} \quad (3)$$

Em que:

K é o coeficiente de atenuação da luz solar;

Zpd é a profundidade de penetração da luz;

Z é a profundidade.

A variável  $p_{opt}^b$  pode ser denominada como a PPL máxima diária encontrada dentro de uma coluna d'água, ela é parâmetro chave para modelar a produção primária fitoplanctônica (BEHRENFELD-FALKOWSKI, 1997).

O interesse do VGPM é fornecer a PP integrada na coluna d'água por unidade de área oceânica, pois só assim há a possibilidade de se realizar estudos de produtividade nos oceanos e entender sua relação com o ciclo do carbono e com o ecossistema (BEHRENFELD-FALKOWSKI, 1997). Para isso, foi inserida nesse modelo uma “função de volume” que projeta os valores de PPL da superfície na coluna d'água. A equação abaixo representa a FV e mostra que há uma grande dependência da PPL com relação à luz:

$$FV = f(PAR) * Z_{eu} \quad (4)$$

O  $Z_{eu}$  é a profundidade eufótica, ele representa a profundidade que vai desde a superfície até onde 1% da luz solar chega dentro do oceano. O termo  $f(PAR)$  pode ser entendido como a proporção de PPL integrada na coluna d'água quando as taxas fotossintéticas são mantidas no máximo, ele foi determinado empiricamente e pode ser dado por:

$$f(PAR) = 0.66125 * \frac{PAR}{PAR+4,1} \quad (5)$$

Substituindo os termos das equações acima dentro da equação (2) obtemos a equação básica do VGPM:

$$NPP = Chl * p_{opt}^b * H * \left[ \frac{0.66125 * PAR}{PAR+4,1} \right] * Z_{eu} \quad (6)$$

### 4.3 Clorofila - a ( $Chl_a$ )

A cor dos oceanos é definida pela presença de elementos orgânicos na sua superfície, esses elementos, por serem opticamente ativos conseguem ser detectados através de radares presentes em satélites (MOREL & PRIEUR, 1977). A  $Chl_a$ , um dos elementos mais abundantes, é a principal variável biofísica derivada das imagens de cor do oceano.

Os dados de  $Chl_a$  foram obtidos online através da plataforma NASA Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). O algoritmo utilizado por eles fornece a concentração de  $Chl_a$  próximo a superfície em  $mg/m^3$ , esse algoritmo relaciona medidas *in situ* e a reflectância detectada pelo sensor na região do azul e verde do espectro visível. As imagens utilizadas nesse trabalho possuem resolução espacial de 4 km e foram obtidas pelo MODIS/Aqua. São imagens

diárias pertinentes ao período dos cruzeiros oceanográficos CFIII e CFV na pluma do Rio Amazonas.

#### **4.4 Temperatura Da Superfície Do Mar (TSM)**

A medida da TSM é realizada através da detecção da radiação do oceano em dois ou mais comprimentos de onda dentro da faixa infravermelho do espectro eletromagnético (RAJEESH & DWARAKISH, 2015). O AVHRR opera atualmente em satélites meteorológicos de órbita polar, ele oferece uma resolução horizontal de 1 km e cobertura global, entretanto sua precisão é limitada pela qualidade radiométrica e pela correção atmosférica (LE TRAON, 2011).

Os dados de TSM foram obtidos através da plataforma Coastwatch NOAA disponível em <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov>. Derivados do sensor AVHRR, eles possuem 4 km de resolução espacial e são referentes ao período dos cruzeiros oceanográficos CFIII e CFV na pluma do Rio Amazonas.

#### **4.5 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)**

O PAR é a fração do espectro eletromagnético que pode ser captado pelos cloroplastos para a realização da fotossíntese, na faixa de 400 a 700 nm (ASSIS & MENDEZ, 1989). Esses dados foram obtidos através da plataforma NASA Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). O algoritmo que eles utilizam pode ser aplicado a qualquer sensor de cor do oceano e ele estima a média diária de radiação fotossinteticamente disponível na superfície do mar em Einstein  $m^{-2} d^{-1}$ .

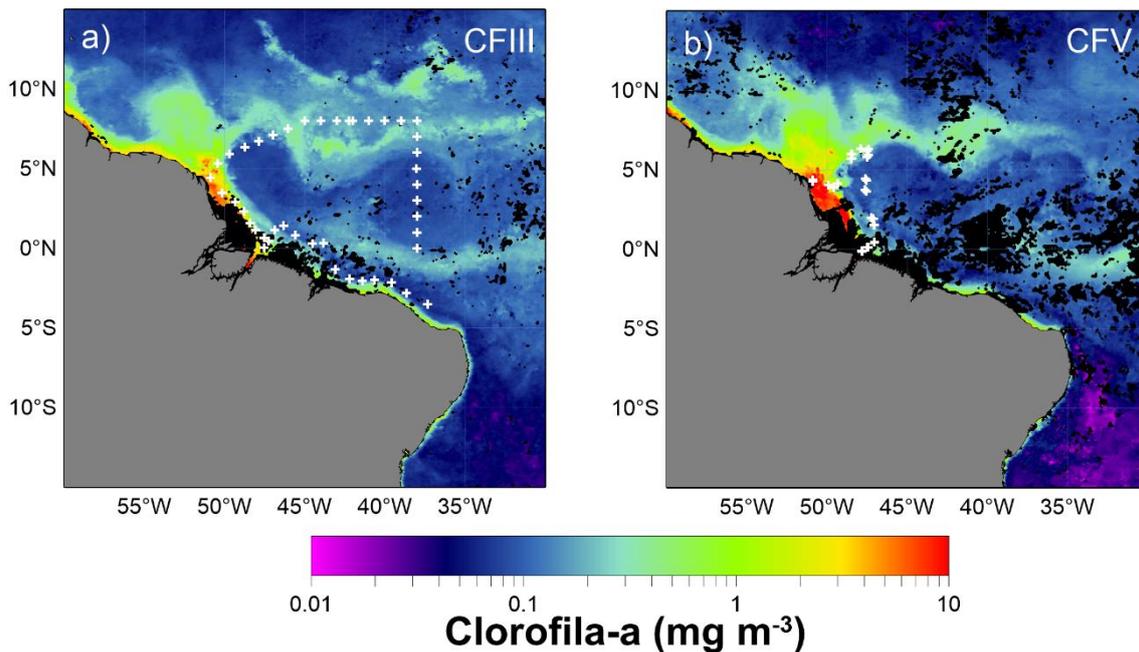
#### **4.6 Tratamento dos dados**

Inicialmente os dados de *Chl\_a* e TSM foram analisados e processados com o software SeaDAS 7.4 fornecido pela NASA, disponível em <https://seadas.gsfc.nasa.gov>. A etapa principal do trabalho consistiu na aplicação e calibração do algoritmo do modelo VGPM para a região da Pluma do Rio Amazonas inferindo a biomassa fitoplanctônica, seguindo um cálculo de produção primária. A calibração do modelo foi feita através de uma correlação linear entre os dados estimados pelo algoritmo e os dados bióticos e abióticos obtidos nos cruzeiros oceanográficos.

## 5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da estimativa da PPL na pluma do Rio Amazonas, a partir de dados de satélite. Os resultados estão divididos baseados nas duas campanhas oceanográficas CFIII e CFV. Para cada campanha a PPL foi calculada utilizando dados de satélite sem ajuste e ajustados por dados *in situ*. A figura 6 ilustra a distribuição dos pontos de coleta dos dados *in situ* nas campanhas oceanográficas CFIII (Figura 6.a) e CFV (Figura 6.b).

