

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

ARAIENE PERES PEREIRA

Conexões entre a pluma do Rio Amazonas, o Carbono
Orgânico Particulado e os Padrões Biogeográficos Bentônicos
na margem equatorial do Brasil

VITÓRIA - ES

2025

ARAIENE PERES PEREIRA

Conexões entre a pluma do Rio Amazonas, o Carbono
Orgânico Particulado e os Padrões Biogeográficos Bentônicos
na margem equatorial do Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Ciências Biológicas da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Fraga Bernardino

Coorientadora: Dra. Daniela Yepes Gaurisas

VITÓRIA - ES

2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P436" Pereira, Araiene, 1999-
"Conexões entre a pluma do Rio Amazonas, o Carbono
Orgânico Particulado e os Padrões Biogeográficos Bentônicos na
margem equatorial do Brasil" / Araiene Pereira. - 2025.
(recurso não paginado). : il.

Orientador: Angelo Bernardino.

Coorientadora: Daniela Gaurisas.

Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e
Naturais.

1. Plataformas Continentais. 2. Carbono Orgânico Particulado.
3. Pluma do Rio Amazonas. 4. Comunidades Bentônicas. I.
Bernardino, Angelo. II. Gaurisas, Daniela. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e
Naturais. IV. Título.

CDU: 57



Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM BIOLOGIA ANIMAL DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – ATA Nº 248 – 14/07/2025

No dia catorze do mês de julho de dois mil e vinte e cinco, em sessão remota, conforme Portaria Normativa nº 08 da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação/UFES de 01 de julho de 2021, procedeu-se a avaliação da dissertação da aluna **Araíene Peres Pereira**, que foi orientada pelo Prof. Dr. Angelo Fraga Bernardino e coorientada pela Profa. Dra. Daniela Yepes Gaurisas. Às treze horas e trinta minutos, a Prof. Dr. Angelo Fraga Bernardino– UFES, Orientador e Presidente da Comissão Examinadora de Defesa de Dissertação, deu início aos trabalhos, convidando a compor a banca, sendo todas as professoras doutoras: Ana Carolina de Azevedo Mazzuco - UNESCO-IOC (Examinadora Externa) e Profa. Dra. Áurea Maria Ciotti-USP (Examinadora Externa). A seguir, a presidente solicitou a mestranda que fizesse uma explanação de seu trabalho intitulado **“Conexões entre a pluma do Rio Amazonas, o Carbono Orgânico Particulado e os Padrões Biogeográficos Bentônicos na margem equatorial do Brasil”**. Finda a apresentação, a presidente passou a palavra aos examinadores, que procederam à arguição da candidata. Ao final, a Comissão em sessão reservada deliberou pela **APROVAÇÃO** da referida dissertação nos termos do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas e alertou que a aprovada somente terá direito ao título de Mestre após entrega da versão final de sua dissertação, em meio digital, à Secretaria do Programa. Encerrada a sessão, eu, Prof. Dr. Angelo Fraga Bernardino, Orientador e Presidente da Comissão Examinadora, lavrei a presente ata que vai assinada digitalmente por mim e pelos demais componentes da Comissão.

Prof. Dr. Angelo Fraga Bernardino (UFES)
Orientador e Presidente da Comissão Examinadora

Profa. Dra. Ana Carolina de Azevedo Mazzuco (UNESCO-IOC)
Examinadora Externa

Profa. Dra. Áurea Maria Ciotti (USP)
Examinadora Externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa científica no Brasil.

Agradeço à minha mãe, pelo amor incondicional e por sempre acreditar em mim.

À minha família, pelo carinho e respeito com a minha escolha de trilhar um caminho distante de casa em busca dos meus sonhos.

Aos meus amigos de laboratório, por cada conversa, apoio e por compartilharem comigo os altos e baixos dessa jornada.

Aos meus amigos do vôlei, que me ajudaram e fizeram companhia em todos os momentos.

Aos meus melhores amigos que, mesmo distantes, espalhados por outros estados, continuam presentes na minha vida e me lembrando quem sou e quem eu quero ser.

Sou imensamente grata às famílias que criei ao longo do caminho, aquelas que escolhi e que me acolheram, vocês foram fundamentais para minha força e equilíbrio.

Agradeço também à todos os seres, vivos ou mortos, que cruzaram meu caminho e me guiaram até aqui.

