



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

ANGELICA VIANA E SILVA

**BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA E COMPOSIÇÃO POR PIGMENTOS NA
DESEMBOCADURA DO RIO AMAZONAS E OCEANO ADJACENTE**

Recife
2023

ANGELICA VIANA E SILVA

**BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA E COMPOSIÇÃO POR PIGMENTOS NA
DESEMBOCADURA DO RIO AMAZONAS E OCEANO ADJACENTE**

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

Área de concentração: Oceanografia Biológica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Mendes de Castro Melo.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586b	Silva, Angelica Viana e. Biomassa fitoplanctônica e composição por pigmentos na desembocadura do Rio Amazonas e oceano adjacente / Angelica Viana e Silva. – 2023. 72 f.: il., fig. e tab. Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Mendes de Castro Melo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2023. Inclui referências. 1. Oceanografia. 2. Fitoplâncton. 3. Classes de tamanho. 4. HPLC. 5. CHEMTAX. 6. Plataforma Continental Amazônica. 7. Índice <i>Fp</i>. I. Melo, Pedro Augusto Mendes de Castro (Orientador). II. Título. UFPE 551.46 CDD (22. ed.) BCTG/2024-3
-------	---

ANGELICA VIANA E SILVA

**BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA E COMPOSIÇÃO POR PIGMENTOS NA
DESEMBOCADURA DO RIO AMAZONAS E OCEANO ADJACENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Biológica.

Aprovada em: 30/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Augusto Mendes de Castro Melo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Fernando Antônio do Nascimento Feitosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gabriel Bittencourt Farias (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Rafael Borges Mendes (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Arnaud Bertrand (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Deus por todas bençãos recebidas, pelas oportunidades que esse trabalho me proporcionou até aqui e pela minha família.

Aos meus pais Ana Paula e Adeilson e minha irmã Alice por todo o amor, apoio e incentivo em cada projeto que me proponho a fazer. Eu não seria nada sem vocês. Meu eterno agradecimento e amor.

Ao meu esposo Bruno por todo amor, paciência e apoio desde o início. Por ser meu refúgio e ponto de paz. Obrigada por estar sempre ao lado.

Ao meu orientador Pedro Melo, pela confiança desde que entrei no laboratório e por todo conhecimento e paciência durante esses anos.

A Gabriel Bittencourt pelo conhecimento e ajuda durante o desenvolvimento desse documento. Meus sinceros agradecimentos.

A Sandrine Hillion, por ter me recebido tão bem na França e por todo aprendizado. A Claire Carré pelos ensinamentos e contribuições para a execução desse trabalho.

Ao projeto AMAZOMIX pela oportunidade, IRD por me receberem e ao IMAGO por realizarem as análises de HPLC e nutrientes.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Departamento de Oceanografia e ao Programa de Pós-Graduação pelo suporte para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que fiz durante esses anos no Laboratório de Fitoplâncton, gostaria de agradecer pelo convívio, conversas e ensinamentos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

É preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser conhecer as borboletas (SAINT-EXUPÉRY, 2006).

RESUMO

A comunidade fitoplanctônica constitui a base da maioria das teias tróficas marinhas e contribui com aproximadamente 50% da produção primária total do planeta. Uma das formas de se estudar essa comunidade é através da análise de clorofila-a e dos pigmentos biomarcadores, que têm sido amplamente utilizados para quantificar a biomassa e para a identificação das comunidades. Amostras de água foram coletadas em 33 estações na Plataforma Continental Amazônica (PCA) e oceano adjacente, a bordo do RV Antea no âmbito do projeto AMAZOMIX, para determinar as concentrações dos nutrientes e pigmentos. As amostras foram analisadas através de HPLC e os grupos fitoplanctônicos determinados a partir do CHEMTAX. Em todas as estações foram obtidos simultaneamente perfis verticais de temperatura e salinidade. A PCA é uma área complexa e dinâmica, que sofre influência de várias forçantes, como ondas internas, além da pluma do rio Amazonas, que tem importante papel no carreamento de nutrientes, contribuindo para um aumento da produtividade primária e influenciando a estrutura das comunidades pelo seu papel na estratificação do oceano superior. Na região sob influência da pluma, foram observadas altas concentrações de nutrientes que contribuíram para um aumento da Chl-a total e do microfitoplâncton nas estações próximas a desembocadura do rio, com pico de TChl-a de $2.583 \mu\text{g.l}^{-1}$ na St31. No PMC, fora da pluma observou-se altas concentrações na St1 para a fração total ($1.305 \mu\text{g.l}^{-1}$) e microfitoplâncton ($1.022 \mu\text{g.l}^{-1}$) influenciadas principalmente pelas ondas internas. Apesar desse incremento na biomassa do microfitoplâncton, a fração do pico- e nanofitoplâncton dominou a TChl-a em todo o estudo com 76% de contribuição. Através das análises de HPLC Foram identificados 15 pigmentos, através dos quais foram determinadas a contribuição relativa dos grupos. Dentre os que mais se destacaram estão as diatomáceas, dinoflagelados e *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, haptófitas e prasinófitas. As diatomáceas, dinoflagelados e *Synechococcus* apresentaram maior contribuição na pluma, *Prochlorococcus*, *Synechococcus* e haptófitas na região de transição e *Prochlorococcus*, haptófitas e prasinófitas fora da pluma, respectivamente. Através do índice *Fp* observou-se a produção nova 5 vezes maior na área da pluma em relação a região fora da pluma, que apresentou valor de índice característico de produção regenerada. Verticalmente, a superfície da pluma apresentou o maior valor de *Fp*, ressaltando a importância da

pluma e dos nutrientes no aumento da produção nova, favorecendo o funcionamento da teia trófica clássica. Apesar desses valores elevados de índice na pluma, a dominância na área de estudo foi da fração $<20\ \mu\text{m}$, o que pode indicar uma relação desacoplada entre a biomassa e o tamanho da comunidade na PCA, pois apesar da entrada de nutrientes favorecer um aumento da biomassa principalmente nas estações localizadas na desembocadura do rio e contribuir para a dominância das diatomáceas na camada de superfície, a comunidade foi majoritariamente composta por células do pico- e nanofitoplâncton durante o período estudado. Portanto, a estrutura da comunidade fitoplanctônica na PCA e oceano adjacente foram influenciadas pelas forçantes físico-químicas, como nutrientes carregados pela pluma, juntamente com a salinidade, temperatura e ondas internas.

Palavras-chave: fitoplâncton; classes de tamanho; HPLC; CHEMTAX; Plataforma Continental Amazônica; índice *Fp*

ABSTRACT

The phytoplankton community forms the basis of most marine trophic webs and contributes approximately 50% of the planet's total primary production. One of the ways to study this community is through the analysis of chlorophyll-a and biomarker pigments, which have been widely used to quantify biomass and identify communities. Water samples were collected at 33 stations on the Amazon Continental Shelf (PCA) and adjacent ocean, on board the RV Antea as part of the AMAZOMIX project, to determine the concentrations of nutrients and pigments. The samples were analyzed using HPLC and the phytoplankton groups were determined using CHEMTAX. Vertical profiles of temperature and salinity were obtained simultaneously at all stations. The ACS is a complex area influenced by several forcing factors, such as internal waves, as well as the Amazon River plume, which plays an important role in carrying nutrients, contributing to an increase in primary productivity and acts in the structure of communities through its role in the upper ocean stratification. In the region under the influence of the plume, high nutrient concentrations were observed, which contributed to an increase in total Chl-a and microphytoplankton at the stations near the mouth of the river, with a TChl-a peak of $2,583 \mu\text{g.l}^{-1}$ at St31. In the DCM, outside the plume, high concentrations were observed in St1 for the total fraction ($1,305 \mu\text{g.l}^{-1}$) and microphytoplankton ($1,022 \mu\text{g.l}^{-1}$), mainly because the influence of internal waves. Despite this increase in microphytoplankton biomass, the pico- and nanophytoplankton fraction dominated TChl-a in the study with a 76% contribution. From HPLC analysis, 15 pigments were identified and the relative contribution of the groups were determined. Among those that stood out the most were diatoms, dinoflagellates and *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, haptophytes and prasinophytes. Diatoms, dinoflagellates and *Synechococcus* contributed most in the plume, *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and haptophytes in the transition region and *Prochlorococcus*, haptophytes and prasinophytes outside the plume, respectively. The Fp index showed that new production was 5 times greater in the plume area than in the region outside the plume, which had an index value characteristic of regenerated production. Vertically, the surface of the plume showed the highest Fp value, highlighting the importance of the plume and nutrients in increasing new production, favoring the functioning of the classic trophic web. Despite these high index values in the plume, the dominance in the study area was of the $<20 \mu\text{m}$ sizefraction, which may indicate

an uncoupled relationship between biomass and community size in the ACS, since although the input of nutrients favors an increase in biomass mainly at the stations located at the mouth of the river and contributes to the dominance of diatoms in the surface layer, the community was mostly composed by pico- and nanophytoplankton cells during the period studied. Therefore, the structure of the phytoplankton community in the PCA and adjacent ocean was influenced by physicochemical forcings, such as nutrients carried by the plume, along with salinity, temperature and internal waves.

Keywords: phytoplankton; sizeclasses; HPLC; CHEMTAX; Amazon Continental Shelf; Fp Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Área de estudo com a posição das estações amostrais na plataforma continental do rio.....	23
Figura 2 –	Concentrações de nitrato (A), nitrito (B), fosfato (C) e silicato (D) em cada região da PCA.....	31
Figura 3 –	Concentrações de oxigênio dissolvido (A), salinidade (B) e temperatura (C) e clorofila-a (D) em cada região da PCA.....	32
Figura 4 –	Perfis verticais dos valores médios de TChl-a para a fração do microfitoplâncton e pico- e nanofitoplâncton nas profundidades amostradas, onde a) Pluma: Estações próximas a desembocadura; b) Pluma: Estações com PMC; c) Transição: Estações rasas; d) Transição: Estações profundas, e) Fora da pluma. Note: Fora da pluma o fundo é mais raso que o PMC, pois as estações que possuem fundo raso, são estações que estão sobre a plataforma.....	34
Figura 5 –	Concentrações de Chl-a para as frações total e do Microfitoplâncton em cada região da PCA.....	35
Figura 6 –	Proporção das classes de tamanho do microfitoplâncton e pico- e nanofitoplâncton nas diferentes profundidades para a área de estudo.....	37
Figura 7 –	Composição relativa dos grupos fitoplanctônicos por profundidade em cada região da PCA.....	38
Figura 8 –	Contribuição dos grupos do fitoplâncton por profundidade em cada região da PCA.....	39
Figura 9 –	Escalonamento multidimensional não métrico (NMDS, Stress: 0,11) baseado nas dissimilaridades de Bray-Curtis para os grupos fitoplanctônicos em relação a pluma, região de transição e fora da pluma. Pontos sobrepostos indicam que os grupos das estações neles contidos não diferem floristicamente entre si.....	41
Figura 10 –	Análise de redundância (RDA) entre a distribuição dos grupos do fitoplâncton na pluma, zonas de transição e fora	

da pluma e as variáveis ambientais. Onde: Diato =
Diatomáceas, Hapto = Haptófitas, Proch = *Prochlorococcus*,
Syn = *Synechococcus*, Tricho = *Trichodesmium*, Pras =
Prasinófitas, Crypto = Cryptófitas, Dino = Dinoflagelados,
MLD = Profundidade da camada de mistura e O₂ dissolv. =
O₂ dissolvido.....

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Pigmentos biomarcadores dos principais grupos fitoplanctônicos, de acordo com Jeffrey et al. (2011)	24
Tabela 2 –	Classes do fitoplâncton e Matrix de entrada para fração total e do pico- e nanofitoplâncton.....	26
Tabela 3 –	Valores médios das variáveis ambientais em cada região da PCA. D.P.: desvio padrão. As letras sobrescritas indicam diferenças significativas em comparações aos pares.....	30
Tabela 4 –	Concentrações mínimas, máximas, médias e desvio padrão de clorofila-a (frações total, microfitoplâncton e pico- e nanofitoplâncton) por profundidade em cada região da PCA. Onde: Números em negrito indicam os picos de concentrações de TChl-a. As letras sobrescritas indicam diferenças significativas em comparações aos pares.....	36
Tabela 5 –	Valores médios e desvio padrão do índice <i>Fp</i> por profundidade em cada região da PCA.....	40
Tabela 6 –	Resultados do teste <i>pair-wise</i> da PERMANOVA para as regiões da pluma (pluma, região de transição e fora da pluma)	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	ESPECÍFICOS.....	20
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.2	DESENHO AMOSTRAL.....	22
3.3	ANÁLISE DE PIGMENTOS.....	23
3.4	ANÁLISES QUIMIOTAXÔNICAS (CHEMTAX).....	25
3.5	PRODUÇÃO NOVA X REGENERADA.....	25
3.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	26
4	RESULTADOS.....	27
4.1	VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	27
4.1.1	Nitrato.....	27
4.1.2	Nitrito.....	27
4.1.3	Fosfato.....	27
4.1.4	Silicato.....	28
4.1.5	Oxigênio dissolvido.....	28
4.1.6	Salinidade.....	29
4.1.7	Temperatura.....	29
4.2	BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA (CHL-A).....	33
4.2.1	Biomassa total (TChl-a).....	33
4.2.2	Pico- e Nanofitoplâncton.....	33
4.2.3	Microfitoplâncton.....	35
4.3	PROPORÇÃO DO MICROFITOPLÂNCTON X PICO- E NANOFITOPLÂNCTON.....	36
4.4	ESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA (HPLC-CHEMTAX)	37
4.5	PRODUÇÃO NOVA X PRODUÇÃO REGENERADA.....	39
4.6	ANÁLISES MULTIVARIADAS.....	40
5	DISCUSSÃO.....	43

5.1	BIOMASSA TOTAL (TCHL-A) E DO MICROFITOPLÂNCTON.....	43
5.2	PROPORÇÃO DO MICROFITOPLÂNCTON X PICO- E NANOFITOPLÂNCTON.....	47
5.3	ESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA.....	48
5.4	PRODUÇÃO NOVA X PRODUÇÃO REGENERADA.....	56
6	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A comunidade fitoplanctônica constitui a base da maioria das teias alimentares marinhas e domina a produção primária líquida nos oceanos sendo responsável por aproximadamente 50% da produção total do planeta, além de contribuir para o sequestro de CO₂ atmosférico, bem como para a regulação dos ciclos biogeoquímicos globais de muitos elementos como carbono, nitrogênio e fósforo (FIELD et al., 1998; LITCHMAN; KLAUSMEIER, 2008; FINKEL et al., 2010; FALKOWSKI, 2012; BENOISTON et al., 2017).

Nos ecossistemas marinhos, essa produção primária pode ser nova ou regenerada. A produção nova resulta da entrada de nutrientes alóctones para zona eufótica, a partir da difusão desses nutrientes de águas profundas ou por processos de ressurgência, escoamento de rios e fixação de N₂. Geralmente é calculada através das medições de fixação de nitrato pelo fitoplâncton (DUGDALE; GOERING, 1967; EPPLEY; PETERSON, 1979; EPPLEY, 1980; METZLER et al., 1997; BODE et al., 2002). Por outro lado, a produção regenerada é o resultado da reciclagem dos nutrientes nas águas superficiais através da teia trófica (EPPLEY; PETERSON, 1979). Sua fonte principal de nitrogênio é a amônia, ureia e em menores concentrações aminoácidos e outros componentes orgânicos de nitrogênio dissolvido, derivados das excretas de animais (DUGDALE; GOERING, 1967; EPPLEY; PETERSON, 1979; GONZALEZ-RODRIGUEZ et al., 2017; METZLER et al., 1997; BODE et al., 2002).

Nos oceanos oligotróficos das regiões tropicais, há o domínio da produção regenerada, pois as altas temperaturas aumentam a estratificação da coluna d'água e a espessura da termoclina, impedindo os processos de mistura e advecção de nutrientes de águas profundas (EPPLEY, 1980; EPPLEY; PETERSON, 1979; TRUJILLO e THURMAN, 2011). Neste caso, a produção primária é sustentada principalmente pela absorção da amônia regenerada *in situ* (HARRISON, 1980; STOLTE; RIEGMAN, 1995).

Devido a essa limitação de nutrientes nessas regiões, a biomassa e a produção primária fitoplanctônica são relativamente baixas (EPPLEY, 1980; SHELDON, 1984; KOENING; MACÊDO, 1999; MARAÑÓN et al., 2003; SOUZA et al., 2013; MARAÑÓN, 2015a; FARIAS et al., 2022), mesmo com uma alta incidência de luz, essa limitação molda o padrão das comunidades, pela presença principalmente dos organismos de pequenas dimensões (KOENING; MACÊDO, 1999; KOSTADINOV; SIEGEL; MARITORENA, 2010; RIBEIRO et al., 2016; FARIAS et al., 2022). Essa maior

contribuição ocorre devido a sua maior eficiência na absorção de nutrientes (alta relação superfície-volume) quando presentes em baixas concentrações (DUGDALE; WILKERSON, 1992; CHISHOLM, 1992; LANGE et al., 2018; HILLEBRAND et al., 2022; MARAÑÓN, 2015a).

A distribuição da abundância dos diferentes tamanhos do fitoplâncton desempenha um papel fundamental nos ecossistemas pelágicos, pois estabelece a organização trófica das comunidades planctônicas, e como consequência, o funcionamento biogeoquímico do ecossistema (HUETE-ORTEGA et al., 2011; MARAÑÓN, 2015). Por ser uma característica funcional decisiva, o tamanho tem implicações a nível celular (crescimento, fotossíntese e respiração, absorção de luz e nutrientes) e ecológicas (abundância da população, taxas de pastoreio, interações tróficas e diversidade) (CHISHOLM, 1992; WAITE et al., 1997; HEIN; PEDERSEN; SAND-JENSEN, 1995; FINKEL, 2001; LITCHMAN; KLAUSMEIER, 2008; HILLEBRAND et al., 2022).

A fração do fitoplâncton constituída pelos organismos de células menores (picofitoplâncton $< 2 \mu\text{m}$ e nanofitoplâncton $2\text{--}20 \mu\text{m}$) representam a maior parte da biomassa e produção primária em águas oligotróficas e quentes dominadas pela produção regenerada (EPPLEY, 1980; DUGDALE; WILKERSON, 1992; KOSTADINOV; SIEGEL; MARITORENA, 2010). Em regimes eutróficos e sob condições de turbulência essa produção é geralmente dominada pelos organismos maiores (microfitoplâncton $>20 \mu\text{m}$) (EPPLEY, 1980; DUGDALE; WILKERSON, 1992; FALKOWSKI; OLIVER, 2007a; DUGDALE; WILKERSON, 1992; KOSTADINOV; SIEGEL; MARITORENA, 2010).

Uma das formas de se estudar a comunidade fitoplanctônica é através da quantificação das concentrações de chl-a, pigmento comum aos organismos e que historicamente é tido como um *proxy* indispensável para a estimativa da biomassa dessa comunidade (DAVIES et al., 2018). Devido as suas propriedades ópticas únicas, foi possível o desenvolvimento de técnicas de medição espectrofotométrica (JEFFREY; HUMPHREY, 1975) e fluorométrica (HOLM-HANSEN et al., 1965).

Além da clorofila-a existem outros pigmentos acessórios (carotenoides e ficobilinas), que também desempenham um importante papel para a fotossíntese, aumentando o espectro de absorção da luz visível, e ainda na fotoproteção, prevenindo danos celulares provocados pela alta irradiância (BIDIGARE; HEUKELEM; TREES, 2005; WRIGHT; JEFFREY, 2006). Esses pigmentos têm sido

comumente utilizados como marcadores para auxiliar a identificação e quantificação da comunidade fitoplanctônica (IRIGOIEN et al., 2004; GONÇALVES-ARAUJO et al., 2012; MENDES et al., 2011; LIMA et al., 2019; FARIAS et al., 2022).

Alguns desses pigmentos biomarcadores são exclusivos de uma determinada classe ou gênero e podem ser usados na diferenciação dos grupos, como por exemplo, a Divinil Clorofila-a (Div. Chl-a) em *Prochlorococcus* (MACKEY et al., 1996; ROY et al., 2011; WRIGHT; JEFFREY, 2006).

Um dos métodos mais utilizados nas últimas décadas na separação, identificação e quantificação desses pigmentos é a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (do inglês, High Performance Liquid Chromatography – sigla, HPLC), que permite determinar simultaneamente as concentrações de uma ampla gama de carotenoides e clorofilas e seus produtos de degradação (ZAPATA; RODRÍGUEZ; GARRIDO, 2000; VAN HEUKELEM; THOMAS, 2001; IRIGOIEN et al., 2004; LATASA, 2007; MENDES et al., 2011; BIDIGARE; HEUKELEM; TREES, 2005).