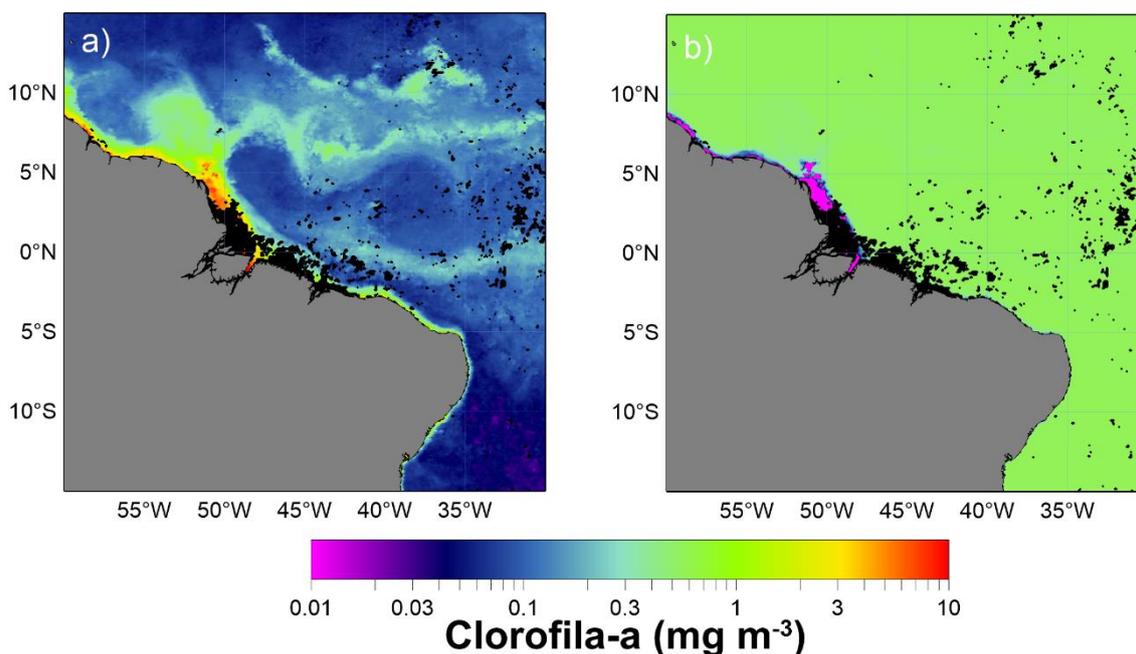
**Figura 6:** Locais onde foram coletados dados de *Chl\_a* durante o CFIII (a) e CFV (b). (Fonte: Autoria própria)



### 5.1 Camadas finas III

Durante o CFIII foram amostrados 45 pontos que se distribuíram ao longo da costa do Brasil em direção ao norte desde a latitude de aproximadamente 5° S até cerca de 5° N onde segue para leste até aproximadamente 42° W, local onde desvia para sul (Figura 6.a). A figura 7.a apresenta a distribuição de *Chl\_a* a partir de dados de satélite, sem nenhum tratamento, para o período do CFIII, já a figura 7.b representa a distribuição de *Chl\_a*, após os dados de satélite serem corrigidos de acordo com os dados *in situ* coletados nos 45 pontos apresentados na figura 6.a.

**Figura 7:** Representação da distribuição de *Chl\_a* na área de estudo em  $\text{mg m}^{-3}$  (escala log) durante o CFIII. Em a) dados de satélite sem correção e em b) dados de satélite corrigidos a partir de dados *in situ*. (Fonte: Autoria própria)



A figura 7.a deixa bem visível a distribuição da pluma do Rio Amazonas através dos pigmentos fotossintéticos captados pelo satélite durante os meses de outubro e novembro de 2012, período de ocorrência do CFIII na região. A pluma se espalha para norte em um formato circular e uma parte dela segue para norte ao longo da costa e outra parte para leste em direção ao oceano. A primeira parte da pluma, próxima à boca do estuário, apresenta os maiores valores de *Chl\_a* (de 3 a  $10 \text{ mg m}^{-3}$ ), a medida que ela se dispersa os valores vão diminuindo ficando entre aproximadamente 0,3 e  $2 \text{ mg m}^{-3}$ . O oceano em torno da região de dispersão da pluma apresenta as menores concentrações de *Chl\_a* (valores menores que  $0,1 \text{ mg m}^{-3}$ ).

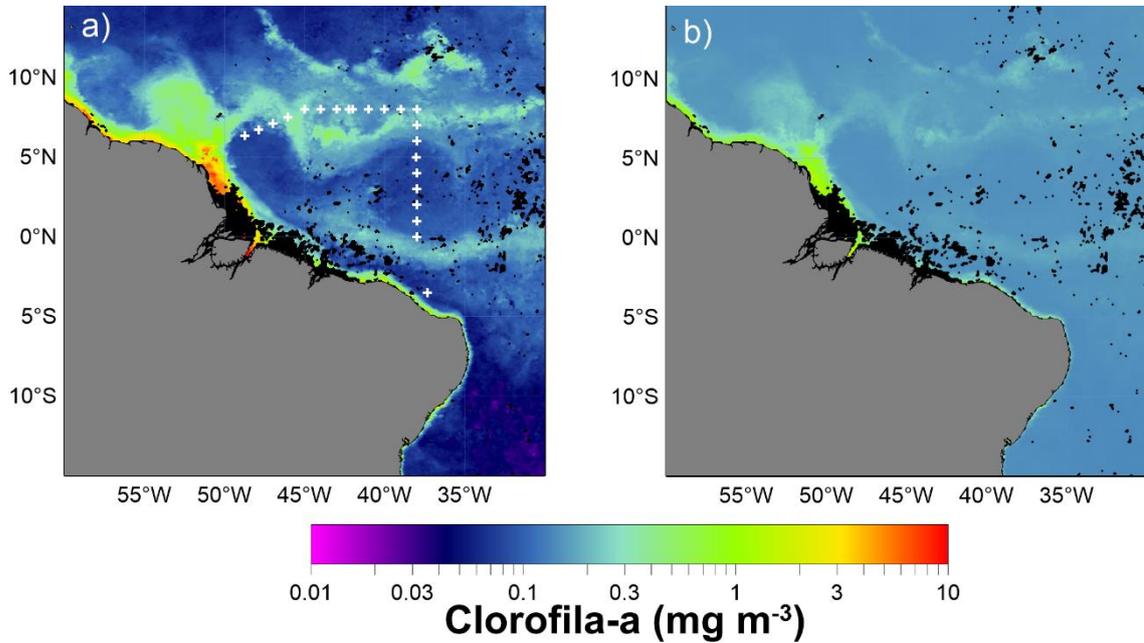
A figura 7.b além de omitir a dispersão da pluma mostra que as menores concentrações de *Chl\_a* estão no início da mesma ( $0,01 \text{ mg m}^{-3}$ ) e as maiores ocupam praticamente toda a plataforma continental e oceano adjacente (aproximadamente  $1 \text{ mg m}^{-3}$ ).

Enquanto que na figura 7.b há a representação da concentração de *Chl\_a* ajustada com todos os dados de clorofila obtidos durante o CFIII, a figura 8.b mostra a concentração de *Chl\_a* ajustada somente com os dados *in situ* fora da influência da descarga do rio (pontos representados em 8.a).

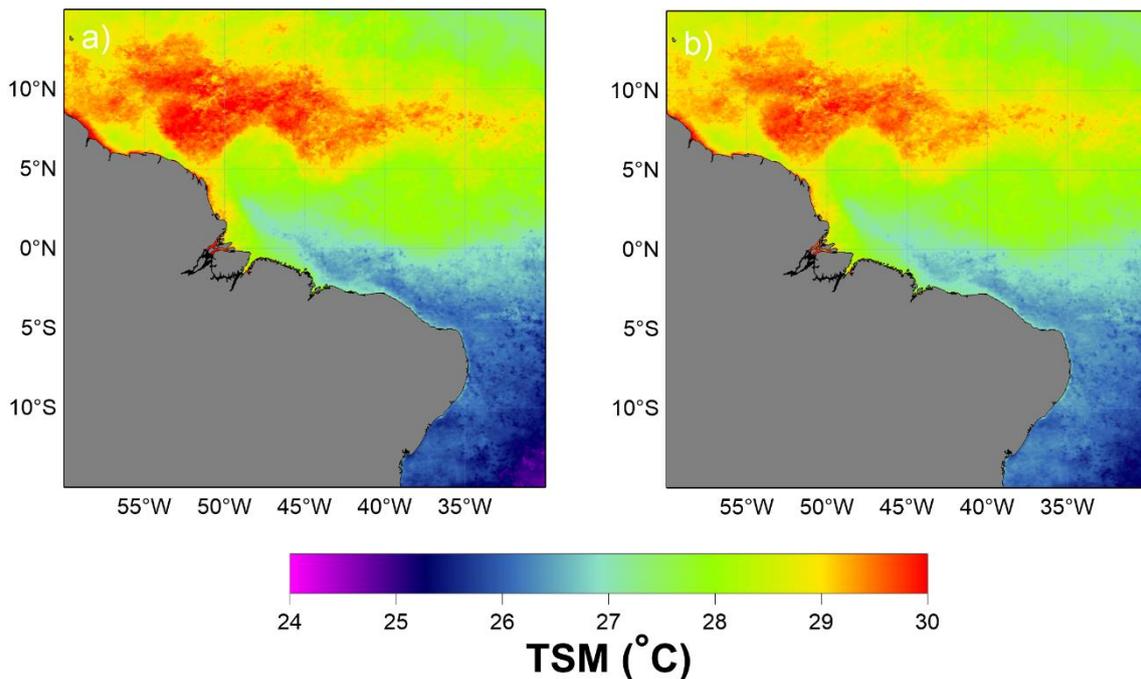
Através de 8.b é possível observar que os maiores valores de *Chl\_a* estão próximas a região de descarga e ao longo da costa indo em direção ao norte (concentrações próximas a  $1 \text{ mg m}^{-3}$ ). Seguindo para a formação circular de pigmentos próximo à latitude de  $-10^\circ \text{ N}$  e depois para leste onde há uma diminuição na concentração (valores próximos à  $0,3 \text{ mg m}^{-3}$ ). As