Por fim, agradeço as oportunidades que tive de conhecer lugares maravilhosos, que me transformaram e mudaram a minha forma de ver o mundo. Cada experiência vivida se tornou uma parte importante de mim.

Gratidão!

“Diz-se que antes do rio cair no mar ele treme de medo.

Olha para trás, para toda a jornada, os cumes, as montanhas,
o longo caminho sinuoso através das florestas, através dos povoados,

e vê à sua frente um oceano tão vasto que entrar nele

nada mais é do que desaparecer para sempre [...]

E somente quando ele entra no mar é que o medo vai embora.

Porque só então o rio saberá que

não se trata de desaparecer no oceano,

mas tornar-se oceano.”

(Osho)

RESUMO

As plataformas continentais Amazônica e da Guiana compõem um dos sistemas marinhos mais dinâmicos do planeta, moldado pela interação entre a descarga fluvial dos rios Amazonas e Orinoco e a circulação oceânica regional. Essa complexa hidrodinâmica regula a distribuição espacial do carbono orgânico particulado (COP), elemento-chave nos ciclos biogeoquímicos do Oceano Atlântico e na estrutura das comunidades pelágicas e bentônicas. Apesar de sua importância, ainda há lacunas de conhecimento sobre como a pluma do rio Amazonas influencia a dinâmica espaço-temporal do COP ao longo da plataforma continental, especialmente em sua dispersão rumo ao norte do Brasil. Neste sentido, investigamos essa relação integrando dados de vazão do Rio Amazonas (estação Óbidos), estimativas de COP derivadas de imagens MODIS-Aqua (2003–2023) e registros de ocorrência de invertebrados bentônicos provenientes do banco OBIS. A análise revelou um padrão claro de sazonalidade hidrológica, com oscilações influenciadas por eventos climáticos, como o El Niño–Southern Oscillation (ENSO), que afetaram diretamente a disponibilidade de COP na região. Observou-se que as maiores concentrações de COP se concentram ao norte da foz do Amazonas, impulsionadas pelo transporte contínuo da pluma amazônica pela Corrente Norte do Brasil. Em contraste, a plataforma da Guiana apresentou menores concentrações, provavelmente devido à retroflexão da pluma em direção ao oceano aberto. Essa dinâmica do COP parece refletir diretamente na composição das comunidades bentônicas. Foram registrados 4.541 ocorrências de invertebrados distribuídas em 12 filos, com predominância de Arthropoda, Cnidaria, Echinodermata e Mollusca. A Boca do Amazonas se destacou por sua alta riqueza taxonômica, possivelmente favorecida pela elevada deposição de matéria orgânica e pela intensa hidrodinâmica da região. Já a dissimilaridade observada entre as comunidades da Boca e do Norte, assim como a semelhança entre Guiana e Orinoco, sugerem que a combinação entre o aporte fluvial e os padrões de circulação marinha exerce forte influência na organização faunística. Espécies como *Xiphopenaeus kroyeri* e *Penaeus subtilis* foram representativas de ambientes ricos em COP, enquanto corais e equinodermos apresentaram maior frequência em áreas com menor aporte de material particulado. Esses resultados indicam que a distribuição do COP atua como um dos principais determinantes ecológicos da estrutura bentônica regional. Por fim, destacamos o impacto de eventos climáticos extremos, como o El Niño de 2015–2017, que reduziram em cerca de 15% a vazão do Amazonas e as concentrações de COP, evidenciando a alta sensibilidade desse sistema costeiro às mudanças climáticas globais.

Palavras-chaves: Plataformas Continentais Tropicais; Carbono Orgânico Particulado (COP); Comunidades Bentônicas; Pluma do Rio Amazonas; ENSO.