Apesar da eficiência do método, a interpretação dos dados de análise de pigmentos é complexa, tornando difícil a obtenção de informações precisas sobre a composição das assembleias fitoplanctônicas (MENDES et al., 2011). Para um uso mais eficaz dos dados da análise de HPLC foi desenvolvido um software de quimiotaxonomia CHEMTAX, que utiliza uma tabela de táxons esperados e as razões pigmentares pré-definidas (razão entre o pigmento marcador e a chl-a) para calcular a abundância relativa e a contribuição dos diferentes grupos taxonômicos para a Chl-a total (MACKEY et al., 1996; WRIGHT et al., 1996, 2009).

Desde que foi proposta, tal metodologia têm sido comumente utilizada para caracterizar a distribuição de grupos do fitoplâncton em diversas partes do planeta (MENDES et al., 2011; MIRANDA-ALVAREZ et al., 2020; PAN et al., 2020; SEOANE et al., 2011; SWAN et al., 2016), sugerindo que o CHEMTAX pode conceder uma visão mais completa das assembleias fitoplanctônicas em comparação com a microscopia, visto que grupos frágeis e de menor tamanho, especialmente do picofitoplâncton, também podem ser detectados (MACKEY et al., 1996; PAN et al., 2020).

A Plataforma Continental Amazônica (PCA), sofre grande influência do rio Amazonas, o qual possui a maior bacia hidrográfica e a maior descarga de água doce do mundo, o que corresponde a cerca de 15-20% do fluxo de água fluvial para os oceanos (MEYBECK, 1982; RICHEY et al., 1986; SMOAK; KREST; SWARZENSKI, 2005; ESPINOZA VILLAR et al., 2009). Sobre a plataforma continental norte brasileira,

a pluma amazônica de baixa salinidade (<35), formada através da mistura rio/oceano, sofre influência de várias forçantes como correntes oceânicas (Corrente Norte do Brasil), ventos, vazão dos rios e variação das marés (GEYER et al., 1996; LENTZ, 1995; LENTZ; LIMEBURNER, 1995; NITTROUER; DEMASTER, 1996).

Essa pluma amazônica transporta grandes quantidades de sedimentos de origem terrestre, nutrientes e matéria orgânica dissolvida para a plataforma continental brasileira e oceano adjacente, contribuindo para o aumento da produtividade desse ambiente tipicamente oligotrófico (GABIOUX; VINZON; PAIVA, 2005; SMOAK; KREST; SWARZENSKI, 2005; HEWSON et al., 2006; COLES et al., 2013; GOES et al., 2014; MEDEIROS et al., 2015). Além do incremento de nutrientes, a pluma influencia fortemente a estrutura das comunidades biológicas na plataforma continental pelo seu papel na estratificação do oceano superior, pois inibe a mistura das águas oceânicas de fundo com a camada superficial de baixa salinidade (LENTZ; LIMEBURNER, 1995).

Essas águas da pluma sob influência da Corrente Norte do Brasil (CNB), alteram drasticamente a dinâmica do silício no Oceano Atlântico Tropical Ocidental, formando extensas florações de fitoplâncton dominadas por diatomáceas, e podem contribuir significativamente para a demanda global do silício, além de contribuir para o fluxo de energia e matéria fora da plataforma continental (SHIPE et al., 2006).

Diversos estudos relacionados à comunidade fitoplanctônica já foram realizados na região sob influência da pluma do Amazonas (SMITH JR.; DEMASTER, 1996; DEMASTER et al., 1996; DEMASTER; POPE, 1996; SHIPE et al., 2006; SANTOS et al., 2008a, 2008b; SUBRAMANIAM et al., 2008). Subramaniam et al., (2008) reforçam a importância dos nutrientes fornecidos pela pluma para o aumento da produção primária no oceano e Shipe et al., (2006) destacaram a importância do papel das diatomáceas na biomassa e na produtividade dentro da pluma.

Em estudos mais recentes, Araújo et al. (2017), através de análises de diversidade taxonômica do microfitoplâncton, destacaram as diatomáceas como dominantes desde a foz do rio até a borda da área influenciada pela retroflexão da Corrente Norte do Brasil (CNB) e de cianobactérias e dinoflagelados na região oligotrófica da Contra Corrente Norte Equatorial (CCNE). Já Otsuka et al. (2018), ressaltam a importância dos pequenos organismos do fitoplâncton ($<20\mu\text{m}$) contribuindo com mais de 50% da clorofila-a total em quase todas as estações amostradas.

Contudo, apesar dos diversos esforços para o conhecimento do fitoplâncton nesta área, poucos trabalhos têm uma abordagem multidisciplinar para melhor compreender a distribuição e composição do fitoplâncton, assim como a contribuição das diferentes classes de tamanho para a chl-a sobre a plataforma e oceano adjacente. Diante disso, o presente estudo propõe as seguintes hipóteses e objetivos:

- a) Há um gradiente de tamanho do fitoplâncton em função da concentração de nutrientes ao longo do eixo costa-oceano, com o domínio de microfitoplâncton na pluma, rica em nutrientes, e do pico- e nanofitoplâncton nas áreas de transição e fora da pluma;
- b) O carreamento de nutrientes pela pluma aumenta a produtividade primária da área sobre a plataforma, aumentando a biomassa fitoplanctônica nessa região e contribuindo para que haja dominância de diatomáceas, beneficiadas pelo *input* de silicato;
- c) Há predominância da produção primária nova na região, sustentada pela entrada de nutrientes de origem continental, e esta produção está acoplada a estrutura de tamanho da comunidade.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Determinar a biomassa, a contribuição relativa das diferentes classes de tamanho, a composição e os padrões de distribuição dos principais grupos do fitoplâncton sobre a plataforma continental amazônica e oceano adjacente, a partir dos pigmentos marcadores, relacionando aos processos físicos e as variáveis físico-químicas dominantes na região.

2.2 ESPECÍFICOS

- Descrever a influência da pluma do rio Amazonas sobre a distribuição da biomassa e estrutura da comunidade fitoplanctônica, bem como sua contribuição das diferentes classes de tamanho (pico- e nanofitoplâncton, microfitoplâncton);
- Determinar a influência da pluma sobre a produção primária nova e regenerada e sua relação com o tamanho celular;
- Determinar quais os principais processos físico-químicos responsáveis pelas mudanças na estrutura e biomassa da comunidade;

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A PCA é caracterizada por ser um ambiente altamente dinâmico, de clima quente e úmido, com altas temperaturas que variam de 24°C no inverno à 27°C no verão e chuvas abundantes ao longo do ano ($>60 \text{ mm mês}^{-1}$; $>1500 \text{ mm ano}^{-1}$). O período de chuvas ocorre entre fevereiro e abril e os ventos predominantes são os alísios de sudeste com velocidades entre 9m/s e 14 m/s (REVIZEE, 2006; NITTROUER; DEMASTER, 1996; OTSUKA et al., 2018). A PCA possui uma ampla extensão, com largura que varia de 100-330 km, com a quebra da plataforma ocorrendo na faixa de 80 a 120 m (COUTINHO, 1995; NEUMANN-LEITÃO et al., 2018).

A PCA é influenciada pela alta descarga de água doce do rio Amazonas, que corresponde a cerca de 15-20% do fluxo de água fluvial para o oceano (MEYBECK, 1982; RICHEY et al., 1986; SMOAK; KREST; SWARZENSKI, 2005; ESPINOZA VILLAR et al., 2009). Essa descarga varia sazonalmente, com máximas ocorrendo em Maio-Junho ($2.4 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e mínimas em Outubro-Novembro ($\sim 0,8 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e média de $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (OLTMAN, 1968; DEMASTER et al., 1996; LENTZ, 1995).

A mistura rio/oceano que ocorre sobre a PCA, forma uma pluma de baixa salinidade (inferior a 35) que possui entre 3-10m de espessura (média de 7,3m) e 80 a 200km de largura e que está sujeita a influência de várias forçantes como correntes oceânicas, ventos, vazão dos rios e variação das marés (LENTZ, 1995; NITTROUER; DEMASTER, 1996; GEYER et al., 1996; LENTZ; LIMBURNER, 1995; MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010; GOES et al., 2014).

Todos esses fatores sofrem variações sazonais que vão consequentemente afetar a dispersão dessa pluma (GEYER et al., 1996; LENTZ, 1995; NITTROUER; DEMASTER, 1996). Entretanto, a Corrente Norte do Brasil (CNB) juntamente com os ventos, constituem os principais fatores que influenciam seus padrões de dispersão, com o vento funcionando como um regulador da velocidade de seu fluxo para noroeste e do seu tempo de residência junto a foz do rio (MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010). De janeiro a abril a pluma está sujeita a uma maior influência dos ventos de NE e baixa influência da CNB, o que resulta em um aumento de seu tempo de residência próximo da foz do rio e costa adjacente (JOHNS et al., 1998; MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010; STRAMMA; SCHOTT, 1999; JOHNS et al., 2002).

De abril a julho, a pluma se espalha principalmente para a região do Caribe devido a combinação das altas descargas, aumento das taxas de transporte da CNB, que contribuem para a dispersão da pluma e a transição do vento NE para o vento SE, que aumenta a velocidade de transporte para noroeste (MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010). De agosto a dezembro, a pluma se dispersa principalmente para o Oceano Atlântico Equatorial Central e durante este período, a retroflexão da CNB é o principal fator que influencia sua forma e padrão de dispersão (MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010).

3.2 DESENHO AMOSTRAL

As amostragens foram realizadas durante campanha do projeto “Amazon shelf mixing and its impact on ecosystems (AMAZOMIX)” a bordo do RV Antea, entre 26 de agosto e 29 de setembro de 2021, a bordo do R/V Antea, na região de desembocadura do rio Amazonas e plataforma adjacente, em 33 estações de coleta (fig. 1). Em todas as estações foram obtidos perfis verticais de temperatura, salinidade e fluorescência (sensor WETLabs – Eco FLRTD-4707) a partir de um CTD Seabird SBE911+. Amostras de água para análises físico-químicas e de pigmentos foram coletadas a partir de garrafas do tipo Niskin acopladas a uma Rossete em 3 profundidades: superfície, profundidade de máxima clorofila (PMC) (com profundidade média de 66.9m) e PMax (Profundidade máxima de coleta, determinada em cada estação em função do perfil de fluorescência) para estações oceânicas, sendo esta última substituída por “fundo raso” nas estações sobre a plataforma (~50m), amostradas a ~5m do fundo.

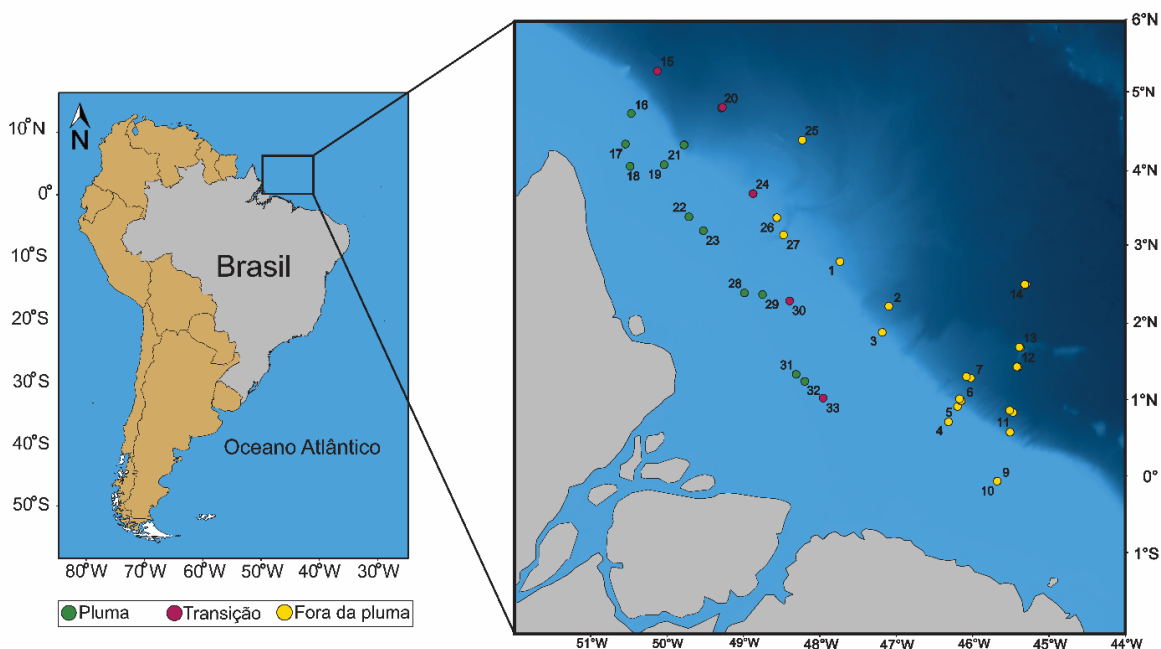
Para os parâmetros químicos foram coletadas amostras de água para estimar a concentração dos nutrientes (nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) e silicato (SiO_4^{4-})). As amostras foram armazenadas em frascos Falcon de 30 ml e estabilizadas em estufa a 80°C durante 2h30 (pasteurização), e então quantificados pelo método de Grasshoff et al. (1983). Os dados de nutrientes foram analisados pelo laboratório “Instrumentation, Moyens Analytiques, Observatoires en Géophysique et Océanographie” (IMAGO) do Institut de Recherche pour le Développement (IRD), em Brest, França.

3.3 ANÁLISE DE PIGMENTOS

Para cada estação e profundidade, a água do mar coletada foi filtrada em filtros de fibra de vidro Whatman GF/F de 25 mm. Foram filtrados 1L de água para a biomassa total e para o pico- e nanofitoplâncton ($<20\mu\text{m}$), sendo para esta última pré-filtrada em malha de $20\mu\text{m}$. Os filtros foram mantidos a -80°C para posterior análise da concentração dos pigmentos através de cromatografia líquida de alta performance (do inglês High-Performance Liquid Chromatography - HPLC) em laboratório. A concentração dos pigmentos foi determinada para o pico- e nanofitoplâncton ($<20\mu\text{m}$) e microfitoplâncton ($>20\mu\text{m}$), sendo esta última a partir da diferença entre a biomassa total e a fração $<20\mu\text{m}$.

A análise de pigmentos foi realizada em HPLC (Agilent Technology 1200 series) seguindo o protocolo utilizado pelo Laboratório de Oceanografia de Villefranche (RAS e CLAUSTRE, 2004), adaptado do método descrito por Van Heukelem e Thomas (2001).

Figura 1 - Área de estudo com a posição das estações amostrais na plataforma continental do rio Amazonas e oceano adjacente



Fonte: A Autora (2023).

Os pigmentos foram extraídos em 3 ml de uma mistura de metanol e vitamina E (3 ml de solução de acetato de vitamina E a cerca de $2,5\text{ g.l}^{-1}$ em 1 litro de metanol;

a vitamina E é utilizada como padrão interno para calcular o rendimento da extração). Em seguida foram colocados no congelador a -20°C durante uma hora, depois submetidos a ultrassons (sonicadas) durante 15 segundos e novamente colocados no congelador a -20°C durante uma hora. Em seguida as amostras foram centrifugadas por 10 minutos a 3500 rpm a 4°C. Posteriormente foram filtradas em filtros com porosidade de 0,2µm para remoção de detritos celulares. Uma alíquota de 125 µl de amostra foi retirada e diluída em um loop de injeção com 125 µl de solução de acetato de tetrabutilamônio 28 mM.

Os pigmentos foram então separados em uma coluna ZORBAX Eclipse XDB-C8 (Agilent Technology), com 3 mm de diâmetro, 150 mm de comprimento e 3,5 µm de porosidade a uma temperatura de 60 °C e a vazão de 0,55 ml.min⁻¹. A separação foi baseada em um gradiente linear entre uma solução de metanol e acetato de tetrabutilamônio 28 mM, 70:30 (v/v) como solvente A e uma solução de metanol 100% como solvente B.

O HPLC foi calibrado com padrões externos (DHI Water and Environment, Horsholm, Denmark). A clorofila-a e Divinil clorofila-a foram utilizadas para determinar a biomassa fitoplanctônica total (TChl-a), enquanto os demais pigmentos marcadores permitiram identificar os principais grupos algais, conforme destacado na tabela 1.

Tabela 1 - Pigmentos biomarcadores dos principais grupos fitoplanctônicos, de acordo com Jeffrey et al. (2011)

Táxons	Pigmentos	Acrônimo
Prasinófitas	Prasinoxantina, Zeaxantina, Clorofila-b, α-caroteno, β-caroteno, Neoxantina	Pras; Zea; Chl-b; α-Car; β-Car; Neo
Dinoflagelados	Peridinina, Clorofila-c2, β-caroteno	Peri; Chl-c2; β-Car
<i>Synechococcus</i>	Zeaxantina, β-caroteno	Zea; β-Car
<i>Trichodesmium</i>	Zeaxantina, β-caroteno	Zea; β-Car
Haptófitas	19'BF, Fucoxantina, 19'HF, Clorofila-c2, Clorofila-c3, α-caroteno, β-caroteno	19'BF, Fuco, 19'HF, Chl-c2; chl-c3; α-Car; β-Car
Diatomáceas	Fucoxantina, Clorofila-c2, β-caroteno	Fuco; Chl-c2; β-Car
Criptófitas	Clorofila-c2, α-caroteno, Alloxantina	Chl-c2; α-Car; Allo
<i>Prochlorococcus</i>	Zeaxantina, α-caroteno, β-caroteno	Zea; α-Car; β-Car;
Comunidade total (TChl-a)	Clorofila-a, Divinil Clorofila-a	Chl-a; Div. Chl-a

Fonte: A Autora (2023).

3.4 ANÁLISES QUIMIOTAXONÔMICAS (CHEMTAX)

Para determinação da abundância relativa dos diferentes grupos a partir de dados de concentração de pigmentos, foi utilizado o *software* de quimiotaonomia CHEMTAX *versão 1.95* (MACKEY et al., 1996; WRIGHT et al., 1996, 2009). Este software utiliza razões pré-definidas de pigmentos marcadores para estimar a contribuição dos diferentes grupos taxonômicos para a Chl-a total (MACKEY et al., 1996).

As proporções iniciais de pigmento das principais classes de algas aplicadas foram as utilizadas por Lima (2019), derivadas de Higgins et al. (2011), sendo identificados grupos quimiotaonomia de acordo com Jeffrey et al. (2011). A mesma matriz inicial de proporção de pigmento foi aplicada aos dados de todas as profundidades (a matriz de entrada é encontrada na tabela 2). Os dados de cada profundidade foram analisados separadamente para minimizar possíveis variações nos procedimentos de otimização do CHEMTAX.

Para otimização da matriz inicial, foram geradas 60 novas matrizes de proporção de pigmento a partir da multiplicação de cada proporção contida na matriz inicial por uma função aleatória. A matriz de saída é o resultado da média de 10% ($n = 6$) das proporções geradas com menor raiz quadrada média residual (Wright et al., 2009).

3.5 PRODUÇÃO NOVA X REGENERADA

A partir dos dados de pigmentos, foi calculado ainda o índice Fp (CLAUSTRE, 1994) que pode ser utilizado para determinar a relação do fitoplâncton envolvido na produção primária nova em relação à produção total. Para isto, foi utilizada a seguinte equação:

$$Fp = \frac{\sum fuco + \sum peri}{\sum fuco + \sum peri + \sum 19' - HF + \sum 19' - BF + \sum zea + \sum Chl\ b + \sum allo}$$

Onde o numerador corresponde à biomassa relativa à produção nova, composta por Dinophyceae e Bacillariophyceae, e o denominador corresponde à biomassa total dos principais grupos da comunidade fitoplanctônica.

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados biológicos e ambientais foram testados quanto a normalidade (*Kolmogorov-Smirnov*) e homoscedasticidade (Levene). Posteriormente, comparados quanto a influência da pluma (dentro da pluma x área de transição x fora da pluma) e entre as profundidades (Superfície x PMC x PMax x Fundo raso), através da análise de variância paramétrica (ANOVA) ou não-paramétrica (*Kruskal-Wallis*).

Para compreender as relações entre os componentes biológicos e os fatores físico-químicos foram utilizadas Análises de redundância (RDA) e Análise Permutacional Multivariada de Variância (PERMANOVA). A RDA permitiu compreender as relações entre os componentes biológicos e os fatores físico-químicos, enquanto a PERMANOVA foi utilizada para avaliar a estrutura da comunidade. Além disso, foi realizado um Escalonamento Multidimensional não Métrico (nMDS) para calcular o índice de dissimilaridade entre os grupos de cada região.

Para corroborar os resultados obtidos através da nMDS e PERMANOVA, foi realizada uma análise de porcentagem de similaridade (SIMPER), que tem como objetivo determinar a contribuição dos grupos do fitoplâncton para a separação das regiões (pluma, transição, fora) baseado na similaridade.