menores concentrações de *Chl\_a* estão distribuídas ao longo da maior parte do oceano (concentrações aproximadas de  $0,2 \text{ mg m}^{-3}$ ).

**Figura 8:** Representação da distribuição de *Chl\_a* na área de estudo em  $\text{mg m}^{-3}$  (escala log) durante o CFIII. Em a) distribuição dos pontos de coleta dos dados *in situ* sem os pontos próximos à costa (SPC), plotados sobre os dados de satélite sem correção e em b) dados de satélite corrigidos a partir dos dados *in situ*, apresentados em a. (Fonte: Autoria própria)



**Figura 9:** Representação da distribuição da TSM em  $^{\circ}\text{C}$  na área de estudo durante o cruzeiro oceanográfico CFIII. Em a) dados de TSM do satélite sem tratamento e em b) corrigidos a partir de dados *in situ*. (Fonte: Autoria própria)



**Tabela 1:** Descrição estatística dos dados de *Chl\_a* (*in situ* e de satélite e da correlação entre eles) dos Cruzeiros Oceanográficos CFIII, com e sem os pontos de coleta ao longo da costa (SPC) e CFV. (Fonte: Autoria própria)

Dados	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Desvio Padrão	N amostral	r <sup>2</sup>	ρ de Pearson
<b>CFIII <i>in situ</i></b>	0,94	0,02	0,07	0,02	0,16	45	0,0006	-0,02
<b>CFIII satélite</b>	5,52	0,06	0,57	0,15	1,22			
<b>CFIII <i>in situ</i> (SPC)</b>	0,3	0,02	0,04	0,02	0,06	24	0,026	0,16
<b>CFIII satélite (SPC)</b>	0,32	0,06	0,14	0,13	0,07			
<b>CFV <i>in situ</i></b>	0,17	0,06	0,11	0,11	0,04	21	0,77	0,88
<b>CFV satélite</b>	4,4	0,09	0,72	0,16	1,27			

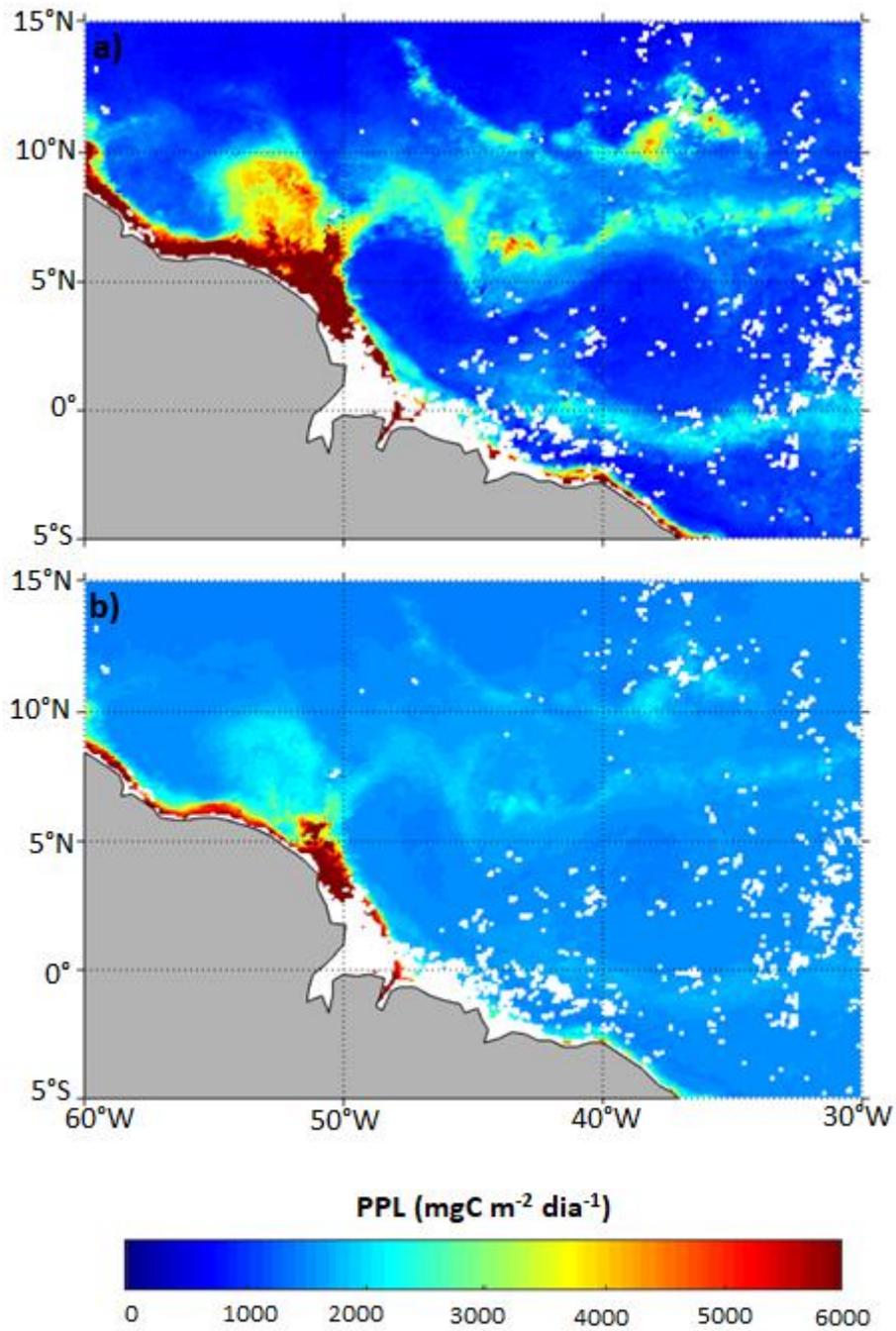
As figuras 9.a e 9.b são muito parecidas entre si, a maior diferença pode ser notada entre as latitudes 5° N e 15° N, local onde são identificadas as maiores temperaturas (de 28 °C a 30 °C). Nessa região a figura 9.b apresenta valores um pouco menores que 9.a. Para ambas as imagens as menores temperaturas se encontram abaixo da pluma (entre 24 °C a 27 °C para 9.a e de 25 °C a 27 °C para 9.b).

A tabela 1 apresenta uma descrição estatística dos dados de *Chl\_a in situ* e de satélite, assim como relações existentes entre eles, para as duas campanhas oceanográficas. No caso do CFIII, foram realizadas análises para dois grupos: um deles possui 45 amostras distribuídas de acordo com a figura 6.a e o outro, com 24 amostras, utiliza os mesmos dados do primeiro grupo, entretanto houve a retirada daqueles que se distribuía ao longo da costa sobre a plataforma (Figura 8.a). Em todos os casos os dados de satélite foram superiores aos dados *in situ*, principalmente quando se compara o CFIII que possui todos os pontos de coleta. Nesse caso o r<sup>2</sup> é muito baixo e a correlação de Pearson é negativa. Já a comparação entre os resultados estatísticos obtidos pela análise dos dados SPC mostra que apesar do r<sup>2</sup> e da correlação de Pearson continuarem baixos são superiores ao primeiro grupo e a correlação de Pearson não é mais negativa.