ABSTRACT

The Amazon and Guiana continental shelves comprise one of the most dynamic marine systems on the planet, shaped by the interaction between the river discharge of the Amazon and Orinoco Rivers and the regional ocean circulation. This complex hydrodynamics regulates the spatial distribution of particulate organic carbon (POC), a key element in the biogeochemical cycles of the Atlantic Ocean and in the structure of pelagic and benthic communities. Despite its importance, there are still gaps in knowledge about how the Amazon River plume influences the spatiotemporal dynamics of POC along the continental shelf, especially as it disperses toward northern Brazil. Therefore, we investigated this relationship by integrating Amazon River discharge data (Óbidos station), POC estimates derived from MODIS-Aqua imagery (2003–2023), and benthic invertebrate occurrence records from the OBIS database. The analysis revealed a clear pattern of hydrological seasonality, with fluctuations influenced by climatic events such as the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), which directly affected COP availability in the region. The highest COP concentrations were observed north of the mouth of the Amazon, driven by the continuous transport of the Amazon plume by the North Brazil Current. In contrast, the Guiana Shelf showed lower concentrations, likely due to the retroflexion of the plume toward the open ocean. This COP dynamic appears to be directly reflected in the composition of benthic communities. A total of 4,541 invertebrate occurrences were recorded, distributed across 12 phyla, with Arthropoda, Cnidaria, Echinodermata, and Mollusca predominating. The Mouth of the Amazon stood out for its high taxonomic richness, possibly favored by the high deposition of organic matter and the region's intense hydrodynamics. The dissimilarity observed between the Boca and Norte communities, as well as the similarity between Guiana and the Orinoco, suggest that the combination of river flow and marine circulation patterns strongly influences faunal organization. Species such as *Xiphopenaeus kroyeri* and *Penaeus subtilis* were representative of COP-rich environments, while corals and echinoderms were more frequent in areas with lower particulate matter input. These results indicate that COP distribution acts as one of the

main ecological determinants of regional benthic structure. Finally, we highlight the impact of extreme climate events, such as the 2015–2017 El Niño, which reduced Amazon flow and COP concentrations by approximately 15%, highlighting the high sensitivity of this coastal system to global climate change.

Key-words: Tropical Continental Shelves; Particulate Organic Carbon; Benthic Communities; Amazon River Plume; ENSO.

LISTA DE TABELA

Tabela 1 (Capítulo 2): Número de ocorrências de cada filo de metazoários bentônicos registradas no banco de dados do Ocean Biodiversity Information System (OBIS) até julho de 2024.....46

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1 - Long-term effects of the Amazon River Discharge on Particulated Organic Carbon Distribution in the Amazon coast of Brazil

Figura 1: Map of the Amazon River plume indicating the polygons used to understand the latitudinal variability in productivity and POC concentrations.....18

Figura 2: a) Decomposition components from river discharge time series (time series, seasonal component, trend component, residual component). b) Amazon River discharge auto correlogram (autocorrelation (ACF)).....21

Figura 3: Composite of 21-years median surface POC concentrations averaged (2003-2023) for each polygon.....23

Figura 4: Hierarchical agglomerative clustering of median POC concentrations based on dissimilarities between latitude polygons using “average” linkage. Mouth group (yellow); North group (purple); Guianan group (orange); Orinoco group (pink).....24

Figura 5: Monthly time series of mean POC concentrations for each polygon group from January/2003 to December/2023. (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; (d) Orinoco group.....25

Figura 6: Differences between 21-years average POC concentrations and POC concentration in each year, in percentage, for each polygon group. (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; (d) Orinoco group.....26

Figura 7: 21-year time series of surface POC concentrations for wet (blue line) and Dry (red line) periods in: (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; and (d) Orinoco group.....27

Figura 8: 21-year median variation of surface POC concentrations for each month in: (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; and Orinoco group.....28

Capítulo 2 - Efeitos da Pluma do Rio Amazonas nos Padrões de Distribuição de Invertebrados Bentônicos em Plataformas Continentais Tropicais

Figura 1: Mapa da região da pluma do Rio Amazonas indicando os polígonos de latitude usados para comparar a fauna bentônica. Modificado de Pereira et al (em preparação).....42

Figura 2: Mapa da distribuição de ocorrências dos filos de metazoários bentônicos mais representativos (em quantidade de ocorrências) em cada uma das regiões delimitadas dentro da área de estudo.....47

Figura 3: Porcentagem de ocorrências por filo de metazoários bentônicos em cada região de estudo.....48

Figura 4: Resultado do agrupamento das regiões de estudo de acordo com as ocorrências de espécies bentônicas.....49

Figura 5. Boxplot da variação nas concentrações de COP em superfície para cada um dos quatro filos mais representativos (em número de ocorrências) em cada coordenada dos registros de ocorrência.....50

Figura 6: Porcentagem de ocorrências de organismos bentônicos invertebrados por classe em cada região de estudo para cada filo: a) Arthropoda; b) Cnidaria; c) Echinodermata; d) Mollusca.....53