Tabela 2 - Classes do fitoplâncton e Matrix de entrada para fração total e do pico- e nanofitoplâncton

	Buta-fuco	Peri	Fuco	Hex-fuco	Chl-c2	Pras	Chl-c3	Zea	Chl b	α -car	β -car	Allo	Neo	Dv-chl a	Chl a
Matrix de input															
Prasinófitas (*)	0	0	0	0	0	0.245	0	0.058	0.704	0.012	0.049	0	0.063	0	1
Dinoflagelados	0	0.558	0	0	0.218	0	0	0	0	0	0.026	0	0	0	1
<i>Synechococcus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.636	0	0	0.201	0	0	0	1
<i>Trichodesmium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.151	0	0	0.029	0	0	0	1
Haptófitas	0.050	0	0.480	0.740	0.282	0	0.211	0	0	0.015	0.030	0	0	0	1
Diatomáceas	0	0	0.623	0	0.045	0	0	0	0	0	0.026	0	0	0	1
Criptófitas	0	0	0	0	0.196	0	0	0	0	0.024	0	0.379	0	0	1
<i>Prochlorococcus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.389	0.994	0.178	0.027	0	0	1	0

Fonte: A Autora (2023).

(*) As clorófitas e outras algas verdes (prasinófitas sem prasinoxantina) não foram incluídas na análise CHEMTAX, pois foram encontradas correlações positivas significativas entre prasinoxantina (exclusiva de prasinófitas) e concentrações de neoxantina (pigmento presente em clorófitas e todos as prasinófitas), portanto, as concentrações de neoxantina (pigmento típico de flagelados verdes) foram atribuídas puramente a prasinófitas com prasinoxantina.

4 RESULTADOS

4.1 VARIÁVEIS AMBIENTAIS

4.1.1 Nitrato

As concentrações de nitrato na superfície variaram de indetectáveis em várias estações das três regiões e aumentaram com a profundidade fora da pluma, com concentração máxima de $13.92 \mu\text{mol/L}$ no PMax da St7 (figura 2A). Apesar dessas maiores concentrações nas águas profundas, não foram observadas diferenças significativas em nenhuma das profundidades das regiões (*Kruskal-Wallis*; ANOVA; $p>0.05$). Entre áreas, apesar da região fora da pluma apresentar maiores concentrações médias ($2.17 \mu\text{mol/L} \pm 3.82$), quando comparadas com a pluma ($0.61 \pm 0.97 \mu\text{mol/L}$) e região de transição ($0.59 \pm 1.31 \mu\text{mol/L}$), não houve diferenças entre as concentrações das regiões (*Kruskal-Wallis*; $p>0.05$) (tabela 3; fig.2A).

4.1.2 Nitrito

Os maiores valores de nitrito ocorreram sobre a plataforma, com a presença de uma “língua” que permanece em direção ao fundo raso (fig.2B). Essas concentrações foram significativamente mais elevadas (*Kruskal-Wallis*; $p=0.009$) na superfície da pluma ($0.06 \pm 0.04 \mu\text{mol/L}$), quando comparada com a superfície da zona de transição ($0.02 \pm 0 \mu\text{mol/L}$) (*Dunn's Method*; $p=0.009$) e entre a superfície fora da pluma ($0.04 \pm 0.01 \mu\text{mol/L}$) com a superfície da zona de transição (*Dunn's Method*; $p=0.047$). Além da superfície, foram observadas diferenças significativas entre as concentrações da pluma no PMC (*Kruskal-Wallis*; $p=0.02$) ($0.22 \pm 0.20 \mu\text{mol/L}$), apenas quando comparadas com a região fora da pluma (*Dunn's Method*; $p=0.036$) ($0.08 \pm 0.05 \mu\text{mol/L}$). O nitrito quando comparado entre as áreas foi significativamente maior na pluma (*Kruskal-Wallis*; $p=0.006$) ($0.21 \pm 0.24 \mu\text{mol/L}$) apenas em relação a região fora (*Dunn's Method*; $p=0.005$) ($0.07 \pm 0.06 \mu\text{mol/L}$) (tabela 3).

4.1.3 Fosfato

As concentrações de fosfato, seguiram um padrão vertical similar ao nitrato, aumentando com a profundidade na região fora da pluma (fig. 2C) com máximas de $0.37 \mu\text{mol/L}$ na região de transição e $0.98 \mu\text{mol/L}$ fora da pluma, ambos no PMax. Entretanto, apesar dessas maiores concentrações nos PMax da região offshore, não foram observadas diferenças significativas entre as profundidades de cada região

(*Kruskal-Wallis*; ANOVA; $p > 0.05$). Já entre áreas, a pluma apresentou picos de fosfato (St28, 29, 31 e 32) nas estações localizadas próximas a desembocadura do rio Amazonas (0.47, 0.30, 0.42, 0.30 $\mu\text{mol/L}$, respectivamente), entretanto os valores médios foram mais elevados fora da pluma ($0.23 \pm 0.26 \mu\text{mol/L}$). Apesar disso, não foram observadas diferenças significativas entre as áreas (*Kruskal-Wallis*; $p > 0.05$) (tabela 3).

4.1.4 Silicato

Para o silicato as concentrações foram significativamente maiores na superfície na pluma ($36.83 \pm 22.00 \mu\text{mol/L}$) e transição ($5.16 \pm 2.33 \mu\text{mol/L}$) (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$) em relação a região fora da pluma ($1.05 \pm 0.16 \mu\text{mol/L}$) (*Dunn's Method*; $p < 0.001$, $p = 0.029$, respectivamente), havendo decréscimo em direção ao oceano (figura 2D). No PMC também foram observadas diferenças significativas (*Kruskal-Wallis*; $p = 0.005$) apenas entre a pluma ($3.5 \pm 4.6 \mu\text{mol/L}$) e a região fora da pluma ($1.21 \pm 0.26 \mu\text{mol/L}$) (*Dunn's Method*; $p = 0.004$). Quando comparadas entre áreas, as concentrações na pluma foram significativamente maiores (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$) ($16.63 \pm 21.46 \mu\text{mol/L}$), com máxima de $71.14 \mu\text{mol/L}$ na superfície na St28, quando comparadas com fora da pluma (*Dunn's Method*; $p < 0.001$) ($1.72 \pm 1.28 \mu\text{mol/L}$). Foram observadas ainda, diferenças entre a região de transição ($3.31 \pm 2.29 \mu\text{mol/L}$) e fora da pluma (*Dunn's Method*; $p = 0.006$) (tabela 3, fig.2D).

4.1.5 Oxigênio Dissolvido

Maiores concentrações de O_2 podem ser observadas nas estações mais próximas a costa sob influência da pluma (fig. 3A), com pico de 7.18 ml/L na superfície da St18. Essas maiores concentrações na superfície da pluma ($5.07 \pm 0.79 \text{ ml/L}$) foram significativamente maiores (*Kruskal-Wallis*; $p = 0.001$) em relação a região de transição ($4.48 \pm 0.03 \text{ ml/L}$) (*Dunn's method*; $p = 0.002$) e fora da pluma ($4.52 \pm 0.05 \text{ ml/L}$) (*Dunn's method*; $p = 0.015$) (figura 3A). Além da superfície, o PMC também apresentou picos de oxigênio (St22 com 5.48 ml/L) com diferença significativa (*Kruskal-Wallis*; $p = 0.014$) apenas entre a região fora da pluma (4.47 ± 0.07) que apresentou maiores concentrações em relação a zona de transição (4.35 ± 0.08) (*Dunn's method*; $p = 0.049$). Quando comparadas, as áreas não apresentaram diferenças significativas apesar das concentrações médias na pluma serem mais

elevadas (4.58 ± 0.72 ml/l) em relação a transição (4.33 ± 0.16 ml/L) e fora da pluma (4.40 ± 0.18 ml/L) (tabela 3; fig.3A).

4.1.6 Salinidade

A salinidade apresentou um gradiente crescente costa-oceano com valores significativamente menores na superfície sob influência da pluma (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$) (26.03 ± 5.43) apenas quando comparada com a região fora da pluma (*Dunn's method*; $p < 0.001$) (36.20 ± 0.12), sendo o valor mínimo de 16.17 na St23 (fig. 3B). Entre regiões, apesar das estações sob influência da pluma apresentarem valores mais baixos de salinidades em relação a região de transição (36.05 ± 0.57) e fora da pluma (36.21 ± 0.24), não foram observadas diferenças significativas entre as áreas (*Kruskal-Wallis*; $p > 0.05$) (tabela 3; fig. 3B). Para a comparação deste parâmetro entre as áreas, foi levado em consideração toda a coluna d'água e pela pluma apresentar uma fina espessura (3-10m) e ser restrita a camada superficial, a baixa salinidade característica dessa feição só é observada quando comparadas apenas os dados de superfície.

4.1.7 Temperatura

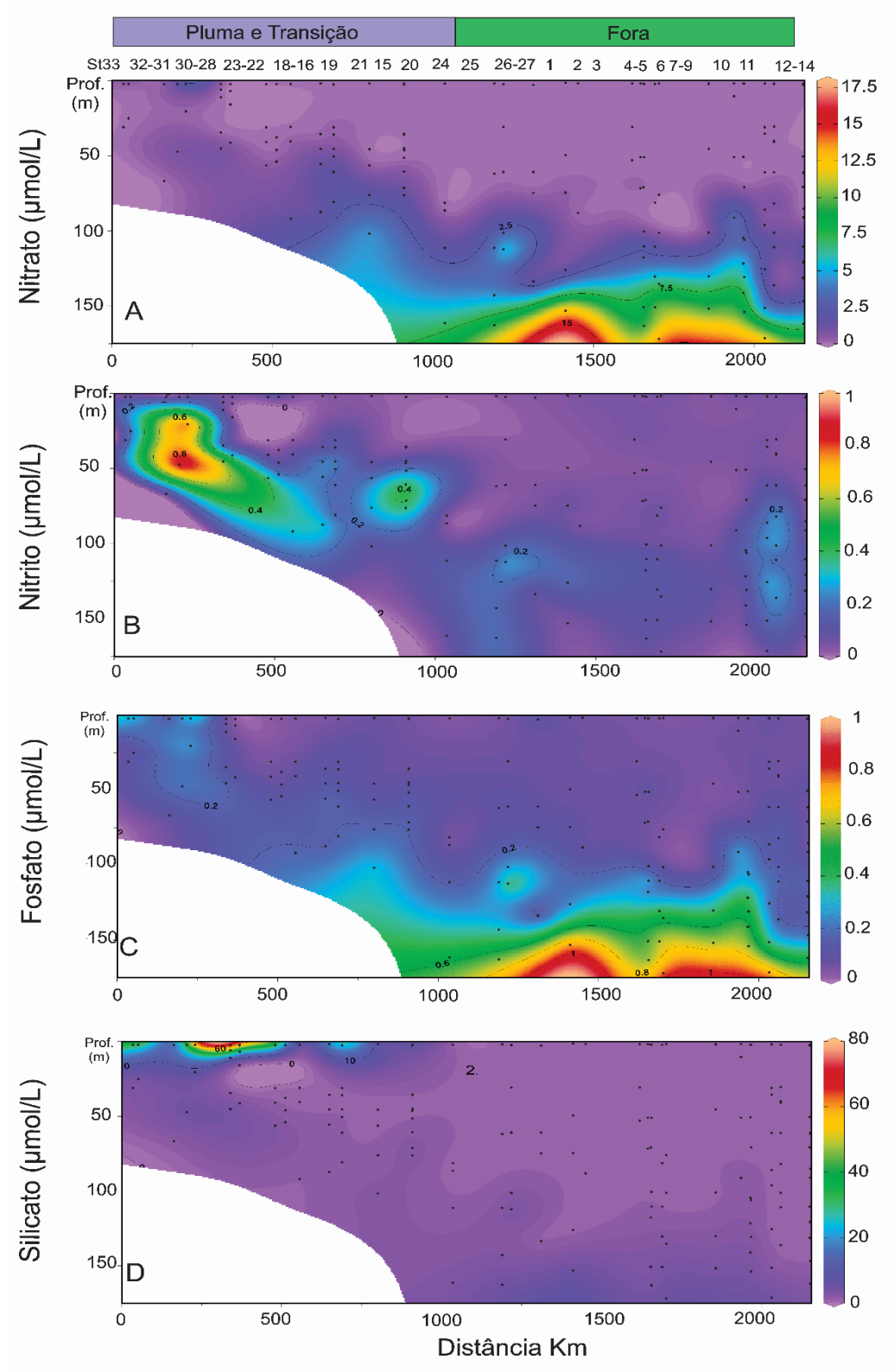
A temperatura apresentou valores significativamente maiores na superfície (ANOVA; $p < 0.001$) da pluma (29.65 C° ± 0.54) e região de transição (29.13 ± 0.72) (*Tukey Test*; $p < 0.001$) em relação a região fora da pluma (27.72 C° ± 0.45) (*Tukey Test*; $p < 0.001$) (figura 1D). Além da superfície, em PMax na pluma (25.48 C° ± 0.38) e transição (24.77 C° ± 0.89) foram observados valores significativamente mais elevados de temperatura (*Kruskal-Wallis*; $p = 0.002$) em relação a região fora da pluma (19.80 C° ± 3.42) (*Dunn's method*; $p = 0.012$, 0.048 , respectivamente). Quando comparadas as três regiões, a pluma apresentou maiores valores de temperatura (*Kruskal-Wallis*; $p = 0.001$) apenas em relação a região fora (*Dunn's method*; $p = 0.002$) (25.08 C° ± 3.89) (tabela 3; fig.3C).

Tabela 3 - Valores médios das variáveis ambientais em cada região da PCA. D.P.: desvio padrão. As letras sobrescritas indicam diferenças significativas em comparações aos pares

	Pluma	Transição	Fora da pluma
	Média + D.P.	Média + D.P.	Média + D.P.
Nitrito	0.21 ± 0.24 ^a	0.11 ± 0.13 ^{ab}	0.07 ± 0.06 ^b
Nitrato	0.61 ± 0.97 ^{ab}	0.59 ± 1.31 ^{ab}	2.17 ± 3.82 ^{ab}
Fosfato	0.16 ± 0.12 ^{ab}	0.14 ± 0.08 ^{ab}	0.23 ± 0.26 ^{ab}
Silicato	16.63 ± 21.46 ^a	3.31 ± 2.29 ^a	1.72 ± 1.28 ^b
O₂ dissolvido	4.58 ± 0.72 ^{ab}	4.33 ± 0.16 ^{ab}	4.40 ± 0.18 ^{ab}
Salinidade	31.88 ± 6.15 ^{ab}	36.05 ± 0.57 ^{ab}	36.21 ± 0.24 ^{ab}
Temperatura	27.91 ± 1.8 ^a	27.38 ± 1.85 ^{ab}	25.08 ± 3.89 ^b

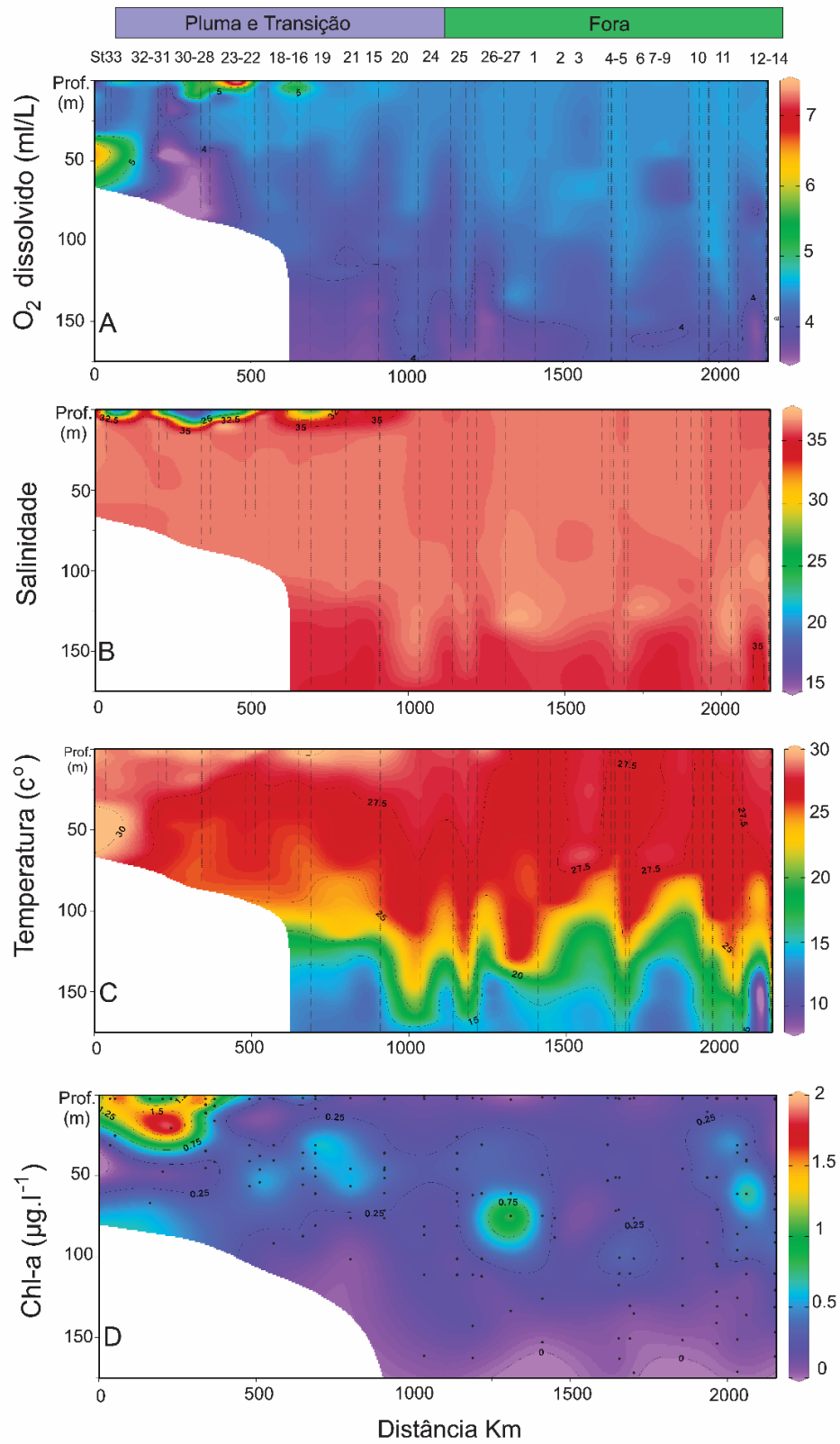
Fonte: A Autora (2023).

Figura 2 - Concentrações de nitrato (A), nitrito (B), fosfato (C) e silicato (D) em cada região da PCA



Fonte: A Autora (2023).

Figura 3 - Concentrações de oxigênio dissolvido (A), salinidade (B) e temperatura (C) e clorofila-a (D) em cada região da PCA



Fonte: A Autora (2023).

4.2 BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA (CHL-A)

4.2.1 Biomassa Total (TChl-a)

As concentrações de TChl-a (Clorofila-a + Divinil clorofila-a) na área de estudo, variaram de $0.007 \mu\text{g.l}^{-1}$ a $2.583 \mu\text{g.l}^{-1}$ com maiores concentrações nas estações da pluma, próximas à costa (fig. 3D). Na superfície na área da pluma ($0.84 \pm 0.68 \mu\text{g.l}^{-1}$) foi observado um pico de concentração de $2.583 \mu\text{g.l}^{-1}$ na St31, e as concentrações foram significativamente maiores (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$) apenas quando comparadas com a área fora da pluma (*Dunn's Method*; $p < 0.001$) (tabela 4).

No PMC apesar das maiores concentrações médias ocorrerem na pluma ($0.496 \pm 0.18 \mu\text{g.l}^{-1}$) em relação a região de transição ($0.435 \pm 0.126 \mu\text{g.l}^{-1}$) e fora da pluma ($0.409 \pm 0.258 \mu\text{g.l}^{-1}$), que apresentou um pico de concentração de $1.305 \mu\text{g.l}^{-1}$ na St1, não foram observadas diferenças significativas entre as áreas (*Kruskal-Wallis*; $p > 0.05$) (tabela 4).

No PMax a pluma apresentou maiores concentrações (*ANOVA*; $p = 0.001$) ($0.198 \pm 0.023 \mu\text{g.l}^{-1}$) em comparação com a área fora dela (*Tukey test*; $p = 0.004$) ($0.07 \pm 0.051 \mu\text{g.l}^{-1}$). Foram observadas ainda, diferenças entre a área de transição ($0.161 \pm 0.098 \mu\text{g.l}^{-1}$) e fora da pluma (*ANOVA*; $p = 0.001$) (*Tukey test*; $p = 0.023$) (tabela 4).