A figura 10 apresenta a distribuição da PPL na região da pluma do Amazonas obtida através da aplicação do modelo VGPM. A aplicação do modelo em 10.a ocorreu com dados de satélite que não foram corrigidos através de dados *in situ*, já em 10.b os dados foram corrigidos. As duas figuras apresentaram distribuição similar de PPL, o que as difere é a concentração, a maior parte dos valores apresentados em 10.a são superiores aos de 10.b.

Os maiores valores de PPL foram registradas próximas ao início da pluma e ao longo da costa, os valores variam de 4.000 a 6.000  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em ambas as figuras, contudo 10.a apresenta uma área maior com essas concentrações. Altas concentrações de PPL seguem a retroflexão indo para leste, valores entre 3.000 a 4.500  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para 10.a e aproximadamente 2.500  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para 10.b. O oceano ao redor da pluma apresenta os menores valores, indo de concentrações próximas a zero até cerca de 1.000  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 10.a e cerca de 2.000  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 10.b.

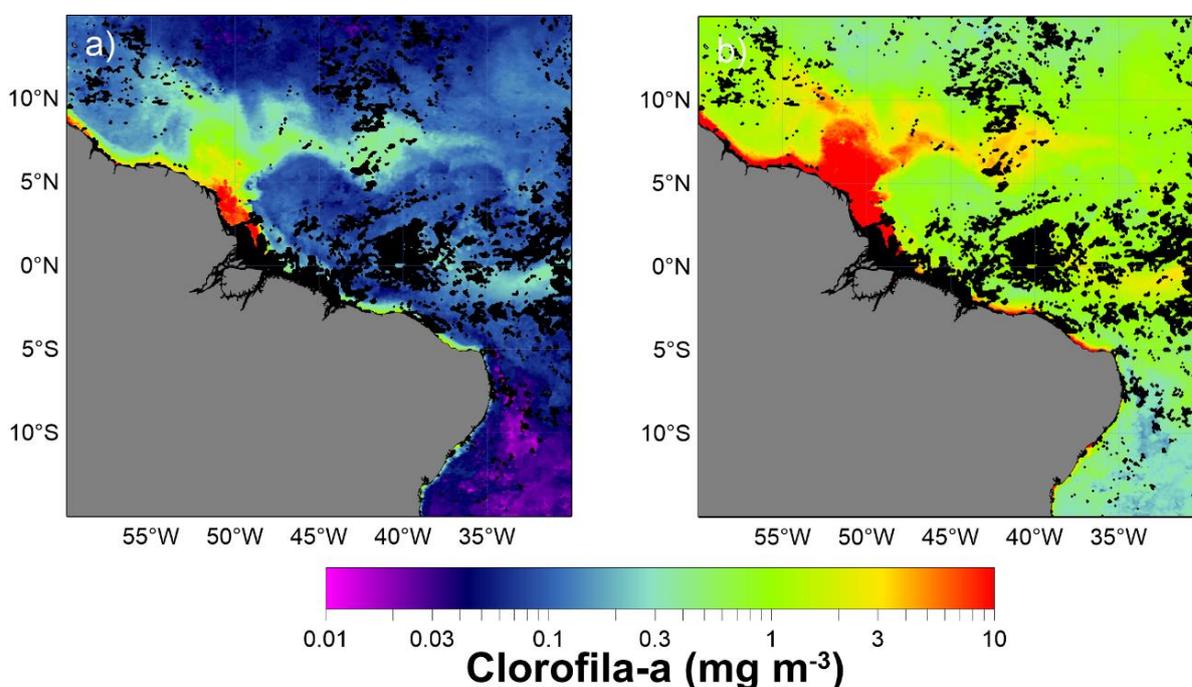
**Figura 10:** Representação da PPL do CFIII em  $\text{mgC m}^{-2} \text{dia}^{-1}$  através do VGPM. Em a) dados sem correção e em b) dados SPC corrigidos. (Fonte: Autoria própria)



## 5.2 Camadas finas V

A quantidade de dados *in situ* e de dias de campanha na região da Pluma do Rio Amazonas realizadas pelo CFV foi bem menor do que as do CFIII. Ao todo foram 29 pontos de coleta de dados *in situ*, entretanto durante o processamento houve a necessidade de se retirar *outliers*, ficando com 21 pontos. Esses pontos se distribuíram entre a linha do Equador e a latitude de 7° N e longitudes 52° W e 45° W, saindo da costa indo em direção ao oceano aberto, descendo para sul e voltando para a costa (Figura 6.b).

**Figura 11:** Representação da distribuição de Chl<sub>a</sub> na área de estudo em mg m<sup>-3</sup> (escala log) durante o CFV. Em a) dados de satélite sem tratamento e b) dados de satélite corrigidos a partir de dados *in situ*. (Fonte: Autoria própria)



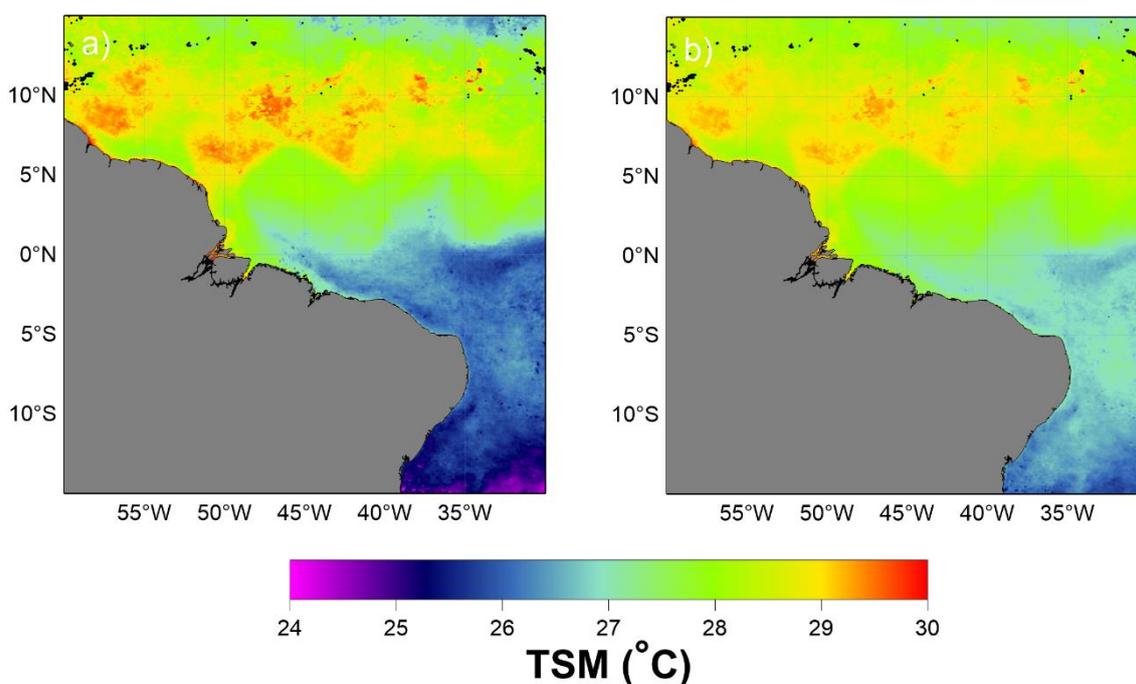
Analisando as relações existentes na tabela 1 para o CFV se pode observar que em todos os casos os dados de satélite são superiores aos dados *in situ*, além disso, o  $r^2$  e a  $\rho$  de Pearson são altos (0,77 e 0,88, respectivamente), mostrando que há relação significativa entre os dados.

A figura 11 mostra imagens da distribuição de Chl<sub>a</sub> na área de estudo durante o período de realização do CFV, sendo que em 11.a são somente dados de satélites sem ajuste e em 11.b são dados de satélite corrigidos a partir de dados *in situ*. Através das imagens é possível observar que em ambas as figuras a pluma apresenta um mesmo formato, porém as concentrações são diferentes. Em 11.a os maiores valores de Chl<sub>a</sub> estão próximos à área de descarga do rio, uma pequena região em que as concentrações variam de 3 a 10 mg m<sup>-3</sup>, o restante da pluma apresenta

concentrações em torno de  $1 \text{ mg m}^{-3}$  e o oceano ao redor apresenta os menores valores que variam de  $0,01 \text{ mg m}^{-3}$  a aproximadamente  $0,3 \text{ mg m}^{-3}$ . Já a figura 11.b toda a pluma apresenta valores altos de 3 a  $10 \text{ mg m}^{-3}$  e o oceano ao redor valores que vão de  $0,2$  a  $1 \text{ mg m}^{-3}$ .