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO GERAL

II. CAPÍTULO 1 - Long-term effects of the Amazon River Discharge on Particulated Organic Carbon Distribution in the Amazon coast of Brazil

II.1 INTRODUCTION

II.2 MATERIALS & METHODS

II.2.1 Study Area

II.2.2 In Situ Data

II.2.3 Satellite Data

II.2.4 Processing and Analyses

II.3 RESULTS

II.3.1 River Discharge Time Series

II.3.2 Spatial Distribution of POC

II.3.3 21-years of POC Concentrations

II.3.4 Seasonality

II.4 DISCUSSIONS

II.5 CONCLUSIONS

II.6 REFERENCES

III. CAPÍTULO 2 - Efeitos da Pluma do Rio Amazonas nos Padrões de Distribuição de Invertebrados Bentônicos em Plataformas Continentais Tropicais

III.1 INTRODUÇÃO

III.2 MATERIAIS & MÉTODOS

III.2.1 Área de Estudo

III.2.2 Aquisição e Processamento de Dados

III.2.3 Análise dos Dados

III.3 RESULTADOS

III.3.1 Ocorrências Bentônicas

III.3.2 COP em relação ao Benthos

III.3.3 Phylum Arthropoda

III.3.4 Phylum Cnidaria

III.3.5 Phylum Echinodermata

III.3.6 Phylum Mollusca

III.4 DISCUSSÃO

III.5 CONCLUSÃO

III.6 REFERÊNCIAS

IV. DISCUSSÃO GERAL

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VII. ANEXOS

VII.1 - Capítulo 1 - Figura Suplementar 1: Mean-monthly POC composite for the Amazon and Guianan Continental Shelves (2003 - 2023).

I. INTRODUÇÃO GERAL

A plataforma continental Amazônica representa uma das regiões costeiras mais produtivas e dinâmicas do planeta, resultante da interação complexa entre fatores hidrodinâmicos, climáticos e biogeoquímicos (Nittrouer & DeMaster, 1996). Um dos principais fatores dessa dinâmica é o Rio Amazonas que, como o maior rio em volume de descarga do mundo, contribui com cerca de 17% do escoamento global de água doce para os oceanos (Richey et al., 1986). A descarga do Rio Amazonas carrega enormes quantidades de nutrientes, sedimentos e matéria orgânica, formando uma extensa pluma de baixa salinidade que se estende do estuário até o Atlântico tropical ocidental, influenciando a produtividade primária marinha e o ciclo de carbono em grande escala (Subramaniam et al., 2008; Coles et al., 2013).

A produção primária realizada sob influência da pluma do Amazonas é altamente variável no espaço e no tempo, sendo modulada por fatores como a sazonalidade da vazão, eventos extremos (como El Niño) e padrões climáticos de maior escala (Smith & DeMaster, 1996; Gouveia et al., 2019; Carvalho et al., 2023). Parte significativa do carbono fixado pela fotossíntese é convertido em carbono orgânico particulado (COP), que, por sua vez, é exportado para o fundo marinho (Volk & Hoffert, 1985; Ducklow et al., 2001). Sabe-se que a magnitude do COP contribuído pelo Rio Amazonas é estimada em 10 Tg por ano (Richey et al., 1990). Em comparação, o Rio Congo, o segundo maior rio do mundo em termos de vazão e área de drenagem, contribui com cerca de 2 Tg de COP por ano (Coynel et al., 2005).

Este COP torna-se então uma importante fonte de alimento para organismos bentônicos, que desempenham papéis ecológicos cruciais na ciclagem de nutrientes, na decomposição da matéria orgânica e na manutenção do funcionamento dos ecossistemas marinhos (Snelgrove, 1999; Gray & Elliott, 2009). Mas, apesar da importância da pluma amazônica para a produtividade superficial e seu ecossistema, a variabilidade espaço-temporal do COP ainda é pouco estudada, especialmente em grandes escalas temporais e em relação a fatores hidrológicos e climáticos que modulam a dinâmica da pluma (Subramaniam et al., 2008; Coles et al., 2013; Carvalho et al., 2023).