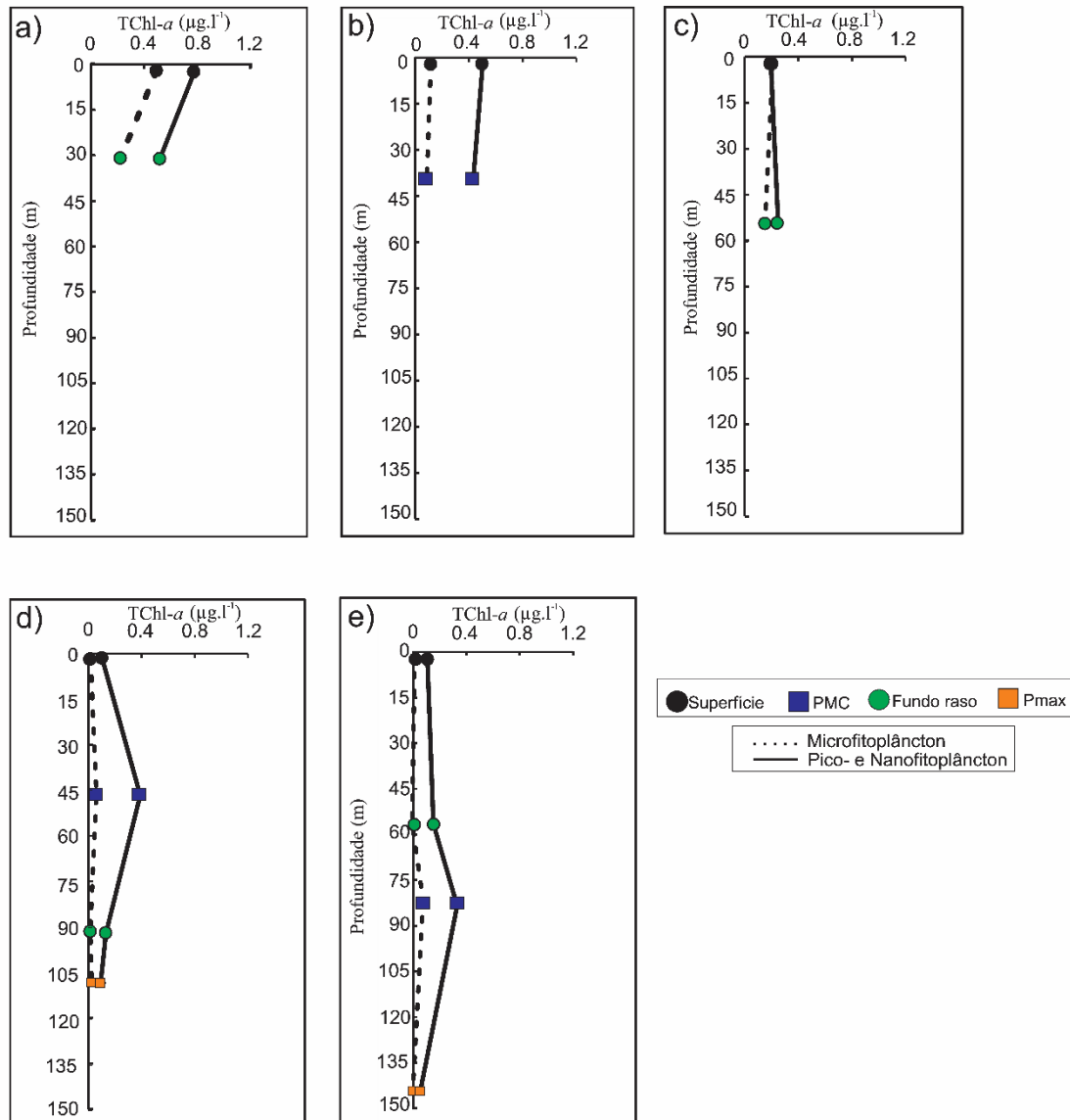
No fundo raso, apesar da pluma apresentar maiores concentrações ($0.580 \pm 0.774 \mu\text{g.l}^{-1}$), com um pico de $2.128 \mu\text{g.l}^{-1}$ na St28, quando comparadas com as áreas de transição ($0.321 \pm 0.186 \mu\text{g.l}^{-1}$) e fora da pluma ($0.14 \mu\text{g.l}^{-1} \pm 0.019$), não foram observadas diferenças entre as áreas (*Kruskal-Wallis*; $p > 0.05$) (tabela 4).

Quando comparadas entre áreas, foi observada diferenças significativas apenas nas concentrações médias da região da pluma ($0.625 \pm 0.584 \mu\text{g.l}^{-1}$) (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$) quando comparada com a região fora da pluma ($0.198 \pm 0.207 \mu\text{g.l}^{-1}$) (*Dunn's Method*; $p < 0.001$) (tabela 4).

4.2.2 Pico e Nanofitoplâncton

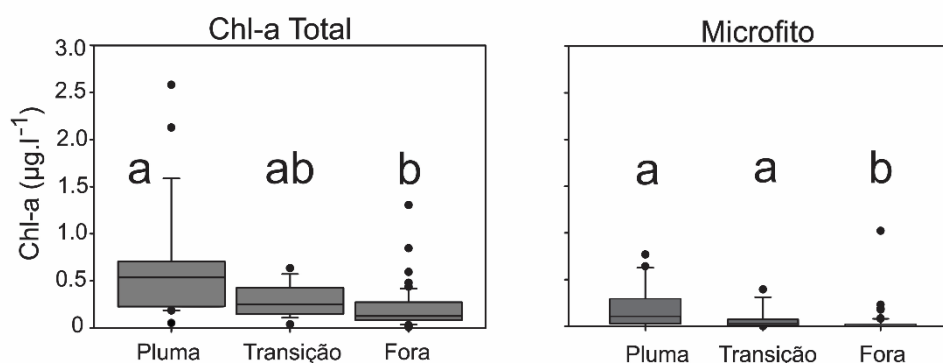
A fração do pico- e nanofitoplâncton dominou em 84% das estações ($n=28$) com contribuição mínima de 54% na St28 e 100% na St25. Diante dessa grande dominância (*Mann-Whitney*; $p > 0.05$), os padrões de distribuição observados para o pico- e nanofitoplâncton são os mesmos descritos para a biomassa total (TChl-a), sendo, portanto, suprimidos aqui.

Figura 4 - Perfis verticais dos valores médios de TChl-*a* para a fração do microfitoplâncton e pico- e nanofitoplâncton nas profundidades amostradas, onde a) Pluma: Estações próximas a desembocadura; b) Pluma: Estações com PMC; c) Transição: Estações rasas; d) Transição: Estações profundas, e) Fora da pluma. Note: Fora da pluma o fundo é mais raso que o PMC, pois as estações que possuem fundo raso, são estações que estão sobre a plataforma



Fonte: A Autora (2023).

Figura 5 - Concentrações de Chl-a para as frações total e do Microfitoplâncton em cada região da PCA



Fonte: A Autora (2023).

4.2.3 Microfitoplâncton

As concentrações de Chl-a do microfitoplâncton apresentaram um gradiente costa-oceano de decréscimo com maiores valores na pluma em todas as profundidades. Na superfície, os valores na área da pluma ($0.255 \pm 0.271 \mu\text{g.l}^{-1}$) foram significativamente diferentes apenas quando comparados a região fora da pluma ($0.022 \pm 0.04 \mu\text{g.l}^{-1}$) (*Kruskal-Wallis*; $p=0.002$) (*Dunn's Method*; $p=0.003$) (fig. 4; tabela 4).

No PMC as concentrações na pluma foram maiores ($0.106 \pm 0.098 \mu\text{g.l}^{-1}$) quando comparadas as regiões de transição ($0.048 \pm 0.042 \mu\text{g.l}^{-1}$) e fora da pluma ($0.082 \pm 0.224 \mu\text{g.l}^{-1}$), que apresentou pico de concentração de $1.022 \mu\text{g.l}^{-1}$ St1, entretanto, não foram observadas diferenças entre as regiões (*Kruskal-Wallis*; $p > 0.05$) (fig. 4; tabela 4).

No PMax apesar da área de transição apresentar maiores concentrações ($0.026 \pm 0.02 \mu\text{g.l}^{-1}$) quando comparada com a região fora da pluma ($0.009 \pm 0.022 \mu\text{g.l}^{-1}$), não houve diferença entre as regiões (*Mann-Whitney*; $p > 0.05$) (fig. 4; tabela 4).

No fundo raso, a pluma apresentou maiores concentrações de clorofila ($0.225 \pm 0.365 \mu\text{g.l}^{-1}$), porém quando comparada com a região de transição ($0.109 \pm 0.168 \mu\text{g.l}^{-1}$) e fora da pluma ($0.003 \pm 0.003 \mu\text{g.l}^{-1}$), não foram observadas diferenças entre as áreas (*Kruskal-Wallis*; $p > 0.05$) (fig. 4; tabela 4).

Entre áreas, as concentrações de Chl-a do microfitoplâncton foram significativamente maiores na pluma (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$) ($0.204 \pm 0.249 \mu\text{g.l}^{-1}$) quando comparadas com a região fora da pluma (*Dunn's Method*; $p < 0.001$) ($0.039 \pm$

0.136 $\mu\text{g.l}^{-1}$) e na região de transição ($0.07 \pm 0.107 \mu\text{g.l}^{-1}$), quando comparada com a região fora da pluma (*Dunn's Method*; $p=0.016$) (fig. 5; tabela 4).

Tabela 4 - Concentrações mínimas, máximas, médias e desvio padrão de clorofila-a (frações total, microfitoplâncton e pico- e nanofitoplâncton) por profundidade em cada região da PCA. Onde: Números em negrito indicam os picos de concentrações de TChl-a. As letras sobrescritas indicam diferenças significativas em comparações aos pares

		Pluma		Transição		Fora da pluma	
		TChl-a ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	Microfito ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	TChl-a ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	Microfito ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	TChl-a ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	Microfito ($\mu\text{g.l}^{-1}$)
Áreas	Min.	0.052	0	0.039	0	0.007	0
	Máx.	2.583	0.769	0.635	0.395	1.305	1.022
	Média	0.625 ^a	0.204 ^a	0.279 ^{ab}	0.07 ^a	0.198 ^b	0.039 ^b
	D.P	0.584	0.249	0.172	0.107	0.207	0.136
Superfície	Min.	0.188	0	0.109	0.006	0.027	0
	Máx.	2.583	0.642	0.572	0.395	0.273	0.188
	Média	0.84 ^a	0.255 ^a	0.218 ^{ab}	0.087 ^{ab}	0.121 ^b	0.022 ^b
	D.P	0.68	0.271	0.166	0.14	0.047	0.04
PMC	Min.	0.196	0.012	0.299	0	0.102	0
	Máx.	0.747	0.292	0.635	0.107	1.305	1.022
	Média	0.496	0.106	0.435	0.048	0.409	0.082
	D.P	0.18	0.098	0.126	0.042	0.258	0.224
Fundo Raso	Min.	0.052	0	0.149	0.011	0.118	0
	Máx.	2.128	0.769	0.517	0.303	0.152	0.006
	Média	0.58	0.225	0.321	0.109	0.14	0.003
	D.P	0.774	0.365	0.186	0.168	0.019	0.003
PMax	Min.	0.185	-	0.039	0.005	0.007	0
	Máx.	0.224	-	0.278	0.045	0.208	0.085
	Média	0.198 ^a	-	0.161 ^a	0.026	0.07 ^b	0.009
	D.P	0.023	-	0.098	0.02	0.051	0.022

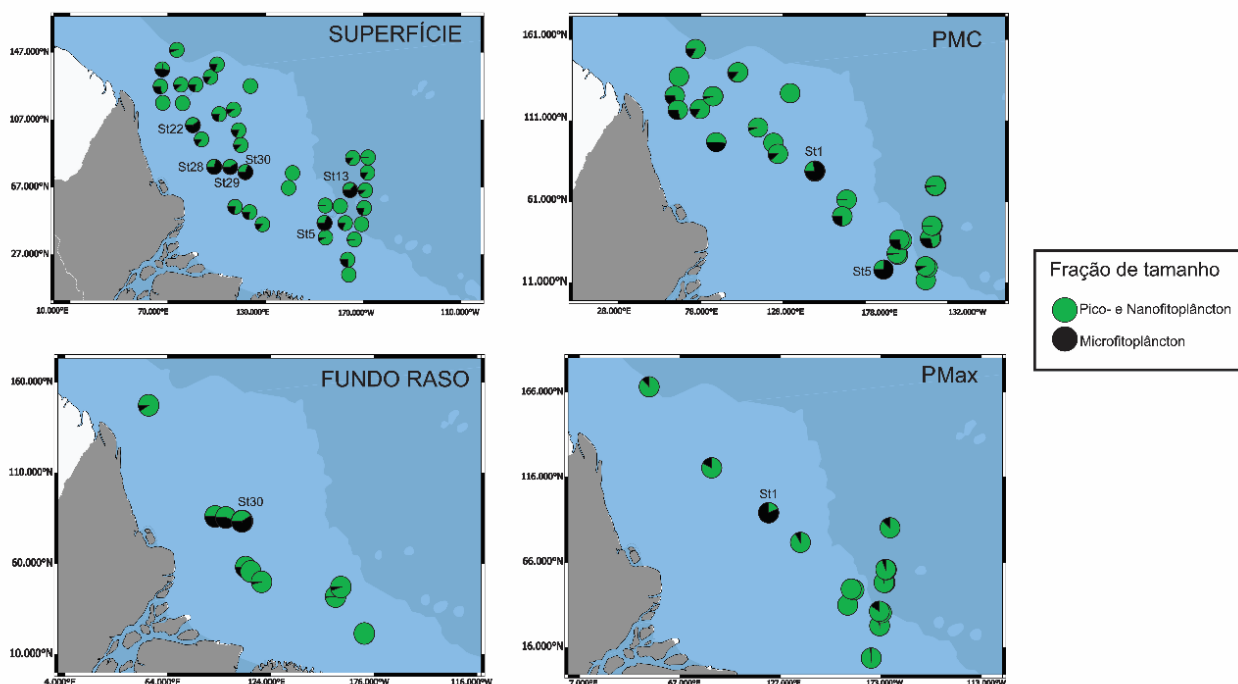
Fonte: A Autora (2023).

4.3 PROPORÇÃO DO MICROFITOPLÂNCTON X PICO- E NANOFITOPLÂNCTON

A fração do Pico- e Nanofitoplâncton foi dominante em todas as regiões e profundidades durante o estudo com 76% de contribuição para TChl-a. Entretanto, algumas estações apresentaram dominância do Microfito: Dentro da pluma na profundidade de superfície na St22 (59%), St28 (70%) e St29 (58%) e na zona de transição na St30 na superfície (69%) e fundo raso (59%). Já na região fora da pluma

as exceções ocorreram na St1 (78%) no PMC e PMax (81%), na St5 (69%) na superfície e PMC (74%) e St13_R4 (64%) na superfície (fig. 6).

Figura 6 - Proporção das classes de tamanho do microfitoplâncton e pico- e nanofitoplâncton nas diferentes profundidades para a área de estudo

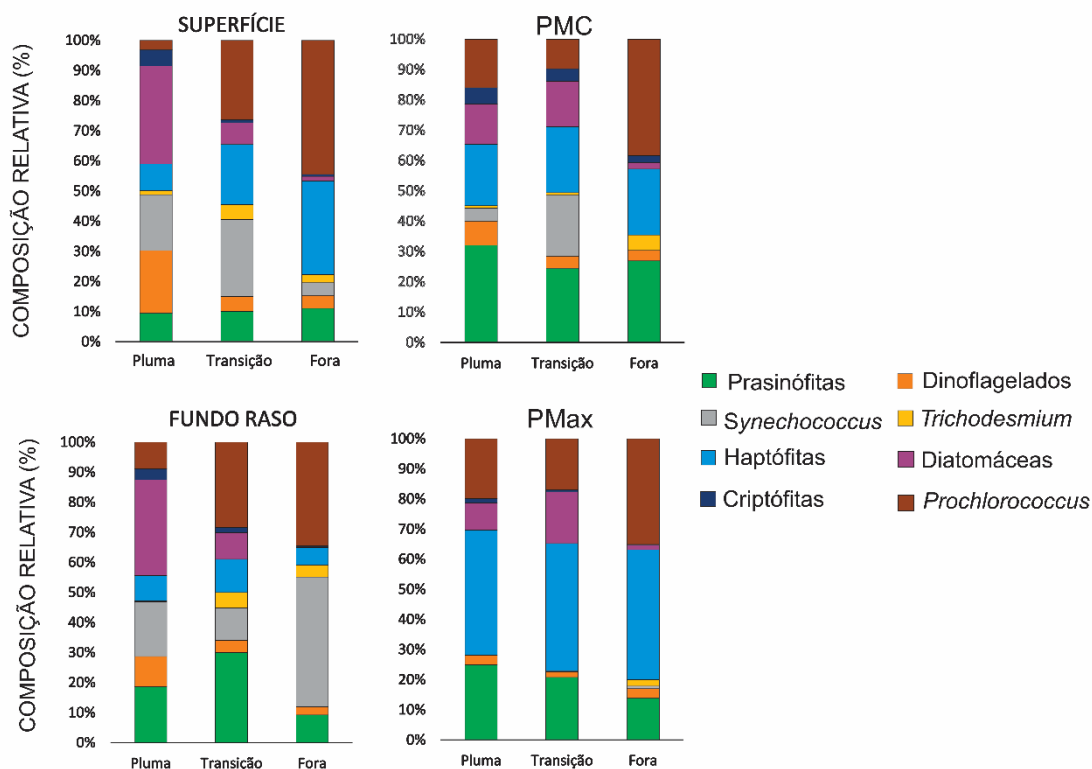


Fonte: A Autora (2023).

4.4 ESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA (HPLC-CHEMTAX)

Com base nos pigmentos marcadores, foram observadas na superfície altas concentrações de diatomáceas (33%), dinoflagelados (21%) e *Synechococcus* (19%) na região sob influência da pluma. À medida que as estações se afastam dessa influência há um aumento nas concentrações das cianobactérias *Prochlorococcus* e *Synechococcus* (26% cada) e haptófitas (20%) na região de transição. Já na região fora da pluma, há um aumento da dominância de *Prochlorococcus* (44%) e das haptófitas (31%) (Figuras 7 e 8). O grupo das diatomáceas apresentou uma alta correlação com silicato e *Synechococcus* com a temperatura, indicando que as altas concentrações de nutrientes e elevada temperatura de superfície contribuíram para a distribuição desses grupos (fig. 10).

Figura 7 - Composição relativa dos grupos fitoplantônicos por profundidade em cada região da PCA



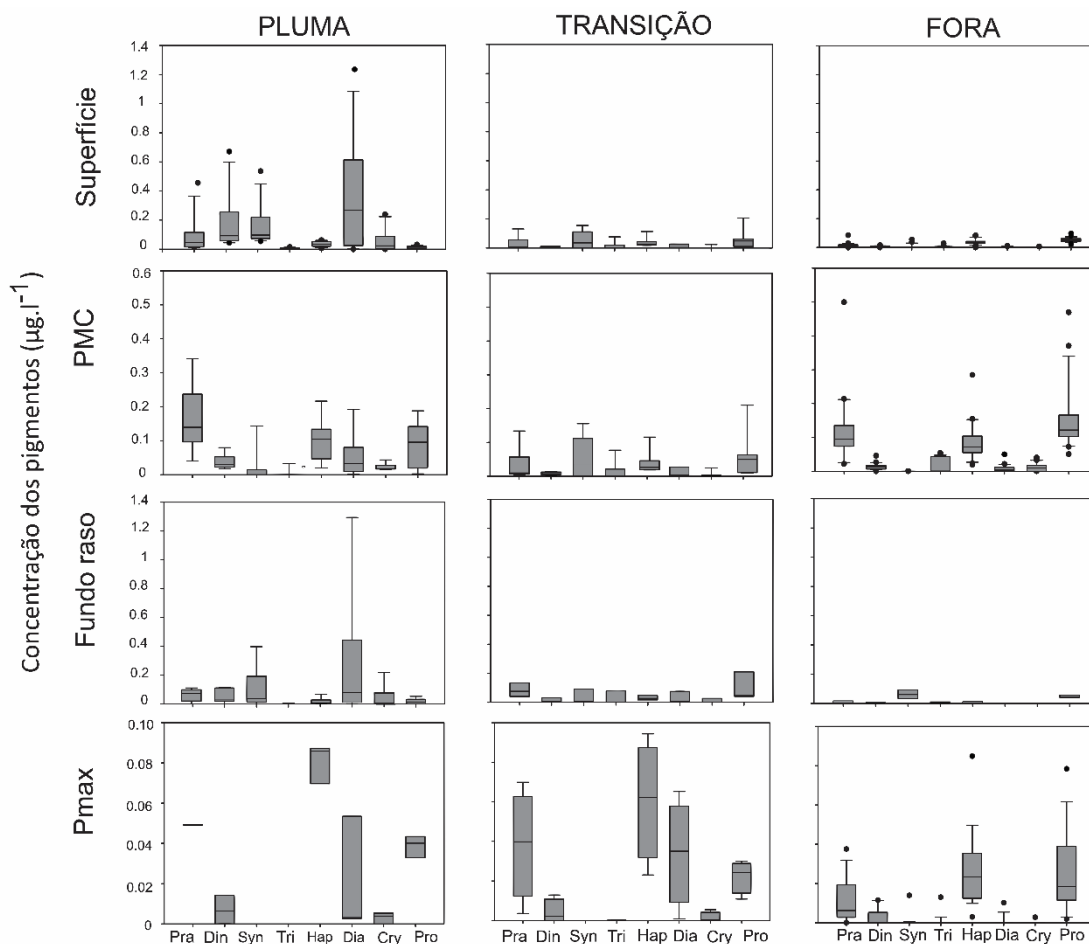
Fonte: A Autora (2023).