A distribuição da TSM pode ser observada através da figura 12 que apresenta em 12.a dados de satélite sem correção e em 12.b dados de satélite corrigidos a partir de dados *in situ*. Ambas as figuras são muito parecidas na distribuição da temperatura, os maiores valores preenchem a área acima da linha do Equador e vão de  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , sendo que valores de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ocupam uma área maior na figura 12.a. Os menores valores estão abaixo da linha do Equador e são menores que  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .

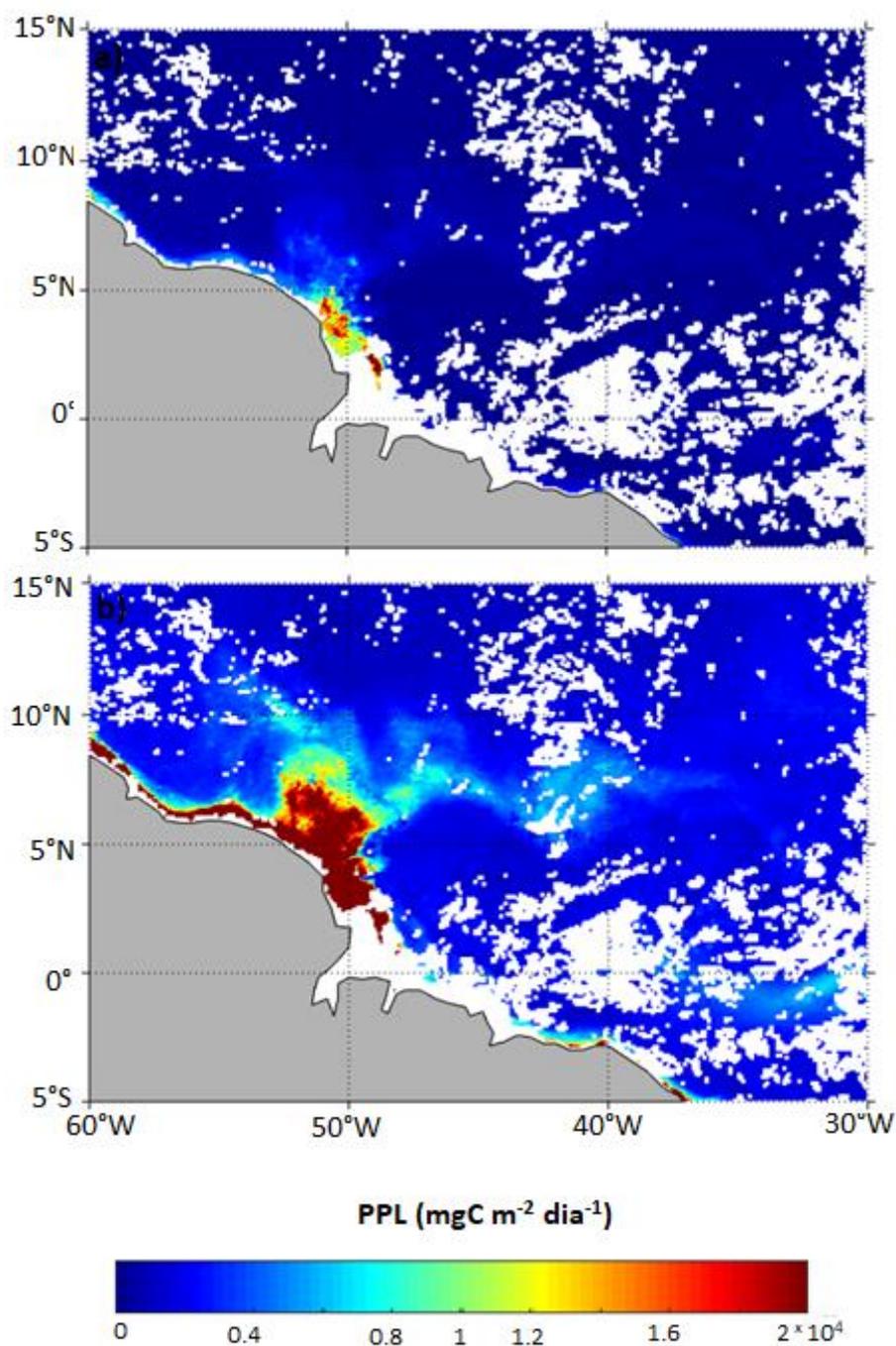
**Figura 12:** Representação da distribuição da TSM em  $^\circ\text{C}$  na área de estudo durante o cruzeiro oceanográfico CFV. Em a) dados de TSM do satélite sem tratamento e b) corrigidos a partir de dados *in situ*. (Fonte: Autoria própria)



A figura 13 apresenta a distribuição da PPL na região da pluma do Amazonas obtida através da aplicação do modelo VGPM, sendo que 13.a mostra a concentração da PPL a partir de dados de satélite sem correção e o 13.b com correção. Os valores de PPL no CFV foram muito superiores ao CFIII (Figura 10). A figura 13.b apresenta concentrações de PPL maiores àquelas encontradas em 13.a. Os maiores valores se concentram próximo à região de descarga em ambas as figuras de  $12.000$  a  $16.000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 13.a e de  $12.000$  a  $20.000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 13.b, sendo que no caso de 13.b esses valores se distribuem ao longo da costa em

direção ao norte. A parte da pluma que segue a retroflexão apresenta concentrações de aproximadamente  $4.000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 13.a e próximos a 0 no oceano ao redor enquanto que apresentam valores próximos a  $8.000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e a  $4.000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 13.b respectivamente.

**Figura 13:** Representação da PPL do CFV em  $\text{mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  através do VGPM. Em a) dados sem correção e b) dados corrigidos. (Fonte: Autorial própria)



## 6 DISCUSSÃO

Os resultados de clorofila do CFIII (figura 7.b), os quais considerou-se pontos de medidas sobre a plataforma para a correção da imagem de satélite, mostram que a região próxima à descarga do rio apresenta os menores valores de *Chl\_a*, enquanto que o oceano ao redor apresenta os maiores. Estes resultados deixam evidente que há uma incongruência com a literatura, pois apesar de representar cerca de 10% do oceano global, as plataformas continentais são muito mais produtivas que o oceano aberto (BERGER *et al.* 1989; MARTIN *et al.*, 1987; PLATT & SUBBA RAO, 1975; WALSH, 1988; WOLLAST, 2005), isso porque é um ambiente que apresenta condições ideais de luz, transparência da água e nutrientes para o desenvolvimento das comunidades fitoplanctônicas, já no oceano aberto os nutrientes acabam por ser o fator limitante (DUGDALE, 1967).

Quando os dados do CFIII são corrigidos sem os pontos de medição *in situ* ao longo da costa (SPC), o resultado da concentração de *Chl\_a* apresentou uma distribuição e valores mais aceitáveis. Este resultado pode ser observado na figura 8.b, a qual evidencia a presença da pluma na região de estudo e indica que ela possui as maiores concentrações de *Chl\_a* sobre a plataforma, enquanto que o oceano ao redor apresenta as menores.

A grande quantidade de matéria orgânica dissolvida proveniente da descarga fluvial altera a coloração da superfície do mar influenciando na detecção do sinal de cor do oceano pelo sensor (CARDER *et al.*, 1989; MULLER-KARGER *et al.*, 1989; CIOTTI *et al.*, 2010), isso faz com que regiões costeiras, especialmente locais de alta turbidez, sejam suscetíveis a erros na estimativa da *Chl\_a* por satélites. Provavelmente o resultado obtido em 7.b retrata essa limitação do sensor em diferenciar entre *Chl\_a* e CDOM, pois assim que os dados coletados ao longo da costa são retirados da análise, a nova imagem gerada (Figura 8.b) apresenta um padrão mais realista. Isso mostra que os dados costeiros de satélite tendenciam os dados oceânicos de forma que esses apresentaram valores superestimados de *Chl\_a*.