Essa importância do COP é ainda mais evidente na plataforma amazônica, onde as concentrações superficiais de carbono orgânico superam aquelas registradas em outras regiões oceânicas, ampliando sua influência sobre a fauna bentônica local (Chong et al., 2014). As comunidades bentônicas dessa região são predominantemente formadas por poliquetas,

moluscos e crustáceos, cuja distribuição e abundância refletem diretamente as condições ambientais estabelecidas pela pluma do Rio Amazonas e pelos gradientes de matéria orgânica (Alongi, 1998; Dagg et al., 2004). No entanto, apesar de sua importância ecológica, a biodiversidade bentônica da plataforma amazônica ainda permanece pouco conhecida, até mesmo em regiões mais profundas (Lana et al., 1996; Soares et al., 2022; Gaurisas & Bernardino, 2023).

As variações na disponibilidade de COP exercem influência marcante sobre a biomassa, a composição trófica e os padrões de recrutamento da macrofauna bentônica (Gooday, 2002; Smith et al., 1994). Por exemplo, os altos fluxos de COP tendem a favorecer comunidades oportunistas, com aumento na abundância de crustáceos e poliquetas depositívoros (Jumars & Wheatcroft, 1989; Levin & Dayton, 2009). Ademais, estudos indicam que a perda da biodiversidade bentônica acarreta uma redução significativa no funcionamento dos ecossistemas profundos, incluindo a diminuição das taxas de remineralização do carbono (Danovaro et al., 2008).

Neste sentido, esta dissertação fornece a primeira análise em grande escala da variabilidade espacial e temporal do Rio Amazonas e sua relação com a dispersão do COP ao longo das plataformas continentais Amazônica e das Guianas (Capítulo 1). A partir de 21 anos de dados satelitais (2003–2023) de concentrações de COP ao longo das plataformas, investigou-se os padrões sazonais e interanuais do COP, associando-os à descarga do Rio Amazonas e à eventos climáticos extremos, como El Niño, contribuindo para o entendimento dos mecanismos de transporte e dispersão do carbono orgânico em plataformas tropicais.

Com base nos resultados obtidos no primeiro capítulo sobre as variações espaciais do COP, a abordagem do segundo capítulo visa auxiliar no preenchimento de uma importante lacuna no conhecimento sobre a fauna bentônica da região, especialmente em relação à influência da pluma do Amazonas. A partir dos registros de ocorrência de organismos bentônicos disponíveis no Ocean Biodiversity Information System (OBIS), avaliou-se os padrões espaciais de biodiversidade ao longo das plataformas continentais amazônica e das Guianas, provavelmente com uma maior diversidade de organismos próxima ao estuário, com um declínio progressivo à medida que se aumenta a distância da foz (Capítulo 2).

CAPÍTULO I

Long-term effects of the Amazon River Discharge on Particulated Organic Carbon Distribution in the Amazon coast of Brazil

Araiene Peres Pereira¹, Daniela Yepes Gaurisas¹, Angelo Fraga Bernardino¹

¹ *Grupo de Ecologia Bêntica, Departamento de Oceanografia e Ecologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brazil*

Corresponding Author: Araiene Pereira

Av. Fernando Ferrari, Vitória, Espírito Santo, 29075-910, Brazil

Email address: araiene.peres@gmail.com

Abstract

The Amazon River delivers nutrient-rich waters to the Atlantic ocean supporting a high primary productivity to the Amazon coast of Brazil. The primary productivity in the Amazon coast is known to vary greatly throughout the year, but there is limited information on the seasonal and interannual to decadal variability of particulated organic carbon (POC) in response to the Amazon River outflow. We hypothesised that significant oscillations in the river outflow linked to climate extremes would have a significant effect on the spatial and decadal patterns of POC concentrations in the Amazon shelf. We analyzed 21 years (2003–2023) of POC concentrations in the Amazon and Guiana continental shelves waters using satellite remote sensing and compared with riverine discharge along the coast under the influence of the Amazon River plume (14 polygons of 1 degree of latitude). Our results showed a strong spatial difference in POC concentrations, with higher concentrations between

latitudes 3°N and 6°N, probably due to optimal turbidity and nutrient input from the Amazon. Annual oscillations showed that the Amazon discharge, modulated by dry and rainy periods, significantly controls the variability of POC, especially in the Mouth and Guianan regions. The extreme El Niño event of 2015–2016 reduced the Amazon discharge by 17%, which was associated with a 13% decrease in POC concentrations in the Mouth region. These findings reinforce the importance of river-ocean feedbacks for marine productivity with implications for the global carbon cycle. Considering the current climate extremes and drought that the Amazon River is experiencing, our study suggests a major decrease in marine productivity in response to these large-scale climate events.