No PMC há pouca variação quanto a presença dos grupos. Na pluma e região de transição as prasinófitas (32%, 24%, respectivamente) e haptófitas (21%, 22%, respectivamente) dominaram, seguidas das cianobactérias *Prochlorococcus* (16%) e *Synechococcus* (20%), respectivamente. Já fora da pluma há um aumento na dominância de *Prochlorococcus* (38%), seguido por prasinófitas (27%) e haptófitas (22%) (fig. 7 e 8). O PMC apresentou menor diversidade com domínio principalmente das prasinófitas, haptófitas na pluma e transição, havendo uma alternância fora da pluma com um aumento da contribuição dos picoeucariotos.

No fundo raso da pluma as maiores dominâncias pertencem as diatomáceas (32%), seguidas das prasinófitas (19%) e *Synechococcus* (18%). Já na região de transição os principais grupos presentes são as prasinófitas (30%) e *Prochlorococcus* (28%). Já fora da pluma *Synechococcus* (43%) e *Prochlorococcus* (35%) (fig. 7 e 8). Assim como na superfície, as diatomáceas foram as que mais contribuíram para a biomassa no fundo raso, refletindo as altas concentrações de nutrientes, sendo o principal deles o silicato.

No PMax as haptófitas dominaram nas três regiões, na pluma e transição (42% cada) e fora da pluma (43%), seguidos por prasinófitas na pluma e transição (25% e 21%, respectivamente) e *Prochlorococcus* fora da pluma (35%) (fig. 7 e 8).

Figura 8 - Contribuição dos grupos do fitoplâncton por profundidade em cada região da PCA



Fonte: A Autora (2023).

4.5 PRODUÇÃO NOVA X PRODUÇÃO REGENERADA

Os valores médios do índice *Fp* foram mais elevados dentro da pluma (0.421 ± 0.229) (*Kruskal-Wallis*; $p = <0.001$), quando comparados com a área fora da pluma (0.075 ± 0.046) (*Dunn's Method*; $p = <0.001$) e de transição (0.167 ± 0.107) (*Dunn's Method*; $p = 0.012$) (tabela 5). Estes valores estão associados a dominância de Bacillariophyceae (fuco) e Dinophyceae (peri) na pluma.

Quando comparado entre as profundidades de cada região, a superfície, PMC E Fundo raso da pluma apresentaram valores de produção nova significativamente maiores (*Kruskal-Wallis*; $p < 0.001$; *ANOVA*; $p = 0.010$) quando comparados apenas com

a região fora da pluma (*Dunn's method*; $p < 0.001$; *Tukey*; $p = 0.013$). Já no PMax, o índice de produção nova foi maior na região de transição (ANOVA; $p: 0.002$) quando comparado apenas com a região fora (*Tukey*; $p = 0.003$), o que pode ser justificado pelo reduzido número de estações com essa profundidade na pluma, uma vez que a maioria das estações são rasas (tabela 5).

Tabela 5 - Valores médios e desvio padrão do índice *Fp* por profundidade em cada região da PCA

	Pluma		Transição		Fora da pluma	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Região	0.421 ± 0.229		0.167 ± 0.107		0.075 ± 0.046	
Superfície	0.511 ± 0.231 ^a		0.114 ± 0.049 ^{ab}		0.063 ± 0.049 ^b	
PMC	0.329 ± 0.223 ^a		0.192 ± 0.123 ^{ab}		0.086 ± 0.028 ^b	
Fundo raso	0.493 ± 0.153 ^a		0.203 ± 0.199 ^{ab}		0.107 ± 0.032 ^b	
PMax	0.160 ± 0.079 ^{ab}		0.200 ± 0.081 ^a		0.073 ± 0.056 ^b	

Fonte: A Autora (2023).

4.6 ANÁLISES MULTIVARIADAS

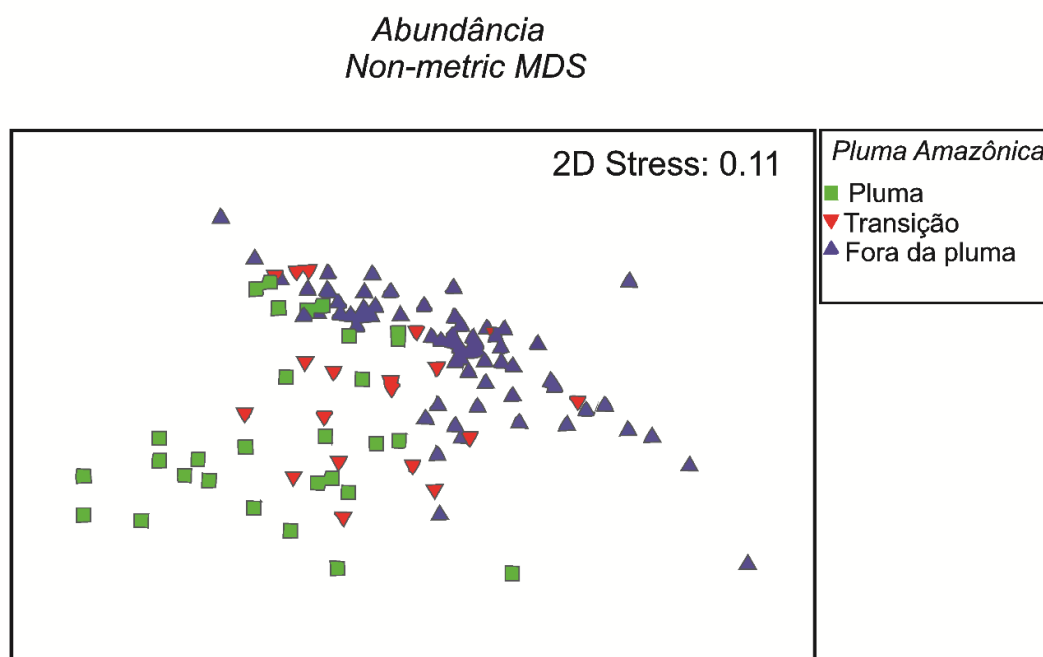
A partir do nMDS é possível observar um gradiente costa-oceano, com a presença de duas regiões bem delimitadas e uma que faz transição entre elas, assim como detectado através da PERMANOVA (tabela 6, fig. 9). Em consonância com os resultados observados na nMDS e PERMANOVA, a análise do SIMPER demonstrou uma similaridade de 40.72% entre os grupos presentes na pluma sendo as prasinófitas (24.34%) o grupo que mais explica essa similaridade, seguido pelas diatomáceas (19.1%), haptófitas (18.74%) e dinoflagelados (13.78%). Na região de transição a similaridade foi de 44.58%, com as haptófitas explicando 30.74% da similaridade entre os grupos, seguidas de *Prochlorococcus* (21.39%), prasinófitas (20.89%) e *Synechococcus* (11.96%). Fora da pluma foi a área com maior similaridade, com 50,09%, com *Prochlorococcus* explicando 46.27% da similaridade, seguido das haptófitas (33.34%) e prasinófitas (14.51%).

Tabela 6 - Resultados do teste *pair-wise* da PERMANOVA para as regiões da pluma (pluma, região de transição e fora da pluma)

Regiões	t	P (MC)
Fora x Transição	2.7175	0.0001
Fora x Pluma	4.3034	0.0001
Transição x Pluma	1.3986	0.0786

Fonte: A Autora (2023).

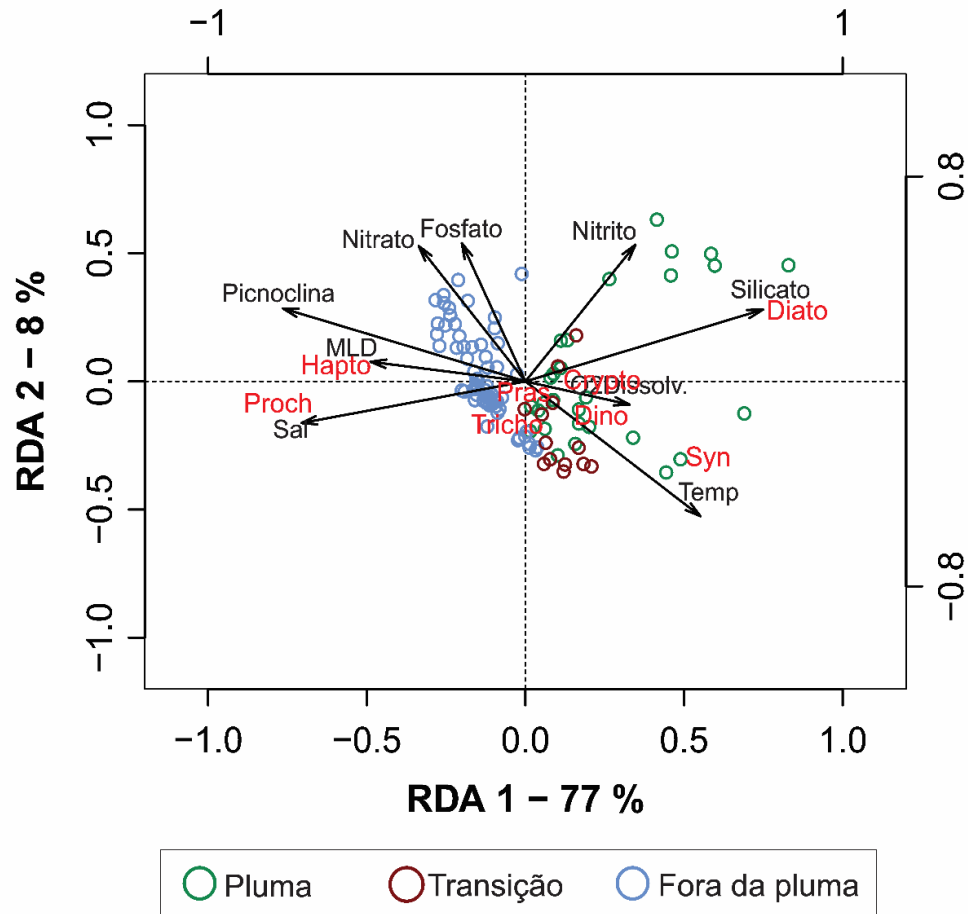
Figura 9 - Escalonamento multidimensional não métrico (NMDS, Stress: 0,11) baseado nas dissimilaridades de Bray-Curtis para os grupos fitoplanctônicos em relação a pluma, região de transição e fora da pluma. Pontos sobrepostos indicam que os grupos das estações neles contidos não diferem floristicamente entre si



Fonte: A Autora (2023).

A partir da RDA foi evidenciado a distribuição das espécies e dos parâmetros ambientais em relação as regiões da pluma. É possível observar alta correlação entre as estações da pluma com nitrito, silicato e Diatomáceas, *Synechococcus* e temperatura, além de Dinoflagelados e Criptófitas com oxigênio dissolvido. Por outro lado, observa-se uma correlação principalmente entre as estações fora da pluma com nitrato e fosfato, picnoclina e profundidade da camada de mistura (MLD) com as Haptófitas, enquanto *Prochlorococcus* com a salinidade. Já para *Prasinófitas* e *Trichodesmium* nota-se uma distribuição mais relacionada com as estações de transição (fig. 10).

Figura 10 - Análise de redundância (RDA) entre a distribuição dos grupos do fitoplâncton na pluma, zonas de transição e fora da pluma e as variáveis ambientais. Onde: Diato = Diatomáceas, Hapto = Haptófitas, Proch = *Prochlorococcus*, Syn = *Synechococcus*, Tricho = *Trichodesmium*, Pras = Prasinófitas, Crypto = Cryptófitas, Dino = Dinoflagelados, MLD = Profundidade da camada de mistura e O₂ dissolv. = O₂ dissolvido



Fonte: A Autora (2023).

5 DISCUSSÃO

As plumas fluviais são regiões altamente dinâmica que podem percorrer longas distâncias transportando material terrestre para as plataformas e áreas *offshore* e são caracterizadas por águas de baixa densidade e alta produtividade biológica, devido aos elevados níveis de nutrientes, materiais terrestres em suspensão e dissolvidos (HIGGINS; MACKEY; CLEMENTSON, 2006; SHIPE et al., 2006; KANG et al., 2013; KOUAME et al., 2009).

Durante o mês de coleta (setembro-2021), a pluma Amazônica está próxima de sua maior extensão, mesmo o rio estando em seu período de menor vazão (OTSUKA, 2019). Sua dispersão está principalmente em direção ao Oceano Atlântico Equatorial Central influenciada principalmente pela retroflexão da CNB (MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010), fator que justifica por que algumas estações a noroeste, mesmo localizadas longe da desembocadura do rio, estão sob influência da pluma. As estações na área da pluma apresentaram baixas profundidades médias da picnoclina (5m) e topo da termoclina rasas (9m), corroborando com Shipe et al. (2006) que afirmam que as águas da pluma são estratificadas, de baixa salinidade superficial e haloclina mais rasa.

Através das análises multivariadas usadas durante o estudo (nMDS, PERMANOVA, SIMPER e RDA), é possível observar a distinção entre as três regiões estudadas (pluma, transição, fora da pluma), indicando que essas regiões possuem características particulares quanto as concentrações dos nutrientes e fatores físicos que em conjunto determinam a biomassa, composição, contribuição relativa e distribuição dos grupos fitoplanctônicos sobre a PCA e oceano adjacente.

5.1 BIOMASSA TOTAL (TCHL-A) E DO MICROFITOPLÂNCTON

Os resultados demonstram uma distribuição fitoplanctônica moldada principalmente pela influência das águas ribeirinhas e pela disponibilidade de nutrientes, com uma maior biomassa e diversidade na região influenciada pela pluma, principalmente na superfície. A biomassa do fitoplâncton apresentou claras diferenças entre as regiões, embora com uma maior contribuição do pico e do nanofitoplâncton para a biomassa total, sugerindo um desacoplamento entre a estrutura de tamanho do fitoplâncton e a biomassa.

A maior concentração de TChl-a observada ao longo do estudo ocorreu na pluma na superfície da St31 ($2.583 \mu\text{g l}^{-1}$), localizada na desembocadura do rio Amazonas. Essa concentração máxima foi superior às encontradas por Otsuka et al., (2018) e Smith e DeMaster (1996), para o período de descarga mínima. Esse elevado valor coincidiu com altas concentrações de nitrito ($0.12 \mu\text{mol/L}$), nitrato ($0.89 \mu\text{mol/L}$), fosfato ($0.42 \mu\text{mol/L}$) e silicato ($48.41 \mu\text{mol/L}$) e baixos valores de salinidade (18.35).

Apesar dos nutrientes serem limitantes para a produção primária em águas oligotróficas (EPPLEY, 1980; SHELDON, 1984; KOENING; MACÊDO, 1999; MARAÑÓN et al., 2003; SOUZA et al., 2013; MARAÑÓN, 2015; FARIAS et al., 2022), nesta estação sob influência da pluma, evidenciada pela baixa salinidade, as altas concentrações de nutrientes contribuíram para o aumento da TChl-a.

De modo geral, essas altas concentrações de nutrientes, também contribuíram para um discreto aumento na TChl-a na superfície das demais estações da pluma próximas a desembocadura do rio (St28 e 29) com $0.913 \mu\text{g l}^{-1}$ e $1.025 \mu\text{g l}^{-1}$, respectivamente e St28 com $2.128 \mu\text{g l}^{-1}$ no fundo raso, bem como nas estações 22 e 23 mais a noroeste, com concentrações superiores a $1 \mu\text{g l}^{-1}$. Essas estações da pluma apresentaram valores de clorofila similares aos encontrados previamente por Otsuka et al. (2018) e Smith e DeMaster (1996), exceto para o fundo raso, onde as concentrações do presente estudo foram superiores.

Semelhante a fração total, as maiores concentrações de chl-a da fração do microfitoplâncton ocorreram na pluma e foram observadas na superfície das St22, 28, 29 e 31 e fundo raso da St28, com concentrações $\geq 0.6 \mu\text{g l}^{-1}$, ressaltando o importante papel dos nutrientes para o enriquecimento das águas costeiras e consequente aumento da atividade biológica fitoplanctônica na pluma. Além disso, esses nutrientes podem ter contribuído para o crescimento de importantes grupos do microfitoplâncton, como diatomáceas e dinoflagelados, fato observado por Teixeira e Tundisi (1967), Shipe et al., (2006) e Subramaniam et al., (2008).

Estudos ao redor do mundo destacam a existência de uma relação positiva entre a alta vazão dos rios, entrada de nutrientes e alta biomassa fitoplanctônica em águas costeiras adjacentes a foz de rios (LIHAN et al., 2011; MASOTTI et al., 2018; WYSOCKI et al., 2006). Lohrenz et al. (1997) observaram uma relação direta entre o incremento de nutrientes de origem continental e a produção primária nas águas da plataforma continental da Louisiana e no norte do Golfo do México (LOHRENZ et al., 2008) e Schofield et al., (2013) na pluma do rio Hudson. Apesar de durante o período

de amostragem o rio Amazonas estar em seu período de menor vazão, foi possível observar a influência da pluma na PCA pelas altas concentrações de nutrientes e TChl-a próximas a foz do rio, ressaltando a importância do carregamento de nutrientes pela pluma do rio, como fator impulsionador do crescimento das comunidades fitoplanctônicas, afetando assim toda a teia trófica.

No presente estudo, a influência da pluma sobre a TChl-a estão diretamente ligadas a camada de superfície onde a biomassa foi significativamente mais elevada quando comparada a região fora da pluma (tabela 4). Além da profundidade de superfície também é observado valor significativo na concentração de clorofila no PMax da pluma, também em comparação com a região fora da pluma, entretanto, os valores de superfície foram 4 vezes maiores em relação ao PMax, profundidade composta neste estudo, por estações mais distantes da foz do rio (tabela 4). Esse padrão também foi observado por Masotti et al., (2018), que observaram que a biomassa do fitoplâncton dentro da pluma pode chegar a ser 2 vezes maior, do que os valores de fundo longe da foz.

As plumas estão geralmente associadas a grandes estoques de fitoplâncton, zooplâncton e larvas de peixes, bem como elevadas taxas de produção primária e secundária (GRIMES; KINGSFORD, 1996), logo, sua influência vai além das comunidades fitoplanctônicas. As cadeias alimentares pelágicas são apoiadas pela produção do fitoplâncton, pois esses organismos servem de fonte básica de alimento (minerais e biomoléculas) e sua elevada biomassa, pode indicar abundância de populações de espécies comercialmente importantes, logo desempenha um papel de extrema importância para o fluxo de energia e matéria orgânica para as produções secundária e terciária (PELTOMAA et al., 2017; VERLECAR; DESAI, 2004). Portanto, a pluma do Amazonas pode estar a contribuir com o aumento das produções de espécies de interesse econômico na região.

A distribuição vertical da TChl-a em águas oligotróficas, geralmente não é homogênea, sendo encontradas maiores concentrações próximas à base da zona eufótica, região também conhecida como pico máximo de clorofila (PMC) (MIGNOT et al., 2011, 2014). O PMC é uma camada permanente em grande parte dos oceanos tropicais e subtropicais, gerada a partir da barreira criada pela termoclina e apresenta profundidades que variam de 50 a 200m. Nessa feição, devido a essa barreira criada pela termoclina, há um acúmulo de nutrientes que contribuem para um aumento característico da produtividade primária (CULLEN, 1982; HICKMAN et al., 2012;

HUISMAN et al., 2006; MCMANUS; DAWSON, 1994; MIGNOT et al., 2011; MOURIÑO; FERNÁNDEZ; ALVES, 2004; WIRTZ et al., 2022).

Fora da pluma, observou-se também altas concentrações de clorofila no PMC da St1 tanto para a fração total ($1.305 \mu\text{g l}^{-1}$), quanto para a fração do microfitoplâncton ($1.022 \mu\text{g l}^{-1}$). Nessa estação, foi observada alta concentração de oxigênio dissolvido (4.5 ml/l), águas oceânicas de alta salinidade (36.47) e baixas concentrações de nutrientes, característica de ambientes oligotróficos (nitrito $0.04 \mu\text{mol/L}$, nitrato $0.12 \mu\text{mol/L}$, fosfato $0.11 \mu\text{mol/L}$ e silicato $1.02 \mu\text{mol/L}$), semelhantes aos encontrados por Otsuka et al. (2018) para os compostos nitrogenados. Entretanto, essas baixas concentrações podem indicar absorção pelos organismos fitoplanctônicos para seu crescimento e manutenção de suas atividades metabólicas (CAVALCANTI, 2003; SILVA et al., 2004).