O tratamento dos dados do CFV mostra que houve um aumento da concentração de *Chl\_a* quando comparado com a imagem sem correção. Esse aumento se distribuiu ao longo da pluma e se reflete também nas áreas oceânicas. Santos e Muniz *et al.* (2008) falam em seu trabalho que baseado em dados físicos e químicos da Operação Norte III Santos (M. L. S. Santos, dados não publicados) diz que a concentração de *Chl\_a* na Plataforma Continental Amazônica fica em torno de  $1,64 \text{ mg m}^{-3}$ , já em seu próprio trabalho eles calculam uma média de  $1,67 \text{ mg m}^{-3}$ . Otsuka *et al.* (2018), utilizando dados do CFV verificam que o máximo de *Chl\_a* encontrado na região foi  $1,83 \text{ mg m}^{-3}$ . O CFV com correção apresenta valores muito

superiores aos encontrados pelos autores citados anteriormente, já o CFV sem correção apresenta concentrações mais próximas, entre 1 a 10 mg m<sup>-3</sup>. Comparando as duas campanhas, a análise do CFIII SPC é o que mais condiz com as concentrações encontradas, isso reforça a teoria de que os dados de satélite foram influenciados pelo CDOM tanto no CFIII (com os pontos de *in situ* na costa) quanto no CFV.

Como os resultados dos ajustes das imagens no CFIII e CFV mostraram uma superestimação dos valores de concentração de *Chl\_a*, tanto na pluma, como no oceano aberto, a modelagem da PPL foi analisada nos dois casos, com e sem correção. Os resultados gerados pela aplicação do modelo seguiram a mesma tendência das imagens de entrada, ou seja, no caso do CFIII a imagem tratada SPC apresenta menores valores de PPL quando comparada com a imagem não tratada, enquanto que no CFV a imagem tratada apresentou valores de PPL maiores do que a imagem não tratada, mostrando o quanto o ajuste dos dados influencia no resultado final. Outro fator importante dessa análise, são as concentrações encontradas. Os valores são altos para ambas as campanhas, independentemente se os dados foram corrigidos ou não, contudo, enquanto no CFIII as maiores concentrações de PPL encontradas ficaram em torno de 6.000 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, no CFV chegaram a 20.000 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> nos dados corrigidos (Figura 13.b).

Estudos realizados no mar do sul da China apresentam alguns valores de PPL superiores a 1.000 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (NING *et al.*, 2004; CHEN & CHEN, 2006), entretanto a média encontrada não ultrapassava 550 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Avaliando a produtividade global através de diferentes modelos Ma *et al.* (2014) encontraram as concentrações máximas de PPL (aproximadamente 1.500 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) distribuídos principalmente em plataformas continentais produtivas e zonas de ressurgência como nas águas costeiras da China, Peru e Califórnia. Segundo eles, a maior parte dos oceanos tropicais sustentam uma PPL de cerca de 600 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, enquanto que os giros tropicais apresentam as menores concentrações (300 mgC m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>). Comparando os resultados deste trabalho com os mencionados acima pode-se dizer que tanto as concentrações de PPL do CFIII quanto as do CFV foram superestimados, sendo que no CFV isso ocorreu em uma escala muito maior.

Kahru *et al.* (2009) avaliam vários algoritmos de PPL utilizando dados de satélite e uma série de dados *in situ* coletados na Corrente da Califórnia. Eles observam através de análises estatísticas que entre os cinco modelos avaliados o VGPM apresenta o melhor ajuste para os dados *in situ*, contudo apesar do VGPM ser considerado ideal para a região oceânica, há a necessidade de se comprovar os resultados obtidos quando esse algoritmo é aplicado para a zona costeira, pois essa região sofre variações nas propriedades ópticas, físicas, químicas e

biológicas (ISHIZAKA *et al.*, 2007). Ma *et al.* (2014) ao comparar modelos de produtividade observam que os resultados obtidos através do AbPM (Modelo baseado na Absorção do Pigmento Fitoplanctônico) foram mais consistentes para as águas turvas da região costeira do que o VGPM. Comparações entre esses dois modelos também foram realizadas no Mar de Bering, considerado um dos mares mais produtivos do mundo (WALSH *et al.*, 1989). Hirawke *et al.* (2012), ao fazer essas comparações, encontram através do VGPM valores de PPL  $> 10.000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , enquanto que as concentrações obtidas através do AbPM foram menos da metade desse valor. Eles argumentam que a grande diferença encontrada se deve ao fato da concentração de *Chl\_a* ter sido superestimada pelo VGPM devido a coloração do CDOM e do material particulado inorgânico em suspensão.

Autores como Hao *et al.* (2007) e Tan & Shi (2009) que aplicaram o VGPM em outras partes do mundo encontraram correlações significativas entre dados *in situ* e dados de satélite ( $r^2 > 0.70$ ). Neste trabalho, apesar da correlação para o CFV ter sido significativa, a correlação feita para CFIII foi muito baixa, mostrando que há discrepâncias entre os dados relacionados.

Ishizaka *et al.* (2007) ao aplicar o VGPM na Baía de Sagami no Japão observaram que os resultados da PPL foram superestimados quando somente dados diários de satélites foram utilizados. Eles dizem que isso ocorreu pelo fato da Baía de Sagami possuir forte dependência de luz e de haver dificuldade em se obter dados *in situ* de PAR. Eles falam também que os poucos dados *in situ* de *Chl* existentes na região também podem ter prejudicado a análise e atentam para a importância da presença de boias oceanográficas coletando dados continuamente.

## 7 CONCLUSÃO

Durante o tratamento dos dados a correlação linear entre os dados *in situ* e de satélite foi pouco significativa para o CFIII e significativa para o CFV, entretanto nos dois casos a concentração de *Chl\_a* foi superestimada, especialmente no CFV. Isso provavelmente ocorreu por influência do CDOM que interferiu na captação dos dados de satélite pelo sensor, fato também registrado em outros trabalhos. Apesar do VGPM ser o modelo ideal para áreas oceânicas, ele pode não ser o mais indicado para medir a PPL em áreas costeiras devido à variabilidade e interferência dos parâmetros ambientais, esse provavelmente foi o fator que contribuiu para que a PPL fosse superestimada nas duas campanhas oceanográficas as quais o modelo foi aplicado. Portanto, a utilização de outros modelos de produtividade, como o AbPM, pode ser mais indicada para uma região tão produtiva quanto a Pluma do Rio Amazonas.

O sensoriamento remoto é uma ferramenta que surgiu dentro da oceanografia para facilitar e preencher lacunas, oferecendo baixos custos e cobertura espacial e temporal. Foi através desse método que houve a possibilidade de hoje a comunidade científica conseguir compreender tanto sobre a dinâmica e inúmeros processos que ocorrem tanto no oceano quanto na atmosfera. A utilização dos dados obtidos por essa ferramenta em modelos permite que haja a integração de dados diversos e correlacionados, possibilitando a melhor compreensão do ecossistema em todas as instâncias. Entretanto, a aplicação do VGPM neste trabalho mostra que ainda existem limitações a serem sanadas.

Ao mesmo tempo que esse trabalho ressalta a importância do sensoriamento remoto como ferramenta dentro da oceanografia ele reforça a necessidade de se ter mais Campanhas Oceanográficas para obtenção de dados na área de estudo, não só para se calibrar e validar dados de satélites e aplica-los em modelos, mas também para se ter parâmetros de comparação e assim poder compreender melhor a dinâmica física, química, biológica e geológica da região. A execução desse trabalho também permite concluir que durante a aplicação do modelo todos os passos são importantes, pois qualquer erro que ocorra durante o processamento dos dados de entrada irá se refletir no resultado final. Portanto pode-se dizer que a Pluma do Rio Amazonas possui alta PPL, entretanto as concentrações obtidas aqui são superiores às concentrações reais.