Key-words: Particulate Organic Carbon; Amazon River Plume; ENSO; Tropical Continental Shelves.

Introduction

Estuarine ecosystems support a high primary productivity due to the input of continental nutrient-rich waters (Kennish, 1990). Large rivers transport substantial nutrient loads across continents to their estuaries, enhancing primary productivity and organic carbon availability in the ocean (Bouchez et al., 2014). The Amazon, Orinoco, and Congo are the largest global rivers, supplying nutrients to the tropical Atlantic Ocean, which receives approximately 32% of the world's river discharge (Dai & Trenberth, 2002; Araujo et al., 2014). The Amazon River is the largest on Earth, discharging nearly 6.6 billion cubic meters of freshwater into the Atlantic Ocean, equivalent to 17% of the global river-ocean runoff (Gibbs, 1972; Caldeira et al., 2002; Dai et al., 2002). This nutrient-enriched freshwater is not immediately diluted upon reaching the ocean, but spreads as a low-salinity plume that can reach almost 200 km offshore, carried by winds and ocean currents (Araujo et al., 2022). The Amazon River plume extends from 40°W to 60°W and 3°S to 20°N, spanning thousands of kilometers from the river mouth to the western Tropical Atlantic, making it one of the most prominent features of the world's oceans (Del Vecchio & Subramaniam, 2004; Moller et al., 2010; Coles et al., 2013).

The Amazon River has the potential to significantly influence the ocean's biogeochemical cycles by supporting oceanic primary productivity (Subramaniam et al., 2008; Goes et al., 2014; Medeiros et al., 2015). Primary productivity in the Amazon plume

region is known to be highly variable (Smith & Demaster, 1996). Otsuka et al. (2018) reported a primary productivity rate of $0.45 \text{ g C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ during periods of low river discharge, with higher rates near the river mouth, reaching $9 \text{ g C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. The productivity has a marked seasonal oscillation linked to the annual cycle of the river discharge, when productivity increases to the southeast during high-flow and decreases during low-flow (Gouveia et al., 2019). This variability highlights the critical role of the river outflow in supporting estuarine and marine food chains on the Amazon continental shelf (Smith & Demaster, 1996).

The nutrients released by the Amazon River plume support primary productivity, part of which is subsequently converted into particulate organic carbon (POC) through processes like aggregation and the decomposition of primary producers (Ducklow et al., 2001). This POC is exported to the seafloor where it will be available as a food source for organisms (Antoine et al., 1996; Falkowski et al., 1998). The magnitude of POC contributed by the Amazon River, which serves as a proxy for primary productivity (Moschen et al., 2009; White et al., 2017; Briggs et al., 2018), was estimated in 10 Tg per year (Richey et al., 1990). In comparison, the Congo River, the second largest river in the world in terms of discharge and drainage area, contributes around 2 Tg of POC per year (Coynel et al., 2005).

Given the importance of Amazon River discharge for the Atlantic ocean primary productivity and POC export in the ocean, the temporal variability in its flow can have significant biological and climatic impacts (Smith & DeMaster, 1996). However, there is still a need to better understand how primary productivity varies across the plume region and over time, including the influence of seasonal factors and extreme weather events (Carvalho et al., 2023). Recent extreme climatic events lead to intense droughts in the Amazon River basin, which were associated with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO; Richey et al., 1989; Berenguer et al., 2021). Previous research revealed that ENSO is associated with an interannual variability (~ 3 years) in the Amazon River discharge due to low precipitation rates (Richey et al., 1989; Foley et al., 2002; Labat et al., 2005).

In addition to ENSO's influence on the Amazon River discharge, changes in regional precipitation are also linked to an increased import of atmospheric water vapor from the warming tropical Atlantic (Gloor et al., 2013). A progression of drier-than-normal conditions in the region since the 1970's has been associated not only with ENSO, but also with the Pacific Decadal Oscillations (PDO) and Atlantic Multidecadal Oscillations (AMO) (Paredes and Trejo, 2021). However, it is still difficult to establish clear temporal patterns in the

Amazon River discharge oscillations and associated changes in marine productivity. Evidence suggests a predominantly cyclical pattern driven by regional precipitation variability (Marengo, 2009). These findings align with concerns pointed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), which projects an increase in the frequency and severity of droughts in the Amazon Basin due to anthropogenic climate change.