Além disso, a St1 está localizada sobre o cânion amazônico, em um região próxima a um transecto de ondas internas (ASSENE et al., 2023), que podem ter contribuído para um enriquecimento dessas águas devido ao fluxos ascendentes de nutrientes gerado pelas ondas internas influenciando o crescimento do fitoplâncton (NISHINO et al., 2015; REID et al., 2019; VILLAMAÑA et al., 2017; WANG; DAI; CHEN, 2007; WOLANSKI; DELESALLE, 1995; WOODSON, 2018). Em estudo realizado por Villamaña et al. (2017) na plataforma de Ría de Vigo, observou-se uma grande contribuição das diatomáceas e alternância entre espécies de pequeno e grande tamanho entre períodos, indicando que a mistura turbulenta impulsionada pelas ondas internas pode desempenhar um papel importante no controle da produtividade e estrutura da comunidade fitoplanctônica.

Quanto a classificação das estações das três regiões (pluma x transição x fora) quanto ao seu grau de eutrofização, de acordo com a classificação de Lalli e Parsons (1997), apenas as estações 28 e 31 foram caracterizadas como eutróficas no período de estudo, com concentrações superficiais de clorofila $>1 \text{ mg m}^{-3}$. Nas demais estações da pluma, a irradiância regulada pela turbidez da água ribeirinha rica em material dissolvido e particulado, pode ser um fator determinante para o crescimento e distribuição do fitoplâncton sobre a PCA, contribuindo para uma redução no teor de clorofila dessas estações, como observado em estudos realizados pelo projeto A Multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study (AmasSeds) (DEMASTER et al., 1996; DEMASTER; POPE, 1996; SMITH JR.; DEMASTER, 1996).

Nesses estudos, os autores determinaram que apesar da grande abundância de nutrientes, a limitação a disponibilidade de luz causada pela turbidez, restringe o crescimento do fitoplâncton a uma área relativamente pequena da PCA, indicando que há uma zona de crescimento ótimo, caracterizada pela presença de águas de baixa salinidade, ricas em nutrientes e de baixa turbidez, onde quanto mais tempo o fitoplâncton puder permanecer, maiores serão a produção primária e a ocorrência de *blooms* (DEMASTER et al., 1996; DEMASTER; POPE, 1996; SMITH JR.; DEMASTER, 1996).

5.2 PROPORÇÃO DO MICROFITOPLÂNTON X PICO- E NANOFITOPLÂNTON

A fração do pico- e nanofitoplâncton (<20µm) dominou as concentrações de TChl-a em todo o estudo com 76% de contribuição. Em ambientes oligotróficos, esses diminutos organismos dominam a produtividade primária (OTSUKA et al., 2018; QUEIROZ et al., 2015; FARIAS et al., 2022; KARLUSICH; IBARBALZ; BOWLER, 2020) e podem ser o principal componente da flora planctônica de forma permanente ou temporária em determinados locais, por serem excelentes competidores quando os nutrientes estão em baixas concentrações, devido a sua alta relação superfície-volume, bem como sua capacidade de tolerar as variações nas condições ambientais (DUGDALE; WILKERSON, 1992; CHISHOLM, 1992; LANGE et al., 2018; HUETE-ORTEGA et al., 2011; HILLEBRAND et al., 2022; MARAÑÓN, 2015).

Outro fator que pode ter contribuído para a dominância desses organismos, é uma maior contribuição de células de tamanho intermediário (nanofitoplâncton) para a biomassa. Isso ocorre, pois segundo Marañón (2015), a produção específica de biomassa e as taxas de crescimento são semelhantes em células pequenas e grandes, mas atingem o pico em células intermediárias devido a sua maior capacidade de explorar altas concentrações de nutrientes. Além disso, o fracionamento da clorofila-a pode subestimar a importância do nanofitoplâncton, pois as espécies do microfitoplâncton que formam cadeias são retidas pelo filtro de 20 µm, mesmo que o tamanho individual das células seja menor, além de haver entupimento do filtro em águas enriquecidas o que leva a uma redução na eficiência efetiva do tamanho dos poros do filtro. Diante disto, em regiões produtivas o nanofitoplâncton seria então, a classe de tamanho dominante e não o microfitoplâncton.

A exceção a essa dominância ocorreu nas St22, 28, 29 na pluma e St30 na região de transição. Já fora da pluma ocorreram na St1, 5 e 13 (fig.6). Nas estações da pluma e transição o crescimento do microfitoplâncton pode ser um resultado das altas concentrações de nutrientes, destacando a importância do silicato para o crescimento das diatomáceas na pluma, bem como na transição, que ainda está sob influência das águas do rio, como observado na PERMANOVA, a qual indicou não haver diferenças entre a pluma e a região de transição, mesmo a transição já apresentando características de mistura com as águas oceânicas (SHIPE et al., 2006; SUBRAMANIAM et al., 2008). A St30, está localizada muito próxima da desembocadura do rio e apesar de não estar diretamente influenciada pela pluma, pode indiretamente receber descarga dos nutrientes, como observado pelos valores de silicato ($2,75 \mu\text{mol/L}$ na superfície e $1,88 \mu\text{mol/L}$ no fundo raso), que pode ter contribuído para uma maior proporção do microfitoplâncton (figura 1).

Considerando as estações fora da pluma, assim como a St1, as St5 e 13 são estações que estão localizadas em transecto de ondas internas, como observado por Assene et al., (2023). As ondas internas, podem também ter contribuído para o pico de chl-a observado para o microfitoplâncton nessas estações, assim como na St1, aumentando a proporção dessa fração não apenas no PMC, mas também no PMax (fig. 6). As ondas internas, são ondas que ocorrem dentro da coluna d'água e são geradas principalmente pela ação dos ventos, que vão causar perturbações na camada mista de superfície e pelas marés que se agitam sobre a topografia do fundo (TALLEY et al., 2011). A turbulência gerada por essas ondas impulsionam a ressuspensão dos nutrientes de fundo, aumentando suas concentrações nas camadas mais superficiais, contribuindo para uma maior proporção dessa fração nessas três estações (LITCHMAN, 2007; NISHINO et al., 2015; REID et al., 2019; VILLAMAÑA et al., 2017; WANG; DAI; CHEN, 2007; WOLANSKI; DELESALLE, 1995; WOODSON, 2018).

5.3 ESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

A dinâmica da comunidade fitoplanctônica foi moldada principalmente pela pluma e regime de nutrientes, apresentando mudanças na distribuição do fitoplâncton principalmente entre águas superficiais ricas em nutrientes e profundas do PMC e PMax, com uma comunidade mais diversificada na superfície.

Na superfície da pluma estão presentes as diatomáceas, dinoflagelados e *Synechococcus* (fig. 7 e 8), grupos que apesar de estarem em frações de tamanho diferentes, apresentam maiores abundâncias em zonas ricas em nutrientes, tendo ainda sido registradas elevadas abundâncias para *Synechococcus* em ambientes com baixa salinidade, como é o caso da pluma do Amazonas, fato indicado pela correlação inversa observada entre este grupo e a salinidade através da análise de redundância (RDA) (fig. 10) (DUGDALE; WILKERSON, 1992; FALKOWSKI; OLIVER, 2007b; KOSTADINOV; SIEGEL; MARITORENA, 2010; PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999).

Os valores de temperatura foram mais elevados na superfície e conforme evidenciado pela RDA, este parâmetro apresentou correlação com *Synechococcus*, diatomáceas, dinoflagelados e as estações da pluma, destacando assim, a temperatura juntamente com salinidade e nutrientes como os fatores determinantes da composição das espécies na pluma (fig. 10).

O grupo das diatomáceas foi favorecido pelas altas concentrações de silicato que contribuíram para seu crescimento e alta biomassa, como observado em estudos realizados por Shipe et al. (2006) e Subramaniam et al. (2008) na pluma do Amazonas e indicado pela RDA (fig. 10). Já em estudo realizado por Shipe et al., (2006) é apontado que as altas concentrações de silicato, beneficiam o crescimento de diatomáceas em detrimento de outros organismos.

Os dinoflagelados, são um grupo de grande importância para o plâncton marinho ao redor do mundo e podem ser encontrados tanto nas regiões costeiras ricas em nutrientes, quanto nos oceanos abertos pobres em nutrientes (HANSEN, 2011) e apesar da maior contribuição na pluma, sua contribuição relativa foi baixa durante todo o estudo. Por ser um grupo com uma grande diversidade de estratégias tróficas (autotrofia, mixotrofia e heterotrofia), sua contribuição pode ter sido subestimada pela análise de pigmentos (HANSEN, 2011; JEONG et al., 2010; STOECKER, 1999). Além disso, outros grupos de dinoflagelados podem ser caracterizados pela presença da fucoxantina ou clorofila-*b*, contribuindo também para a sua subestimação durante o estudo (ZAPATA et al., 2012).

Atualmente, muitas espécies de dinoflagelados autotróficas foram declaradas como mixotróficas, além de ser sugerido que a maioria pode ser composta por protistas mixotróficos ou heterotróficos (JEONG et al., 2010). Normalmente são competidores fracos por nutrientes, e em condições autotróficas crescem de forma

muito lenta, diante disto, a mixotrofia permite que sejam encontrados em ambientes com elevadas concentrações de nutrientes e matéria orgânica, apesar desta ineficiência (LITCHMAN, 2007; LITCHMAN et al., 2015), o que corrobora suas maiores contribuições na superfície da pluma. Esse importante grupo desempenha vários papéis nas teias tróficas marinhas como produtores primários, presas e predadores, sendo capazes de se alimentar de inúmeras presas devido aos seus variados mecanismos de alimentação, como por exemplo, bactérias, picoeucariotos, nanoflagelados, diatomáceas, outros dinoflagelados, protistas heterotróficos e metazoários (JEONG et al., 2016).

Os organismos mixotróficos são componentes importantes do plâncton em águas costeiras e oceânicas e essa forma de nutrição pode ser um diferencial para os organismos do fitoplâncton capazes de realizá-la, como uma forma de reduzir o estresse causado pelas baixas concentrações de nutrientes inorgânicos, podendo aumentar a produção primária em águas oligotróficas (STOECKER et al., 2017). Algumas espécies autotróficas podem apresentar mixotrofia quando estão sob limitação de luz ou nutrientes, podendo então fazer ingestão de presas, enquanto outras são principalmente heterotróficas, mas sob certas condições realizam fotossíntese através da retenção dos cloroplastos de suas presas (HANSEN, 2011; STOECKER, 1998, 1999). Esse modo de nutrição desempenha um importante papel na alça microbiana, atuando como uma ponte para aumentar a transferência de biomassa para níveis tróficos superiores (STOECKER, 1998; WARD; FOLLOWS, 2016).

Nas estações onde a influência da pluma é menos acentuada, há um aumento nas concentrações das cianobactérias (*Prochlorococcus* e *Synechococcus*) e haptófitas na região de transição e fora da pluma, com uma redução significativa de *Synechococcus* na região sem influência (fig. 7 e 8). A região de transição tem como característica ser uma área intermediária, onde há presença de mistura entre as águas da pluma de baixa salinidade e rica em nutrientes, com as águas oceânicas sem influência e pobre em nutrientes, o que explicaria a presença de *Prochlorococcus* e *Synechococcus*, que apesar de apresentarem diferentes tipos de adaptação em relação às condições biogeoquímicas, podem coexistir em amplos gradientes ambientais em águas subtropicais e tropicais (PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999).

Em zonas onde a luz e a temperatura não são limitantes, esses organismos apresentam uma diferenciação clara quanto ao nicho, com *Synechococcus* proliferando em águas ricas em nutrientes, enquanto *Prochlorococcus* é mais abundante em águas quentes e pobres em nutrientes, entretanto não está puramente restrito a áreas oligotróficas, podendo também ser encontrado, assim como *Synechococcus* em condições mesotróficas (PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999; PITTERA et al., 2014), como observado na região de transição, onde sua proporção na superfície e fundo raso foi superior a 20%.

Apesar de estar presente na superfície da pluma rica em nutrientes, *Prochlorococcus* apresentou proporções baixas nessa profundidade (<10%) (fig. 7), contrastando com todas as profundidades da região fora da pluma, onde sua contribuição ultrapassou os 30%, reforçando sua importância em águas oligotróficas. Logo, a clara diferenciação de nicho relacionada a disponibilidade de nutrientes, pode explicar a menor contribuição de *Synechococcus* e a presença de *Prochlorococcus* fora da pluma, que apresentou alta correlação com salinidade, sendo um dos grupos que mais contribuiu para a composição da região fora da pluma, onde os valores de salinidade foram mais elevados.

Juntamente com as cianobactérias, a divisão das haptófitas é composta por organismos de tamanho celular pequeno (<20µm) e que ocorrem tanto em águas marinhas costeiras, quanto no oceano aberto (JORDAN; CHAMBERLAIN, 1997; SÁEZ et al., 2004). Apresentam ampla diversidade morfológica, bioquímica e ecológica, sendo capazes de formar colônias e blooms (THOMSEN, 1986; JORDAN; CHAMBERLAIN, 1997; EIKREM et al., 2016). *Coccolithophyceae* (*Prymnesiophyceae*), importante classe dentro das haptófitas, é onipresente nas águas superficiais de todo os oceanos e está associada a temperaturas mais elevadas, como as encontradas na superfície durante o estudo, e a concentrações mais baixas de silicato e clorofila-a (BALCH et al., 2019; KIRKHAM et al., 2011), o que explicaria sua baixa contribuição na pluma, onde as concentrações de silicatos foram mais elevadas.

Esse grupo prospera tanto em regimes oceânicos de reciclagem de nutrientes, como em sistemas de produção nova, como é o caso da pluma e região fora da pluma, fato observado através do índice *Fp* calculado durante este estudo (EIKREM et al., 2016). São amplamente distribuídas biogeograficamente, fortemente associadas aos principais sistemas de correntes oceânicas, entretanto, a maior diversidade de

espécies ocorre nas regiões subtropicais-tropicais (EIKREM et al., 2016). Além disso, a maioria das espécies está restrita a uma zona fótica superior (0-80m) ou inferior (120-220m) (EIKREM et al., 2016), fato reforçado por sua ampla distribuição vertical na PCA e oceano adjacente.

No PMC há pouca variação quanto a presença dos grupos (fig. 7 e 8). Na pluma e região de transição as prasinófitas e haptófitas dominaram, seguidas das cianobactérias (*Prochlorococcus* e *Synechococcus*, respectivamente). Já fora da pluma há um aumento na dominância de *Prochlorococcus* em relação aos outros dois grupos de picoeucariotos (fig. 7 e 8). O PMC é uma camada caracterizada por apresentar maiores concentrações de nutrientes e alta produtividade primária (CULLEN, 1982; MCMANUS; DAWSON, 1994; HUISMAN et al., 2006; WIRTZ et al., 2022), como observada na região de transição e fora da pluma, onde foram encontradas maiores concentrações de TChl-a (fig. 4b e c).

As prasinófitas são componentes do picofitoplâncton e estão presentes em toda a zona eufótica oceânica (MEDLIN et al., 2006; NOT et al., 2004; WORDEN; NOLAN; PALENIK, 2004; ZHU et al., 2005). Entretanto, a diversidade e ecologia destes organismos e suas contribuições para a comunidade picoeucariótica tem sido pouco estudada no ambiente marinho, visto que a maioria dos estudos foca principalmente nos grupos de tamanhos maiores ($>20\ \mu\text{m}$) (NOT et al., 2004; TRAGIN et al., 2016). São organismos que podem ter uma ampla capacidade de resposta às variações de luz e nutrientes, indicando que podem ser pouco afetadas por mudanças no ambiente, acarretando em altas abundâncias desses organismos (NOT et al., 2004), como pode ser observado no presente estudo, onde esses organismos foram detectadas na superfície com menor contribuição e no PMC, Fundo raso e PMax principalmente na pluma e transição, bem como no PMC fora da pluma com maior contribuição.

A dominância das haptófitas no PMC, já foi observada em estudo realizado por Miranda-Alvarez et al., (2020) no Nordeste do Pacífico Tropical, bem como por Endo e Suzuki (2019) numa região de mistura entre as águas costeiras e oceânicas, onde uma dominância significativa na profundidade de máxima clorofila foi observada, sendo destacados a intensidade de luz e a advecção e difusão de massa de água como os fatores responsáveis pela regulação da estrutura dessa comunidade.

Prochlorococcus também pode ser encontrado em áreas mesotróficas quentes e estratificadas (PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999; PITTERA et al., 2014) e habitam uma ampla gama de profundidades, que vão desde a superfície até 200m

(FLOMBAUM et al., 2013; PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999; SOHM et al., 2016). Isso ocorre, devido a especialização de seu sistema de captação de luz, que permitiu o surgimento de ecótipos adaptados a diferentes condições de disponibilidade de luz azul, com grupos que dominam na camada superior bem iluminada, e outros que são adaptados às profundidades que são alcançadas por apenas 0,1% de irradiância (MOORE; GOERICKE; CHISHOLM, 1995; PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999).

Nas comunidades onde os ecótipos adaptados à baixa disponibilidade de energia luminosa dominam, é possível que esse grupo alcance biomassa elevada perto do PMC (MOORE; ROCAP; CHISHOLM, 1998; BERUBE et al., 2016; HAWCO et al., 2021; FARIAS et al., 2022), principalmente devido a espécie *Prochlorococcus marinus* (CHISHOLM, 1992), destacado como um importante componente do PMC em áreas oligotróficas (CHRÉTIENNOT-DINET et al., 1995). Isso acontece, devido à presença da proteína proclorófito de ligação com a clorofila, que se liga à divinil clorofila-*a* e *b* aumentando a absorção da luz azul pelos ecótipos de baixa luminosidade em águas profundas (BILLER et al., 2015; ISLABÃO et al., 2017).

No fundo raso da pluma as maiores dominâncias são das diatomáceas, seguidas das prasinófitas e *Synechococcus* (fig. 7 e 8). Nessa profundidade, principalmente as estações próximas a desembocadura do rio, apresentaram altas concentrações dos nutrientes que contribuíram para a presença na superfície desses três grupos. As diatomáceas são amplamente conhecidas por habitarem as regiões turbulentas e enriquecidas de nutrientes, principalmente o silicato, composto de grande relevância para a formação de suas frústulas, enquanto *Synechococcus*, além de apresentar maiores abundâncias em zonas ricas em nutrientes, também possui uma restrição quanto a profundidade, estando limitado aos 100 primeiros metros da coluna d'água (DUGDALE; WILKERSON, 1992; FALKOWSKI; OLIVER, 2007b; KOSTADINOV; SIEGEL; MARITORENA, 2010; PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999). No presente estudo a média de profundidade do fundo raso foi de 51.9m, coincidindo com a profundidade de distribuição vertical desses organismos.

Na região de transição há a dominância das prasinófitas, entretanto com a presença de *Prochlorococcus*. Já fora da pluma das cianobactérias (*Synechococcus* e *Prochlorococcus*) (fig. 7 e 8). A presença das prasinófitas na pluma e área transição, pode estar relacionado a alta disponibilidade de nutrientes como observado em estudo realizado por Rodrigues et al., (2014) no sudeste do Brasil e pela alta capacidade de

resposta a mudanças nas concentrações de nutrientes desses organismos (NOT et al., 2004; VIPREY et al., 2008). Já *Prochlorococcus* por também serem encontrados em áreas mesotróficas quentes e estratificadas (PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999; PITTEIRA et al., 2014). Fora da pluma, a presença das cianobactérias por estar ligada a capacidade que esses organismos tem de serem excelentes competidoras quando os nutrientes estão em baixas concentrações na coluna d'água, devido à alta superfície-volume das suas células pequenas, bem como a capacidade de fixar N₂ em formas reduzidas de nitrogênio (ex: amônia) por *Trichodesmium* (ZEHR, 2011). Além disso, *Synechococcus* é praticamente onipresente em todos os meios marinhos, apesar de apresentar maiores abundâncias em águas ricas em nutrientes (SOHM et al., 2016).

No PMax as haptófitas dominaram nas três regiões, seguidas pelas prasinófitas na pluma e transição e *Prochlorococcus* fora da pluma (fig. 7 e 8). O PMax apresentou uma média de profundidade de 129,1 m coincidindo com as profundidades onde o gênero *Prochlorococcus* pode ser encontrado. Esses organismos podem ser detectados em profundidades que chegam a mais de 200m e que são atingidas por menos de 0,1 % da irradiância da superfície e essa capacidade de colonizar águas mais profundas só é possível, pois esses organismos são eficientes no uso da pouca incidência solar, devido a sua composição pigmentar que permite a absorção e não reflectância dos fótons no espectro azul (MOORE; GOERICKE; CHISHOLM, 1995; PARTENSKY; BLANCHOT; VAULOT, 1999; SOHM et al., 2016).