## REFERÊNCIAS

- ACKER, J.; WILLIAMS R.; CHIU, L; ANDANUY, P.; MILLER, S.; SCHUELER, C.; VACHON, P. W.; MANORE, M. Remote Sensing from Satellites. In: MEYERS, Robert A. (Ed.) **Encyclopedia of Physical Science and Technology**, 3. ed. New York: Elsevier, 2003. p. 161-202. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.09440-9
- AIMOLA, L.; MOURA, M. A. influência da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico na definição da posição da ZCIT ao norte do Equador. Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 555-563, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150059>
- ALLAN, T. D. Oceanography from Space - A European Contribution? In: GOWER, J. F. (Ed.) **Oceanography from Space**. Boston: Springer, 1981. v. 13, Marine Science. p. 19-27.
- ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 7, p. 797- 800, 1989.
- BEHRENFELD, M. J.; FALKOWSKI, P. G. Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentrations. **Limnology and Oceanography**, v. 42, n. 1, p. 1-20, 1997.
- BERGER, W. H.; SMETACEK, V.; WEFER, G. Ocean productivity and paleoproductivity - An overview. In: BERGER, W. H.; SMETACEK, V; WEFER, G. (Eds.) **Productivity in the Oceans: Present and Past**. New York: Wiley, 1989. p. 1-34.
- CARDER, K. L.; STEWARD, R. G.; HARVEY, G. R.; ORTNER, P. B. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. **Limnology and Oceanography**, v. 34, n. 1, p. 68-81, 1989.
- CHAVEZ, F. P.; MESSIÉ, M.; PENNINGTON, J. T. Marine primary production in relation to climate variability and change. **Annual Review of Marine Science**, v. 3, p. 227-260, 2011. doi:10.1146/annurev.marine.010908.163917
- CIOTTI, A. M.; GARCIA, C. A. E.; JORGE, D. S. F. Temporal and meridional variability of satellite-estimates of surface chlorophyll concentration over the Brazilian continental shelf. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 236-253, 2010.
- CHEN, C. T. A.; HUANG, T. H.; FU, Y. H.; BAI, Y.; HE, X. Strong sources of CO<sub>2</sub> in upper estuaries become sinks of CO<sub>2</sub> in large river plumes. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 2, p. 179-185, 2012. doi: 10.1016/j.cosust.2012.02.003
- CHEN, Y. L.; CHEN, H. Seasonal dynamics of primary and new production in the northern South China Sea: The significance of river discharge and nutrient advection. **Deep-sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 53, n. 6, p. 971-986, 2006, doi:10.1016/j.dsr.2006.02.005
- COUTINHO, P. N. (Org.) Levantamento do estado da arte de pesquisa dos recursos vivos marinhos do Brasil. Oceanografia Geológica. Brasília, Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Secretaria de Coordenação dos Assuntos do Meio Ambiente. (Programa REVIZEE). 2000. 75 p.

DAMUTH, J. E.; KUMAR, N. Amazon Cone: morphology, sediments, age, and growth pattern. **Geological Society of America Bulletin**, v. 86, n. 6, p. 863-878, 1975.

DEL VECCHIO, R.; SUBRAMANIAM, A. Influence of the Amazon River on the surface optical properties of the western tropical North Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C11, p. 1-13, 2004. doi:10.1029/2004JC002503

DUGDALE, R. C. Nutrient limitation in the sea: dynamics, identification and significance. **Limnology and Oceanography**, v. 12, n. 4, p. 685-695, 1967.

EMERY, W.; CAMPS, A. **Introduction to Satellite Remote Sensing: atmosphere, ocean, land and cryosphere applications**. 1. ed. New York: Elsevier, 2017. p. 1- 42.

FFIELD, A. Amazon and Orinoco River Plume and NBC rings: bystanders or participants in hurricane events? **Journal of Climate**, v. 20, p. 316-333, 2007. doi: 10.1175/JCLI3985.1

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FRATANTONI, D. M.; RICHARDSON, P. L. The evolution and demise of North Brazil Current rings. **Journal of Physical Oceanography**, v. 36, p. 1241–1264, 2006.

GARRISON, T. **Fundamentos de oceanografia**. Tradução: Novertitis do Brasil. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

GARZOLI, S. L.; FFIELD, A.; JOHNS, W. E.; YAO, Q. North Brazil Current retroflexion and transports. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. 1, 2004. doi:10.1029/2003JC001775

GEYER, W. R.; BEARDSLEY, R. C.; LENTZ, S. J.; CANDELA, J.; LIMBURNER, R.; JOHNS, W. E.; CASTRO, B. M.; SOARES, I. D. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n.5-6, p. 575-616, 1996. doi:10.1016/0278-4343(95)00051-8

GOES, J. I.; GOMES, H. R.; CHEKALYUK, A. M.; CARPENTER, E. J.; MONTOYA, J. P.; COLES, V. J.; YAGER, P. L.; BERELSON, W. M.; CAPONE, D. G.; FOSTER, R. A.; STEINBERG, D. K.; SUBRAMANIAM, A.; HAFEZ, M. A. Influence of the Amazon River discharge on the biogeography of phytoplankton communities in the western tropical north Atlantic. **Progress in Oceanography**, v. 120, p. 29–40, 2014. doi:10.1016/j.pocean.2013.07.010

HAO, J.; NING, X.; LIU, C.; CAI, Y.; CAI, F. Satellite and *in situ* observations of primary production in the northern South China Sea. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 29, n. 3, p. 58-68, 2007.

HELLWEGER, F. L.; GORDON, A. L. Tracing Amazon River water into the Caribbean Sea. **Journal of Marine Research**, v. 60, n. 4, p. 537–549, 2002. doi:10.1357/002224002762324202

HIRAWAKE, T.; SHINMYO, K.; FUJIWARA, A.; SAITOH, S. Satellite remote sensing of primary productivity in the Bering and Chukchi Seas using an absorption-based approach. **ICES Journal of Marine Science**, v. 69, n. 7, p. 1194-1204, 2012. doi: 10.1093/icesjms/fss111

HORNING, N. Remote sensing. In: FATH, B. (Ed.) **Encyclopedia of Ecology**. 2. ed. New York: Elsevier, 2018.

HOUNSOU-GBO, G. A.; SERVAIN, J.; ARAUJO, M.; MARTINS, E. S.; BOURLÈS, B.; CANIAUX, G. Oceanic indices for forecasting seasonal rainfall over the Northern part of Brazilian Northeast. **American Journal of Climate Change**, v. 5, p. 261-174, 2016, doi: 10.4236/ajcc.2016.52022

ISHIZAKA, J.; SISWANTO, E.; ITOH, T.; MURAKAMI, H.; YAMAGUCHI, Y.; HORIMOTO, N.; ISHIMARU T.; HASHIMOTO, S.; SAINO, T. Verification of Vertically Generalized Production Model and estimation of primary production in Sagami Bay, Japan. **Journal of Oceanography**, v. 63, p. 517-524, 2007.

KAHRU, M.; KUDELA, R.; MANZANO-SARABIA, M; MITCHELL, B. G. Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. C2, C02004, 2009, doi:10.1029/2008JC004979

KIRK, J. T. O. **Light e photosynthesis in aquatic ecosystems**. London: Cambridge University Press, v. 2, 1994. 507 p. doi:10.1017/CBO9780511623370

KWOK, R. Ecology's remote-sensing revolution. **Nature**, v. 556, n. 7699, p. 137-138, 2018.

LENTZ, S. J.; LIMBURNER, R. The Amazon River plume during AMASSEDS: Spatial characteristics and salinity variability. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C2, p. 2355-2375, 1995.

LE TRAON, P. Y. Satellites and Operational Oceanography. In: SCHILLER, A.; BRASSINGTON, G. B. (Eds.) **Operational Oceanography in the 21st Century**. Berlin: Springer Science+Business Media B.V., 2011. p. 29-54. doi: 10.1007/978-94-007-0332-2\_2

LE TRAON, P. Y.; ANTOINE, D.; BENTAMY, A.; BONEKAMP, H.; BREIVIK, L. A.; CHAPRON, B.; CORLETT, G.; DIBARBOURE, G.; DIGIACOMO, P.; DONLON, C.; FAUGÈRE, Y.; FONT, J.; GIRARD-ARDHUIN, F.; GOHIN, F.; JOHANNESSEN, J. A.; KAMACHI, M.; LAMBIN, G.; LARNICOL, J. G.; LE BORGNE, P.; LEULIETTE, E.; LINDSTROM, E.; MARTIN, M. J.; MATURI, E.; MILLER, L.; MINGSEN, L.; MORROW, R.; REUL, N.; RIO M. H.; ROQUET, H.; SANTOLERI, R.; WILKIN J. Use of satellite observations for operational oceanography: recent achievements and future prospects. **Journal of Operational Oceanography**, v. 8, p. s12-s27, 2015. doi:10.1080/1755876X.2015.1022050

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2. ed. ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. p. 3-4.