Primary productivity and POC concentrations can be obtained through remote sensing data (Loisel et al., 2002; Ma et al., 2014). Remote sensing of ocean color is a powerful tool for mapping optical properties such as temperature, salinity, POC, and chlorophyll in coastal and oceanic waters. It is widely used to understand the effects of river plumes and oceanography in marine productivity and carbon export into the oceans (Behrenfeld & Falkowski, 1997; Kahru et al., 2009; Pham et al., 2024). In this study, we used 21 years of satellite and *in situ* data (2003-2023) to investigate the influence of Amazon River discharge on seasonal, interannual, and latitudinal variability of POC concentrations along the Amazon and Guiana continental shelves. Given the latitudinal extent of the Amazon River plume (3°S to 20°N; Coles et al., 2013), we hypothesize that POC concentrations are driven by the river plume dynamics, exhibiting higher values in proximity to the river mouth and progressively decreasing in a latitudinal gradient with increasing distance from the source. Furthermore, we expected lower productivity during ENSO periods in response to prolonged and intense droughts. Our results provide critical insights into the links between the Amazon River basin and marine productivity next to the largest river of the planet.

Materials & Methods

Study Area

The study area was defined along the Amazon River plume path across the Guianan and Amazonia ecoregions in the North Brazil Shelf province (Spalding et al., 2007; Baklouti et al., 2007) (Figure 1). Given the wide latitudinal range and an expected decreasing influence of the river plume northward from the Amazon River mouth, the area was divided into fourteen 1-degree latitude polygons starting at 3°S to 2°S latitude (Polygon #1; Figure 1), until 10°N to 11°N latitude (Polygon #14). The areas of each polygon (km²) were calculated using the "Field Calculator" tool in the QGIS software, a free and open-source Geographic Information System developed by the QGIS Development Team (2023). For each polygon, satellite data and descriptive statistics of each variable were extracted.

In situ Data

The Amazon River discharge and precipitation data were obtained from the National Hydrometeorological Network (RHN) database available through the ANA (National Water Agency) website (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) at the ÓBIDOS station (Figure 1). This dataset was used to identify periods of high and low discharge of the Amazon River to the Atlantic Ocean. The Amazon River discharge data was obtained for a period of 21 years (2003-2023) with daily resolution.

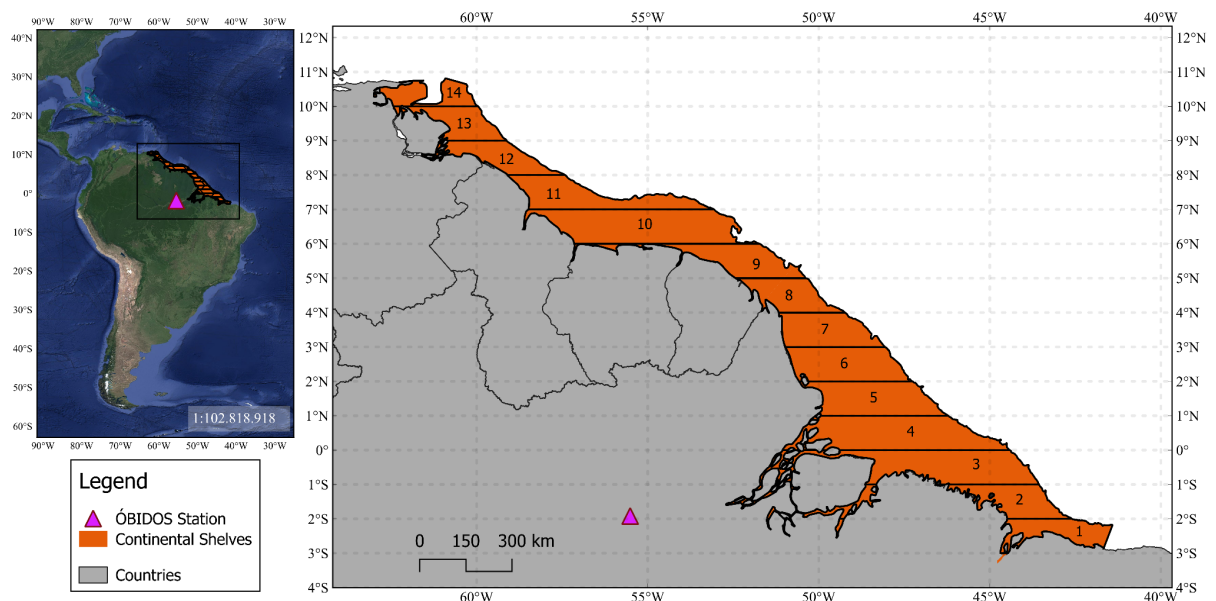


Figure 1. Map of the Amazon River plume indicating the polygons used to understand the latitudinal variability in productivity and POC concentrations.