Enquanto as haptófitas, assim como *Prochlorococcus* também podem ser encontradas em maiores profundidades, com espécies ocorrendo entre 120 e 220m (EIKREM et al., 2016). Além disso, algumas espécies toleram melhor a privação por nitrogênio (*Emiliania huxleyi*) em comparação as diatomáceas por exemplo, sendo altamente competitivas em ambientes oligotróficos (EIKREM et al., 2016). Além disso, podem apresentar flexibilidade nutricional, com algumas espécies mixotróficas, o que concede uma vantagem competitiva sobre as células puramente fototróficas, pois são capazes de absorver e assimilar nutrientes orgânicos sob diferentes regimes de luz (profundidade) e nutrientes (BALCH et al., 2019; LIU et al., 2009).

As prasinófitas no PMax, podem estar associadas as maiores concentrações de nutrientes (fosfato e nitrato) observadas no estudo e que mostraram na RDA, alta correlação com as estações fora da pluma (fig. 10), ou ainda com a presença de ecótipos adaptados à baixa luminosidade, como observado em estudo genético

realizado por Rodríguez et al, (2005). Neste estudo, prasinófitas foram isoladas de vários ambientes marinhos, profundidades e diferentes regiões geográficas e observou-se que as cepas de superfície não crescem em intensidades luminosas baixas, bem como as linhagens de águas profundas (90-120m) não cresciam na superfície. Isso ocorre, pois as espécies de águas profundas apresentavam fotoinibição severa, sugerindo diferentes adaptações as condições ambientais de superfície e fundo da zona fótica, semelhantes às encontradas no procarioto *Prochlorococcus*, indicando que o conceito de ecótipo também poderia ser usado para eucariotos. A presença desses diferentes ecótipos justifica então, a ampla distribuição vertical desses organismos durante o estudo.

A alta complexidade da região, devido a atuação sinérgica de vários fatores físicos e químicos, podem ser observados pela também complexa distribuição dos grupos ao longo da PCA e áreas *offshore*, com a pluma desempenhando um importante papel ecológico para a comunidade pelágica, aumentando a capacidade produtiva do sistema. A estrutura da comunidade observada durante o estudo, reforça os resultados observados nos oceanos oligotróficos, caracterizados pela dominância do pico- e nanofitoplâncton, que desempenham um papel chave para a alça microbiana e para o funcionamento dos ecossistemas nessas regiões de baixa concentração de nutrientes. Entretanto, neste estudo, observou-se que o fitoplâncton eucarioto representou uma parcela significativa para a biomassa fitoplanctônica na zona fótica da área, além de estarem amplamente distribuídos ao longo do gradiente costa-oceano.

O fitoplâncton eucarioto constitui o terceiro grupo de picofitoplâncton mais amplamente distribuído nos oceanos atuais, estando atrás apenas dos dois gêneros de cianobactérias *Prochlorococcus* e *Synechococcus* (WORDEN; NOLAN; PALENIK, 2004). Apesar de menos abundantes numericamente do que as cianobactérias, os piceoeucariotos podem ser responsáveis por uma grande parte da produção primária (LI, 1994; WORDEN; NOLAN; PALENIK, 2004), além de serem responsáveis por uma maior porção de biomassa de carbono (BLANCHOT et al., 2001; PARTENSKY et al., 1996). Entretanto, os grupos que constituem o domínio eucarioto podem ser difíceis de classificar, devido a menor abundância, complexidade e diversidade, sendo assim, menos estudados do que as cianobactérias (WORDEN; NOLAN; PALENIK, 2004).

Diante disto e da complexidade da comunidade fitoplanctônica, além do papel crucial de seus grupos funcionais para a ecologia dos ecossistemas marinhos, o

presente trabalho reforça a importância da compreensão da dinâmica dos grupos fitoplanctônicos, sua distribuição e contribuição relativa em águas costeiras influenciadas pelas descargas de rios, para se compreender o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos, a transferência de energia através da cadeia alimentar face as mudanças globais futuras.

5.4 PRODUÇÃO NOVA X PRODUÇÃO REGENERADA

O índice de pigmento *Fp* apresentado por Claustre (1994), é derivado da suposição que a produção global nova, está relacionada principalmente às diatomáceas e em menor grau, às variações dos dinoflagelados e permite avaliar o estado trófico dos ambientes a partir das assinaturas de pigmentos dos grupos fitoplanctônicos.

O tamanho celular é uma característica funcional decisiva para o fitoplâncton, pois tem implicações na ecologia desses organismos afetando sua fisiologia, diversidade, competição e fluxo de energia através da teia trófica (CHISHOLM, 1992; WAITE et al., 1997; HEIN; PEDERSEN; SAND-JENSEN, 1995; FINKEL, 2001; LITCHMAN; KLAUSMEIER, 2008; HILLEBRAND et al., 2022; BARTON et al., 2013). A distribuição da abundância do tamanho do fitoplâncton desempenha um papel fundamental nos ecossistemas pelágicos, pois estabelece a organização trófica das comunidades planctônicas, e como consequência, o funcionamento biogeoquímico do ecossistema (HUETE-ORTEGA et al., 2011; MARAÑÓN, 2015).

A dominância observada neste estudo pela fração <20 µm, constituída pelo pico- e nanofitoplâncton, já foi observada em outros trabalhos realizados em regiões oligotróficas (KOENING; MACÊDO, 1999; OTSUKA et al., 2018; RIBEIRO et al., 2016), onde a produtividade resultante dessa composição da comunidade é de uma produção regenerada (EPPLEY, 1980; EPPLEY; PETERSON, 1979; TRUJILLO e THURMAN, 2011).

Nossos resultados, apontaram um gradiente costa-oceano com dominância da produção nova na área da pluma, justificado pela entrada de nutrientes continentais pelo rio Amazonas (COLES et al., 2013; DEMASTER et al., 1996; GOES et al., 2014). Essa produção nova, evidenciada pelo índice *Fp*, é 5 vezes maior na pluma em comparação com a região fora e 2 vezes maior em relação a transição, com a região fora da pluma apresentando um valor característico de produção regenerada,

semelhantes aos encontrados por Farias et al., (2022) para as ilhas oceânicas no Atlântico tropical ocidental.

Em relação as profundidades, a pluma (superfície, PMC, fundo raso) também apresentou valores mais elevados de produção nova, quando comparada a região fora, exceto no PMax, onde essa produção nova foi maior na transição (tabela 5), o que pode estar relacionado ao reduzido número de estações na pluma com essa profundidade, uma vez que a maioria das estações são rasas, como pode ser observado pelos elevados valores no fundo raso, que apresentou o segundo maior índice de produção nova. A superfície da pluma foi a profundidade onde o índice foi mais elevado (tabela 5), ressaltando o papel da pluma na exportação de nutrientes para a PCA, aumentando a produção nova nessa região e contribuindo para o funcionamento de uma teia trófica clássica e uma maior eficiência do fluxo de carbono.

Apesar disso, mesmo com elevados valores do índice na pluma, a dominância da TChl-a durante o estudo na maioria das estações pertence a fração $<20\ \mu\text{m}$, o que pode indicar que na região da PCA há uma relação desacoplada entre a biomassa e o tamanho da comunidade, visto que a contribuição do pico- e nanofitoplâncton permaneceu estável mesmo com o aumento da biomassa, como destacado por Marañón et al., (2001). Neste estudo, os autores ressaltam que em regiões oligotróficas não existe relação entre a biomassa ou a produtividade total do fitoplâncton e a contribuição do picofitoplâncton, visto que apesar da alta variação da produtividade total, a contribuição relativa do picofitoplâncton para o clorofila-a total se mantém relativamente estável entre 70 e 90%.

Essa constituição da comunidade baseada no tamanho, traz a luz informações sobre o papel desses organismos nos ciclos biogeoquímicos e fluxo de carbono na região da PCA e oceano adjacente, pois a composição do fitoplâncton influencia diretamente a exportação de carbono no oceano (BENOISTON et al., 2017). Em ambientes de alta produtividade, dominados pelo microfitoplâncton, a bomba biológica de carbono biogênico é mais eficiente, ocorrendo uma maior exportação de carbono para o oceano profundo devido ao afundamento das células não predadas, sedimentação de agregados e pelotas fecais (BOYD; TRULL, 2007; GUIDI et al., 2009; MARAÑÓN, 2015; BENOISTON et al., 2017).

O tamanho desempenha um papel central na biogeoquímica, visto que os diferentes tamanhos no fitoplâncton tem biogeografia e efeitos diversos no ciclo do carbono (LITCHMAN et al., 2015). A compreensão sobre o papel desempenhado pelo

pico- e nanofitoplâncton para o sequestro de carbono, bem como nos ciclos elementares na PCA e oceano adjacente é de extrema importância para avaliar os possíveis impactos causados pelas mudanças ambientais sobre essa comunidade e como essas mudanças afetarão o ecossistema e seu funcionamento.

As mudanças globais causadas pelas ações antropogênicas, afetam as comunidades marinhas e fitoplanctônicas e em cenários futuros, se prevê que o aquecimento dos oceanos irá reduzir consideravelmente a produtividade fitoplanctônica em águas tropicais e de latitudes médias caracterizadas pela limitação de nutrientes, por meio da inibição da mistura que reduzirá o fornecimento ascendente dos nutrientes, além de causar uma provável alteração na distribuição espacial da produção primária e secundária do ambiente pelágico, afetando os serviços ecossistêmicos (RICHARDSON; SCHOEMAN, 2004; DONEY, 2006; AJANI et al., 2020).

Diante disto, a substituição do fitoplâncton de tamanho grande pelo de menor tamanho tem importantes consequências para o ciclo do carbono, levando ao aumento das taxas de reciclagem de carbono e nutrientes e a uma diminuição nas taxas de exportação (BOPP et al., 2005). Além disso, essa mudança trará impactos sobre a qualidade do alimento disponível para os herbívoros, visto que as classes de menor tamanho sustentam diferentes predadores do zooplâncton, levando a uma alteração no comprimento da cadeia trófica, resultando em comunidades do zooplâncton menos produtivas e que fornecem recursos de menor valor energético para os níveis tróficos superiores (LITCHMAN et al., 2015)

Posto isto, como a estrutura de tamanho do fitoplâncton é um importante determinante da estrutura trófica e do funcionamento biogeoquímico em ecossistemas pelágicos, pois afetam a extensão e complexidade da teia trófica, a eficiência da transferência de energia e a força da bomba de carbono, a compreensão sobre como essas mudanças afetarão as regiões costeiras e oceânicas sob influência de plumas é de suma importância para avaliar os impactos sobre o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos e das teias tróficas nessas regiões.

O presente estudo destaca a importância da realização de mais trabalhos que abordem as diferentes classes de tamanho, a distribuição e contribuição relativa da comunidade fitoplanctônica nos demais períodos de vazão do rio, para uma compreensão mais aprofundada sobre a ecologia e o papel desses organismos sobre a PCA e oceano adjacente não apenas numa escala espacial, mas também temporal.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos ficou evidenciado que as concentrações de nutrientes carregados pela pluma, juntamente com a salinidade e temperatura, além de processos físicos como as ondas internas, são os principais fatores que regem a estrutura da comunidade fitoplanctônica na PCA e oceano adjacente. Essa relação entre a biomassa, tamanho das células e os fatores ambientais que foram determinantes para o fitoplâncton da região, leva a um entendimento sobre a ecologia do fitoplâncton e dos fatores que regem sua distribuição e contribuição relativa na região.

Além disso, o índice *Fp* indicou uma alta produção primária nova sobre a PCA, com um gradiente costa-oceano evidente, entretanto, foi observado um desacoplamento entre a biomassa e o tamanho das células sobre a PCA, característico de regiões oligotróficas. Isso ocorreu, pois apesar da entrada de nutrientes favorecer um aumento da biomassa principalmente nas estações de plataforma, localizadas na desembocadura do rio Amazonas e contribuir para a dominância das diatomáceas na camada de superfície, a comunidade foi majoritariamente composta por células do pico- e nanofitoplâncton durante o período de estudo.

É fato que as classes de tamanho desempenham um importante papel na estrutura trófica e funcionamento biogeoquímico em ecossistemas pelágicos. Logo, compreender as mudanças na sua distribuição e contribuição relativa em áreas fortemente influenciadas por plumas fluviais, é de suma importância para prevê a resposta das comunidades planctônicas as mudanças globais que afetarão os oceanos, bem como, avaliar os impactos sobre o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos e das teias tróficas nessas regiões.

REFERÊNCIAS

- AJANI, P. A. et al. Global Warming Impacts Micro-Phytoplankton at a Long-Term Pacific Ocean Coastal Station. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, p. 11, 2020.
- ARAUJO, M. L. V. et al. Contrasting patterns of phytoplankton pigments and chemotaxonomic groups along 30°S in the subtropical South Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 120, p. 112–121, 2017.
- ASSENE, F. et al. Internal tides off the Amazon shelf Part I : importance for the structuring of ocean temperature during two contrasted seasons. **EGUsphere**, p. 1–46, 2023.
- BALCH, W. M. et al. Coccolithophore distributions of the North and South Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 151, p. 23, 2019.
- BARTON, A. D. et al. The biogeography of marine plankton traits. **Ecology Letters**, v. 16, n. 4, p. 522–534, 2013.
- BENOISTON, A.-S. et al. The evolution of diatoms and their biogeochemical functions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 372, n. 1728, p. 10, 2017.
- BERUBE, P. M. et al. Temporal dynamics of Prochlorococcus cells with the potential for nitrate assimilation in the subtropical Atlantic and Pacific oceans. **Limnology and Oceanography**, v. 61, n. 2, p. 482–495, 2016.
- BIDIGARE, R.; HEUKELEM, L.; TREES, C. Analysis of Algal Pigments by High-Performance Liquid Chromatography. **Algal Culturing Techniques**, p. 327–345, 2005.
- BILLER, S. J. et al. Prochlorococcus: the structure and function of collective diversity. **Nature Reviews Microbiology**, v. 13, n. 1, p. 13–27, 2015.
- BLANCHOT, J. et al. Picophytoplankton in the equatorial Pacific: vertical distributions in the warm pool and in the high nutrient low chlorophyll conditions. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 48, n. 1, p. 297–314, 2001.
- BODE, A. et al. New and regenerated production and ammonium regeneration in the western Bransfield Strait region (Antarctica) during phytoplankton bloom conditions in summer. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, FRUELA - A Carbon Flux Study in the Antarctic Peninsula Area. v. 49, n. 4, p. 787–804, 2002.
- BOPP, L. et al. Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 19, p. 4 2005.
- BOYD, P. W.; TRULL, T. W. Understanding the export of biogenic particles in oceanic waters: Is there consensus? **Progress in Oceanography**, v. 72, n. 4, p. 276–312, 2007.

CAVALCANTI, L. B. **Variações das condições hidrológicas e da clorofila a associadas ao cultivo do camarão marinho *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931), na região estuarina do rio Paraíba do Norte (Paraíba Brasil)**. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/8721>>. Acesso em: 3 ago. 2021.

CHISHOLM, S. W. Phytoplankton Size. Em: FALKOWSKI, P. G.; WOODHEAD, A. D.; VIVIRITO, K. (Eds.). **Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea**. Environmental Science Research. Boston, MA: Springer US, 1992. p. 213–237.

CHRÉTIENNOT-DINET, M.-J. et al. A new marine picoeucaryote: *Ostreococcus tauri* gen. et sp. nov. (Chlorophyta, Prasinophyceae). **Phycologia**, v. 34, n. 4, p. 285–292, 1995.

CLAUSTRE, H. The trophic status of various oceanic provinces as revealed by phytoplankton pigment signatures. **Limnology and Oceanography**, v. 39, n. 5, p. 1206–1210, 1994.

COLES, V. et al. The pathways and properties of the Amazon River Plume in the tropical North Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, p. 6894–6913, 2013.

CULLEN, J. The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a. **Can. J. Fish. Aquat. Sci.**, v. 39, p. 791–803, 1982.

DAVIES, C. H. et al. A database of chlorophyll a in Australian waters. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1–8, 2018.

DEMASTER, D. J. et al. Biogeochemical processes in Amazon shelf waters: chemical distributions and uptake rates of silicon, carbon and nitrogen. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5, p. 617–643, 1996.

DEMASTER, D. J.; POPE, R. H. Nutrient dynamics in Amazon shelf waters: results from AMASSEDs. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 263–289, 1996.

DONEY, S. C. Plankton in a warmer world. **Nature**, v. 444, n. 7120, p. 695–696, 2006.

DUGDALE, R. C.; GOERING, J. J. Uptake of New and Regenerated Forms of Nitrogen in Primary Productivity. **Limnology and Oceanography**, v. 12, n. 2, p. 196–206, 1967.

DUGDALE, R.; WILKERSON, F. Nutrient Limitation of New Production in the Sea. Em: FALKOWSKI, P. G.; WOODHEAD, A. D.; VIVIRITO, K. (Eds.). **Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea**. Environmental Science Research. Boston, MA: Springer US, 1992. p. 107–122.

EIKREM, W. et al. Haptophyta. Em: ARCHIBALD, J. M. et al. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. p. 1–61.

ENDO, H.; SUZUKI, K. Spatial Variations in Community Structure of Haptophytes Across the Kuroshio Front in the Tokara Strait. *In: Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics*, 2019, p. 207-221.

EPPLEY, R. W. Estimating Phytoplankton Growth Rates in the Central Oligotrophic Oceans. Em: FALKOWSKI, P. G. (Ed.). **Primary Productivity in the Sea**. Environmental Science Research. Boston, MA: Springer US, 1980. p. 231–242.

EPPLEY, R. W.; PETERSON, B. J. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. **Nature**, v. 282, n. 5740, p. 677–680, 1979.

ESPINOZA VILLAR, J. C. et al. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3, p. 297–311, 2009.

FALKOWSKI, P. et al. The Evolution of Modern Eukaryotic Phytoplankton. **Science (New York, N.Y.)**, v. 305, p. 354–60, 2004.

FALKOWSKI, P. Ocean Science: The power of plankton. **Nature**, v. 483, n. 7387, p. S17–S20, 2012.

FALKOWSKI, P. G.; BARBER, R. T.; SMETACEK, V. Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production. **Science**, v. 281, n. 5374, p. 200–206, 1998.

FALKOWSKI, P. G.; OLIVER, M. J. Mix and match: how climate selects phytoplankton. **Nature Reviews. Microbiology**, v. 5, n. 10, p. 813–819, 2007.

FARIAS, G. B. et al. Uncoupled changes in phytoplankton biomass and size structure in the western tropical Atlantic. **Journal of Marine Systems**, v. 227, p. 14, 2022.

FIELD, C. B. et al. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. **Science**, v. 281, n. 5374, p. 237–240, 1998.

FINKEL, Z. Light absorption and size scaling of light-limited metabolism in marine diatoms. **Limnology and Oceanography - LIMNOL OCEANOGR**, v. 46, p. 86–94, 2001.

FINKEL, Z. V. et al. Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry. **Journal of Plankton Research**, v. 32, n. 1, p. 119–137, 2010.

FLOMBAUM, P. et al. Present and future global distributions of the marine Cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 24, p. 9824–9829, 2013.

GABIOUX, M.; VINZON, S. B.; PAIVA, A. M. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 25, n. 1, p. 113–125, 2005.

GEYER, W. R. et al. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5–6, p. 575–616, 1996.

GOES, J. I. et al. 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.

GONÇALVES-ARAUJO, R. et al. Brazil-Malvinas confluence: effects of environmental variability on phytoplankton community structure. **Journal of Plankton Research**, v. 34, n. 5, p. 399–415, 2012.

GONZALEZ-RODRIGUEZ, Eliane et al. Biomassa fitoplanctônica e produção primária. In: **Ambiente Pelágico**. Campus, 2017. p. 69-87.

GRASSHOFF, K.; EHRHARDT, M.; KREMLING, K. Methods of seawater analysis. Verlag Chemie. 1983.

GRIMES, C. B.; KINGSFORD, M. J. How do Riverine Plumes of Different Sizes Influence Fish Larvae: do they Enhance Recruitment? **Marine and Freshwater Research**, v. 47, n. 2, p. 191–208, 1996.

GUIDI, L. et al. Effects of phytoplankton community on production, size, and export of large aggregates: A world-ocean analysis. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6, p. 1951–1963, 2009.

HANSEN, P. J. The Role of Photosynthesis and Food Uptake for the Growth of Marine Mixotrophic Dinoflagellates¹. **Journal of Eukaryotic Microbiology**, v. 58, n. 3, p. 203–214, 2011.

HARRISON, W. G. Nutrient Regeneration and Primary Production in the Sea. Em: FALKOWSKI, P. G. (Ed.). **Primary Productivity in the Sea**. Environmental Science Research. Boston, MA: Springer US, 1980. p. 433–460.

HAWCO, N. J. et al. Independent iron and light limitation in a low-light-adapted *Prochlorococcus* from the deep chlorophyll maximum. **The ISME Journal**, v. 15, n. 1, p. 359–362, 2021.