MA, S.; TAO, Z.; YANG, X.; YU, Y.; ZHOU, X.; MA, W.; LI, Z. Estimation of marine primary productivity from satellite derived phytoplankton absorption data. **IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.**, v. 7, n. 7, p. 3084–3092, 2014.

MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. Case studies of extreme climatic events in Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 6, p. 617-627, 1993.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V. E.; FILIZOLA, N. P.; WAINER, I. C. Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833-852, 2001.

MARTIN, J. H.; KNAUER, G. A.; KARL, D. M.; BROENKOW, W. W. VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 34, n. 2, p. 267-285, 1987.

MASCARENHAS, A. C. C.; GOMES, G. S.; LIMA, A. P. Y.; SILVA, H. K. N.; SANTANA, L. S.; ROSÁRIO, R. P.; ROLLNIC, M. Seasonal Variations of the Amazon River Plume with Focus on the Eastern Sector. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 75, p. 532-536, 2016. doi:10.2112/SI75-107.1

MCKEE, B. A.; ALLER, R. C.; ALLISON, M. A.; BIANCHI, T. S.; KINEKE, G. C. 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.

MMA, **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 2006. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/161/\\_publicacao/161\\_publicacao03032011024915.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024915.pdf)>

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 107-117, 1987.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

MULLER-KARGER, F. E.; MCCLAIN, C. R.; RICHARDSON, P. L. The dispersal of the Amazon's waters. **Nature**, v. 333, p. 56-58, 1988.

MULLER-KARGER, F. E.; MCCLAIN, C. R.; FISHER, T. R.; ESAIAS, W. E.; VARELA, R. Pigment distribution in the Caribbean Sea: Observation from space. **Progress Oceanography**, v. 23, n. 1, p. 23-64, 1989.

MUNK, W. Oceanography before, and after, the advent of satellites. In: HALPERN, D. (Ed.) **Satellites, Oceanography and Society**. v. 36, 1. ed. New York: Elsevier Science, 2000.

NING, X.; CHAI, F.; XUE, H.; CAI, Y.; LIU, C.; SHI, J. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C10, C10005, 2004, doi:10.1029/2004JC002365

NITTROUER, C. A.; CURTIN, T. B.; DEMASTER, D. J. Concentration and flux of suspended sediment on the Amazon continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 6, n. 1-2, p. 151-174, 1986.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças Climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

OTSUKA, A; FEITOSA, F; ARAÚJO, M; VELEDA, D; CUNHA, M. G. S.; LEFÉVRE, N.; GASPAS, F.; MONTES, M. F.; BORGES, G; NORIEGA, C. Dynamics of Primary Productivity and Oceanographic Parameters under Influence of the Amazon River Plume. **Open Journal of Ecology**, v. 8, p. 590-606, 2018. doi:10.4236/oje.2018.811035.

PLATT, T.; SUBBA RAO, D. V. Primary production of marine microphytes. In: COOPER, J. P. **Photosynthesis and productivity in different environments**. London: Cambridge University Press, 1975. v. 3, International Biological Programme. p. 249-279.

RAJEESH, R.; DWARAKISH, G. S. Satellite oceanography - A review. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE). **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 165-172, 2015.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, n. 2, p. 81-91, 1990.

RICHEY, J. E., MELACK, J. M., AUFDENKAMPE, A. K., BALLESTER, V. M., HESS, L. L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Nature**, v. 416, p. 617–620, 2002. doi:10.1038/416617a

RICKLEFS, R. E. **A economia da Natureza**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 534 p.

SANTOS, M. L. S.; MEDEIROS, C.; MUNIZ, K.; FEITOSA, F. A. N.; SCHWAMBORN, R.; MACÊDO, S. J. Influence of the Amazon and Pará Rivers on Water Composition and Phytoplankton Biomass on the Adjacent Shelf. **Journal of Coastal Research**, v. 24, n. 3, p. 585-593, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.2112/05-0538.1>

SANTOS, M. L. S.; MUNIZ, K.; BARROS-NETO, B.; ARAUJO, M. Nutrient and phytoplankton biomass in the Amazon River shelf Waters. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, n. 4, p. 703-717, 2008.

SIGMAN, D. M.; HAIN, M. P. The biological productivity of the ocean. **Nature Education Knowledge**, v. 3, n. 10, 2012.

SMITH, W. O. JR.; DEMASTER, D. J. Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 291-319, 1996.

STRAMMA, L.; FISCHER J.; BRANDT P.; SCHOTT F. Circulation, variability and near equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. **Elsevier Oceanography Series**, v. 68, p. 1-22, 2003. doi:10.1016/s0422-9894(03)80141-1

STRAMMA, L.; RHEIN, M.; BRANDT P.; DENGLER M.; BÖNING C.; WALTER, M. Upper ocean circulation in the western tropical Atlantic in boreal fall 2000. **Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 52, n. 2, p. 221-240, 2005.

SUBRAMANIAM, A.; YAGER, P. L.; CARPENTER, E. J.; MAHAFFEY, C.; BJÖRKMAN, K.; COOLEY, S.; KUSTKA, A. B.; MONTOYA, J. P.; SAÑUDO-WILHELMY, S. A.; SHIPE, R.; CAPONE, D. G. Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean. **PNAS**, v. 105, n. 30, p. 10460-10465, 2008.

TAN, S. C.; SHI, G. Y. Spatiotemporal variability of satellite-derived primary production in the South China Sea, 1998–2006. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. G3, G03015, 2009, doi:10.1029/2008JG000854

TEIXEIRA, C.; TUNDISI, J. G. Primary production and phytoplankton in equatorial waters. **Bulletin of Marine Science**, v. 17, n. 4, p. 884-891, 1967.

TERNON, J.F., OUDOT, C., DESSIER, A., DIVERRES, D. A seasonal tropical sink for atmospheric CO<sub>2</sub> in the Atlantic ocean: The role of the Amazon River discharge. **Marine Chemistry**, v. 68, n. 3 p. 183–201, 2000. doi:10.1016/S0304-4203(99)00077-8.

VERNET, M.; SMITH, R. Measuring and Modeling Primary Production in Marine Pelagic Ecosystems. In: FAHEY, T. J.; KNAPP, A. (Eds.) **Principles and Standards for Measuring Primary Production**. Oxford: Oxford University Press, 2007. p. 142-176.

VINCENT, R. K.; QIN, X.; MCKAY, R. M. L.; MINER, J.; CZAJKOWSKI, K.; SAVINO, J.; BRIDGEMAN, T. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 3, p. 381-392, 2004.

WALSH, J. J. **On the nature Continental Shelves**. London: Academic Press, 1988. 520 p.

WALSH, J. J.; MCROY, C. P.; COACHMAN, L. K.; GOERING, J. J.; NIHOUL, J. J.; WHITLEDGE, T. E.; BLACKBURN, T. H.; PARKER, P. L.; WIRICK, C. D.; SHUERT, P. G.; GREBMEIER, J. M.; SPRINGER, A. M.; TRIPP, R. D.; HANSELL, D. A.; DJENIDI, S.; DELEERSNIJDER, E.; HENRIKSEN, K.; LUND, B. A.; ANDERSEN, P.; MULLER-KARGER, F. E.; DEAN, K. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 277-359, 1989. doi:10.1016/0079-6611(89)90006-2

WILSON, W. S.; LINDSTROM, E. J.; APEL, J. R. Satellite oceanography, history, and introductory concepts. In: STEELE, J. H.; TUREKIAN, K. K.; THORPE, S. A. (Eds.) **Encyclopedia of Ocean Sciences**. 2. ed. Cambridge: Academic Press, 2008. p. 65-79.

WOLLAST, R.; Evaluation and comparison of the global carbon cycle in the coastal zone and in the open ocean. In: BRINK K. H.; ROBINSON, A. R. (Eds.) **The Global Coast Ocean: Multiscale Interdisciplinary Processes**. Cambridge: Harvard University Press, 2005. v. 10, Processes and Methods. (The Sea: Ideas and Observation of Progress in the Study of the Sea). p. 213-252.

WOOD, E. J. F. A phytoplankton study of the Amazon region. **Bulletin of Marine Science**, v. 16, n. 1, p. 102-123, 1966.

ZHENG, Q.; KLEMAS, V. V.; YAN, X. H. Overview: Progress in Ocean Remote Sensing. In: LIANG, S. (Ed.) **Comprehensive Remote Sensing**. Oxford: Elsevier, 2018. v. 8. p. 1-42. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10517-2