HEIN, M.; PEDERSEN, M.; SAND-JENSEN, K. Size-dependent nitrogen uptake in micro- and macroalgae. **Marine Ecology Progress Series**, v. 118, p. 247–253, 1995.

HEWSON, I. et al. Influence of Amazon and Orinoco offshore surface water plumes on oligotrophic bacterioplankton diversity in the west tropical Atlantic. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 43, p. 11–22, 2006.

HICKMAN, A. E. et al. Primary production and nitrate uptake within the seasonal thermocline of a stratified shelf sea. **Marine Ecology Progress Series**, v. 463, p. 39–57, 2012.

HIGGINS, H. W.; MACKEY, D. J.; CLEMENTSON, L. Phytoplankton distribution in the Bismarck Sea north of Papua New Guinea: The effect of the Sepik River outflow. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 53, n. 11, p. 1845–1863, 2006.

HIGGINS, Harry W.; WRIGHT, Simon; SCHLUTER, L. Quantitative interpretation of chemotaxonomic pigment data. 2011, p. 257–313.

HILLEBRAND, H. et al. Cell size as driver and sentinel of phytoplankton community structure and functioning. **Functional Ecology**, v. 36, n. 2, p. 276–293, 2022.

HOLM-HANSEN, O. et al. Fluorometric Determination of Chlorophyll. **ICES Journal of Marine Science**, v. 30, n. 1, p. 3–15, 1965.

HUETE-ORTEGA, M. et al. Isometric size-scaling of metabolic rate and the size abundance distribution of phytoplankton. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 279, n. 1734, p. 1815–1823, 2011.

HUISMAN, J. et al. Reduced mixing generates oscillations and chaos in the oceanic deep chlorophyll maximum. **Nature**, v. 439, n. 7074, p. 322–325, 2006.

IRIGOIEN, X. et al. Using HPLC pigment analysis to investigate phytoplankton taxonomy: the importance of knowing your species. **Helgoland Marine Research**, v. 58, n. 2, p. 77–82, 2004.

ISLABÃO, C. A. et al. Phytoplankton community structure in relation to hydrographic features along a coast-to-offshore transect on the SW Atlantic Continental Shelf. **Continental Shelf Research**, v. 151, p. 30–39, 2017.

JEFFREY, S. W.; HUMPHREY, G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. **Biochemie und Physiologie der Pflanzen**, v. 167, n. 2, p. 191–194, 1975.

JEFFREY, S. W.; WRIGHT, S.; ZAPATA, M. Microalgal classes and their signature pigments. **Phytoplankton Pigments: Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography**, p. 3–77, 2011.

JEONG, H. J. et al. Growth, feeding and ecological roles of the mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in marine planktonic food webs. **Ocean Science Journal**, v. 45, n. 2, p. 65–91, 2010.

JEONG, H. J. et al. Mixotrophy in the phototrophic dinoflagellate *Takayama helix* (family Kareniaceae): Predator of diverse toxic and harmful dinoflagellates. **Harmful Algae**, v. 60, p. 92–106, 2016.

JOHNS, W. E. et al. Annual Cycle and Variability of the North Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, n. 1, p. 103–128, 1998.

JOHNS, W. E. et al. On the Atlantic inflow to the Caribbean Sea. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 49, n. 2, p. 211–243, 2002.

JORDAN, R. W.; CHAMBERLAIN, A. H. L. Biodiversity among haptophyte algae. **Biodiversity & Conservation**, v. 6, n. 1, p. 131–152, 1997.

KANG, Y. et al. Areas of the global major river plumes. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 32, n. 1, p. 79–88, 2013.

KARLUSICH, J. J. P.; IBARBALZ, F. M.; BOWLER, C. Phytoplankton in the Tara Ocean. **Annual Review of Marine Science**, v. 12, n. 1, p. 233–265, 2020.

KIRKHAM, A. R. et al. Basin-scale distribution patterns of photosynthetic picoeukaryotes along an Atlantic Meridional Transect. **Environmental Microbiology**, v. 13, n. 4, p. 975–990, 2011.

KOENING, M.; MACÊDO, S. Hydrology and phytoplankton community structure at Itamaracá-Pernambuco (Northeast Brazil). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, p. 12, 1999.

KOSTADINOV, T. S.; SIEGEL, D. A.; MARITORENA, S. Global variability of phytoplankton functional types from space: assessment via the particle size distribution. **Biogeosciences**, v. 7, n. 10, p. 3239–3257, 2010.

KOUAME, K. V. et al. Physicochemical characterization of the waters of the coastal rivers and the lagoonal system of Cote d'Ivoire. **Journal of Applied sciences**, v. 9, n. 8, p. 1517-1523, 2009.

LALLI, C. M.; PARSONS, T. R. Phytoplankton and primary production. *In*: LALLI, C. M.; PARSONS, T. R. **Biological Oceanography: An Introduction**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. p. 39–73.

LANGE, P. K. et al. Scratching Beneath the Surface: A Model to Predict the Vertical Distribution of Prochlorococcus Using Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 847, 2018.

LATASA, M. Improving estimations of phytoplankton class abundances using CHEMTAX. **Marine Ecology Progress Series**, v. 329, p. 13–21, 2007.

LENTZ, S. 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.

LENTZ, S. J.; LIMEBURNER, R. The Amazon River Plume during AMASSEDs: Spatial characteristics and salinity variability. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C2, p. 2355, 1995.

LI, W. K. W. Phytoplankton biomass and chlorophyll concentration across the North Atlantic. **Scientia Marina (Espana)**, v. 58, n. 1, 1994.

LIHAN, T. et al. Influence of River Plume on Variability of Chlorophyll a Concentration using Satellite Images. **Journal of Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 484-493, 2011.

LIMA, C. R. et al. Chemotaxonomy-based mapping of phytoplankton communities in the subtropical Southwestern Atlantic Ocean, with emphasis on the marine cyanobacterium *Trichodesmium*. **Progress in Oceanography**, v. 172, p. 77–88, 2019.

LITCHMAN, E. Resource Competition and the Ecological Success of Phytoplankton. *Em*: FALKOWSKI, P. G.; KNOLL, A. H. (Eds.). **Evolution of Primary Producers in the Sea**. Burlington: Academic Press, 2007. p. 351–375.

LITCHMAN, E. et al. Global biogeochemical impacts of phytoplankton: a trait-based perspective. **Journal of Ecology**, v. 103, n. 6, p. 1384–1396, 2015.

LITCHMAN, E.; KLAUSMEIER, C. A. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 39, n. 1, p. 615–639, 2008.

LIU, H. et al. Extreme diversity in noncalcifying haptophytes explains a major pigment paradox in open oceans. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 31, p. 12803–12808, 2009.

LOHRENZ, S. E. et al. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River. **Marine Ecology Progress Series**, v. 155, p. 45–54, 1997.

LOHRENZ, S. E. et al. A retrospective analysis of nutrients and phytoplankton productivity in the Mississippi River plume. **Continental Shelf Research**, Coastal Ecosystem Responses to Changing Nutrient Inputs from Large Temperate and Subtropical Rivers. v. 28, n. 12, p. 1466–1475, 2008.

MACKEY, M. D. et al. CHEMTAX - a program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton. **Oceanographic Literature Review**, v. 7, n. 44, p. 265–283, 1996.

MARAÑÓN, E. et al. Patterns of phytoplankton size structure and productivity in contrasting open-ocean environments. **Marine Ecology Progress Series**, v. 216, p. 43–56, 2001.

MARAÑÓN, E. et al. High variability of primary production in oligotrophic waters of the Atlantic Ocean: uncoupling from phytoplankton biomass and size structure. **Marine Ecology Progress Series**, v. 257, p. 1–11, 2003.

MARAÑÓN, E. Cell Size as a Key Determinant of Phytoplankton Metabolism and Community Structure. **Annual Review of Marine Science**, v. 7, n. 1, p. 241–264, 2015.

MASOTTI, I. et al. The Influence of River Discharge on Nutrient Export and Phytoplankton Biomass Off the Central Chile Coast (33°–37°S): Seasonal Cycle and Interannual Variability. **Frontiers in Marine Science**, v. 5, p. 423, 2018.

MCMANUS, G.; DAWSON, R. Phytoplankton pigments in the deep chlorophyll maximum of the Caribbean Sea and the western tropical Atlantic Ocean. **Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER**, v. 113, p. 199–206, 1994.

MEDEIROS, P. 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.

MEDLIN, L. K. et al. Picoeukaryotic Plankton Diversity at the Helgoland Time Series Site as Assessed by Three Molecular Methods. **Microbial Ecology**, v. 52, n. 1, p. 53–71, 2006.

MENDES, C. R. et al. Spatial distribution of phytoplankton assemblages in the Nazaré submarine canyon region (Portugal): HPLC-CHEMTAX approach. **Journal of Marine Systems**, v. 87, n. 1, p. 90–101, 2011.

METZLER, P. M. et al. New and regenerated production in the South Atlantic off Brazil. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 44, n. 3, p. 363–384, 1997.

MEYBECK, M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. **American Journal of Science**, v. 282, n. 4, p. 401–450, 1982.

MIGNOT, A. et al. From the shape of the vertical profile of in vivo fluorescence to Chlorophyll-a concentration. **Biogeosciences**, v. 8, n. 8, p. 2391–2406, 2011.

MIGNOT, A. et al. Understanding the seasonal dynamics of phytoplankton biomass and the deep chlorophyll maximum in oligotrophic environments: A Bio-Argo float investigation. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 28, n. 8, p. 856–876, 2014.

MIRANDA-ALVAREZ, C. et al. Phytoplankton pigments and community structure in the northeastern tropical pacific using HPLC-CHEMTAX analysis. **Journal of Oceanography**, v. 76, n. 2, p. 91–108, 2020.

MOLLERI, G. S. F.; NOVO, E. M. L. DE M.; KAMPEL, M. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 3, p. 342–352, 2010.

MOORE, L.; GOERICKE, R.; CHISHOLM, S. Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: Influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. **Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER**, v. 116, p. 259–275, 1995.

MOORE, L. R.; ROCAP, G.; CHISHOLM, S. W. Physiology and molecular phylogeny of coexisting *Prochlorococcus* ecotypes. **Nature**, v. 393, n. 6684, p. 464–467, 1998.

MOURIÑO, B.; FERNÁNDEZ, E.; ALVES, M. Thermohaline structure, ageostrophic vertical velocity fields and phytoplankton distribution and production in the northeast Atlantic subtropical front. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 109, n. C4, 2004.

NEUMANN-LEITÃO, S. et al. Zooplankton from a reef system under the influence of the Amazon River Plume. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 355, 2018.

NISHINO, S. et al. Nutrient supply and biological response to wind-induced mixing, inertial motion, internal waves, and currents in the northern Chukchi Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 120, n. 3, p. 1975–1992, 2015.

NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D. J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5–6, p. 553–573, 1996.

NOGUEIRA, L. DE C. et al. Metagenomic and isotopic signatures of the Amazon River plume into the southern red snapper fish (*Lutjanus purpureus*). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 292, p. 108440, 2023.

NOT, F. et al. A Single Species, *Micromonas pusilla* (Prasinophyceae), Dominates the Eukaryotic Picoplankton in the Western English Channel. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 7, p. 4064–4072, 2004.

OLTMAN, R. E. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River. Circular 5521. **US Geological Survey, Washington**, 1968.

OTSUKA, A. et al. Dynamics of Primary Productivity and Oceanographic Parameters under Influence of the Amazon River Plume. **Open Journal of Ecology**, v. 8, n. 11, p. 590–606, 2018.

PAN, H. et al. A comparative study of phytoplankton community structure and biomass determined by HPLC-CHEMTAX and microscopic methods during summer and autumn in the central Bohai Sea, China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 155, 2020.

PARTENSKY, F. et al. Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical northeastern Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 43, n. 8, p. 1191–1213, 1996.

PARTENSKY, Frédéric; BLANCHOT, Jean; VAULOT, D. Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. Bulletin-Institut Oceanographique Monaco-Número Special-, p. 457-476, 1999.

PELTOMAA, E. T. et al. The Importance of Phytoplankton Biomolecule Availability for Secondary Production. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5, 2017.

PITTERA, J. et al. Connecting thermal physiology and latitudinal niche partitioning in marine *Synechococcus*. **The ISME Journal**, v. 8, n. 6, p. 1221–1236, 2014.

QUEIROZ, A. R. D. et al. Vertical and horizontal distribution of phytoplankton around an oceanic archipelago of the Equatorial Atlantic. **Marine Biodiversity Records**, v. 8, p. e155, 2015.

REID, E. C. et al. Internal waves influence the thermal and nutrient environment on a shallow coral reef. **Limnology and Oceanography**, v. 64, n. 5, p. 1949–1965, 2019.

RIBEIRO, C. G. et al. Pico and nanoplankton abundance and carbon stocks along the Brazilian Bight. **PeerJ**, v. 4, p. e2587, 2016.

RICHARDSON, A. J.; SCHOEMAN, D. S. Climate Impact on Plankton Ecosystems in the Northeast Atlantic. **Science**, v. 305, n. 5690, p. 1609–1612, 2004.

RICHEY, J. E. et al. Water Discharge and Suspended Sediment Concentrations in the Amazon River: 1982–1984. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 756–764, 1986.

ROY, S. et al. **Phytoplankton Pigments: Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography**. Cambridge University Press, 2011.

SÁEZ, A. G. et al. A review of the phylogeny of the Haptophyta. Em: THIERSTEIN, H. R.; YOUNG, J. R. **Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. p. 251–269.

SANTOS, M. L. S. et al. Influence of the Amazon and Pará Rivers on Water Composition and Phytoplankton Biomass on the Adjacent Shelf. **Journal of Coastal Research**, v. 2008, n. 243, p. 585–593, 2008a.

SANTOS, M. L. S. et al. Nutrient and phytoplankton biomass in the Amazon River shelf waters. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, p. 703–717, 2008b.

SCHOFIELD, O. et al. Phytoplankton productivity in a turbid buoyant coastal plume. **Continental Shelf Research**, Coastal Ocean Observing System: Retrospective Reanalysis and Real-Time Forecasting. v. 63, p. S138–S148, 2013.

SEOANE, S. et al. Phytoplankton pigments and epifluorescence microscopy as tools for ecological status assessment in coastal and estuarine waters, within the Water Framework Directive. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 7, p. 1484–1497, 2011.

SHELDON, R. W. Phytoplankton growth rates in the tropical ocean. **Limnology and Oceanography**, v. 29, n. 6, p. 1342–1346, 1984.

SHIPE, R. F. et al. Diatom biomass and productivity in oceanic and plume-influenced waters of the western tropical Atlantic ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 53, n. 8, p. 1320–1334, 2006.

SILVA, M. H. D. et al. Distribuição espacial e sazonal da biomassa fitoplanctônica e dos parâmetros hidrológicos no estuário do Rio Formoso, (Rio Formoso, Pernambuco, Brasil). **Tropical Oceanography**, v. 32, n. 1, p. 89–106, 2004.

SMITH JR., W. O.; 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.

SMOAK, Joseph M.; KREST, James M.; SWARZENSKI, Peter W. Geochemistry of the Amazon estuary. **Estuaries**, p. 71–90, 2006.

SOHM, J. A. et al. Co-occurring *Synechococcus* ecotypes occupy four major oceanic regimes defined by temperature, macronutrients and iron. **The ISME Journal**, v. 10, n. 2, p. 333–345, 2016.

SOUZA, C. et al. Chlorophyll a and nutrient distribution around seamounts and islands of the tropical south-western Atlantic. **Marine and Freshwater Research**, v. 64, p. 168, 2013.

STOECKER, D. K. Conceptual models of mixotrophy in planktonic protists and some ecological and evolutionary implications. **European Journal of Protistology**, v. 34, n. 3, p. 281–290, 1998.

STOECKER, D. K. Mixotrophy among Dinoflagellates1. **Journal of Eukaryotic Microbiology**, v. 46, n. 4, p. 397–401, 1999.

STOECKER, D. K. et al. Mixotrophy in the Marine Plankton. **Annual Review of Marine Science**, v. 9, n. 1, p. 311–335, 2017.

STOLTE, W.; RIEGMAN, R. Effect of phytoplankton cell size on transient-state nitrate and ammonium uptake kinetics. **Microbiology**, v. 141, n. 5, p. 1221–1229, 1995.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 46, n. 1, p. 279–303, 1999.

SUBRAMANIAM, A. 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.

SWAN, C. M. et al. A global seasonal surface ocean climatology of phytoplankton types based on CHEMTAX analysis of HPLC pigments. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 109, p. 137–156, 2016.

TALLEY, L. D. et al. Chapter 8 - Gravity Waves, Tides, and Coastal Oceanography. In: TALLEY, L. D. et al. (Eds.). **Descriptive Physical Oceanography (Sixth Edition)**. Boston: Academic Press, 2011. p. 223–244.

TEIXEIRA, C.; TUNDISI, J.; SANTORO, J. Plankton studies in a mangrove environment: IV. size fractionation of the phytoplankton. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 16, n. 1, p. 39–42, 1967.

THOMSEN, H. A. A survey of the smallest eucaryotic organisms of the marine phytoplankton. **Photosynthetic Picoplankton. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.**, v. 214, p. 121–158, 1986.

TRAGIN, M. et al. Diversity and ecology of green microalgae in marine systems: an overview based on 18S rRNA gene sequences. **Perspectives in Phycology**, v. 3, n. 3, p. 141–154, 2016.

VAN HEUKELEM, L.; THOMAS, C. S. Computer-assisted high-performance liquid chromatography method development with applications to the isolation and analysis of phytoplankton pigments. **Journal of Chromatography A**, v. 910, n. 1, p. 31–49, 2001.

VERLECAR, X. N.; DESAI, S. R. **Phytoplankton Identification Manual**. National Institute of Oceanography, Goa, 2004.

VILLAMAÑA, M. et al. Role of internal waves on mixing, nutrient supply and phytoplankton community structure during spring and neap tides in the upwelling ecosystem of Ría de Vigo (NW Iberian Peninsula). **Limnology and Oceanography**, v. 62, n. 3, p. 1014–1030, 2017.

VILLAMAÑA, M. et al. The role of mixing in controlling resource availability and phytoplankton community composition. **Progress in Oceanography**, v. 178, p. 102181, 2019.

WAITE, A. et al. Sinking rate vs volume relationships illuminate sinking control mechanisms in marine diatoms. **Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER**, v. 157, p. 97–108, 1997.

WANG, Y.-H.; DAI, C.-F.; CHEN, Y.-Y. Physical and ecological processes of internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 18, 2007.

WARD, B. A.; FOLLOWS, M. J. Marine mixotrophy increases trophic transfer efficiency, mean organism size, and vertical carbon flux. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 11, p. 2958–2963, 2016.

WIRTZ, K. et al. Vertically migrating phytoplankton fuel high oceanic primary production. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 8, p. 750–756, 2022.

WOLANSKI, E.; DELESALLE, B. Upwelling by internal waves, Tahiti, French Polynesia. **Continental Shelf Research**, v. 15, n. 2, p. 357–368, 1995.

WOODSON, C. B. The Fate and Impact of Internal Waves in Nearshore Ecosystems. **Annual Review of Marine Science**, v. 10, n. 1, p. 421–441, 2018.

WORDEN, A. Z.; NOLAN, J. K.; PALENIK, B. Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: The importance of the eukaryotic component. **Limnology and Oceanography**, v. 49, n. 1, p. 168–179, 2004.

WRIGHT, S. et al. Analysis of phytoplankton of the Australian sector of the Southern Ocean: comparisons of microscopy and size frequency data with interpretations of pigment HPLC data using the “CHEMTAX” matrix factorisation program. **Marine Ecology Progress Series**, v. 144, p. 285–298, 1996.

WRIGHT, Simon W.; JEFFREY, S. W. Pigment markers for phytoplankton production. **Marine organic matter: biomarkers, isotopes and DNA**, p. 71-104, 2006.

WRIGHT, S. W. et al. Composition and significance of picophytoplankton in Antarctic waters. **Polar Biology**, v. 32, n. 5, p. 797–808, 2009.

WYSOCKI, L. A. et al. Spatial variability in the coupling of organic carbon, nutrients, and phytoplankton pigments in surface waters and sediments of the Mississippi River plume. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 69, n. 1, p. 47–63, 2006.

ZAPATA, M. et al. Pigment-based chloroplast types in dinoflagellates. **Marine Ecology Progress Series**, v. 465, p. 33–52, 2012.

ZAPATA, M.; RODRÍGUEZ, F.; GARRIDO, J. L. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. **Marine Ecology Progress Series**, v. 195, p. 29–45, 2000.

ZEHR, J. P. Nitrogen fixation by marine cyanobacteria. **Trends in Microbiology**, v. 19, n. 4, p. 162–173, 2011.

ZHU, F. et al. Mapping of picoeucaryotes in marine ecosystems with quantitative PCR of the 18S rRNA gene. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 52, n. 1, p. 79–92, 2005.