Satellite Data

Particulate Organic Carbon (POC; mg.m^{-3}) concentrations was obtained through remote sensing products from the MODIS Aqua satellite collections (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; 4km spatial resolution; monthly temporal resolution) for a period of 21 years (2003-2023). The MODIS product calculates POC concentrations using an algorithm produced by Stramski et al. (2022), and available on the EarthData - NASA website (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). This algorithm estimates particulate organic carbon (POC) concentration in mg.m^{-3} based on an empirical relationship derived from in situ measurements and remotely sensed blue-green reflectance ratios (Rrs; Stramski et al., 2008). Although the algorithm performs well in open ocean regions, some studies have been used the Stramski et

al. (2008) algorithm to quantify POC concentrations in plumes and estuaries such as the Amazon (Wang et al., 2011; López et al., 2012; Utsumi et al., 2025).

Processing and Analyses

The satellite data for POC concentrations were processed in the SeaDAS software (9.1.0 version), which uses algorithms developed by the Ocean Biology Processing Group (OBPG) to calibrate and generate high-precision products. The data generated by the SeaDAS software were then loaded and processed in MATLAB (R2020a version) to obtain mean, median, and total POC concentration values for each month between 2003 and 2023. Annual, decadal, seasonal, and wet/dry period averages were calculated for each latitude range (14 polygons).

The POC values are given in mg.m^{-3} , for each pixel in the satellite image, with the respective latitude and longitude values. Thus, the median POC values for each month and polygon were obtained. Median values were used to minimize estimation errors and reduce the influence of extreme values, such as those caused by adjacency effects (Feng & Hu, 2017). To facilitate comparisons and analyses between the latitudes studied, the dissimilarities between latitude polygons were used to create distinct polygon groups through hierarchical agglomerative clustering using “average” linkage method with Euclidean distance, carried out in software R (R-4.3.1 version) by using “cluster” package and visually presented as a dendrogram.

The seasonality of POC concentrations was calculated using the median values from a 21-year composite for each polygon group resulting from the cluster analysis. To analyze periodicity, the months were categorized into the following periods: Dry season was defined as May-October, while the wet season spanned November-April. Annual analysis of POC concentrations were made through time series plots for each polygon group. A monthly variation of POC concentrations were plotted to observe the ways of POC for each polygon group.

The non-parametric Wilcoxon Test was calculated for each clustered polygon group of latitudes to determine possible differences in POC concentrations between decades. Annual differences along time series POC concentrations of each polygon group were calculated by a Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA) test with 999 permutations through R software (version 4.2.3), using the ‘adonis2’ function from ‘vegan’ package. To

identify potential seasonality and trends, and autocorrelation functions (ACF) were computed using the 'stats' package in R software (version 4.2.3), employing the 'stl' function. The Granger Causality Test was also performed to determine whether one time series can predict another. In this case, the river discharge time series was established as the predictor, and the time series of each polygon group was then tested.

Results

River Discharge Time Series

The time series of the Amazon River discharge at the ÓBIDOS station reveals a biannual oscillation pattern, with discharge increasing during the wet period and decreasing during the dry period (Figure 2). This pattern is correlated with local precipitation rates, as determined by Pearson's Correlation Test ($r = 0.27$; $p = 0.038$). The highest discharge values were recorded in 2009, 2021, and 2022, while the lowest values occurred in 2005, 2010, and 2023.

Following the decomposition of the river discharge time series, the seasonal component analysis suggests regular fluctuations that repeat annually with similar patterns and intensity (Figure 2a - seasonal). The moving trend analysis shows marked oscillations, with positive peaks in 2008, 2014, and 2022, and negative peaks in 2006, 2010, and 2016 (Figure 2a - trend), corresponding to the years of ENSO events. Despite this, there were no significant statistical differences between river discharge and El Niño events. Autocorrelation analysis indicates that the discharge of the Amazon River exhibits a seasonal pattern forming a complete cycle at lag=1, in years, indicating an annual cyclical behaviour on Amazon River's discharge (Figure 2b).

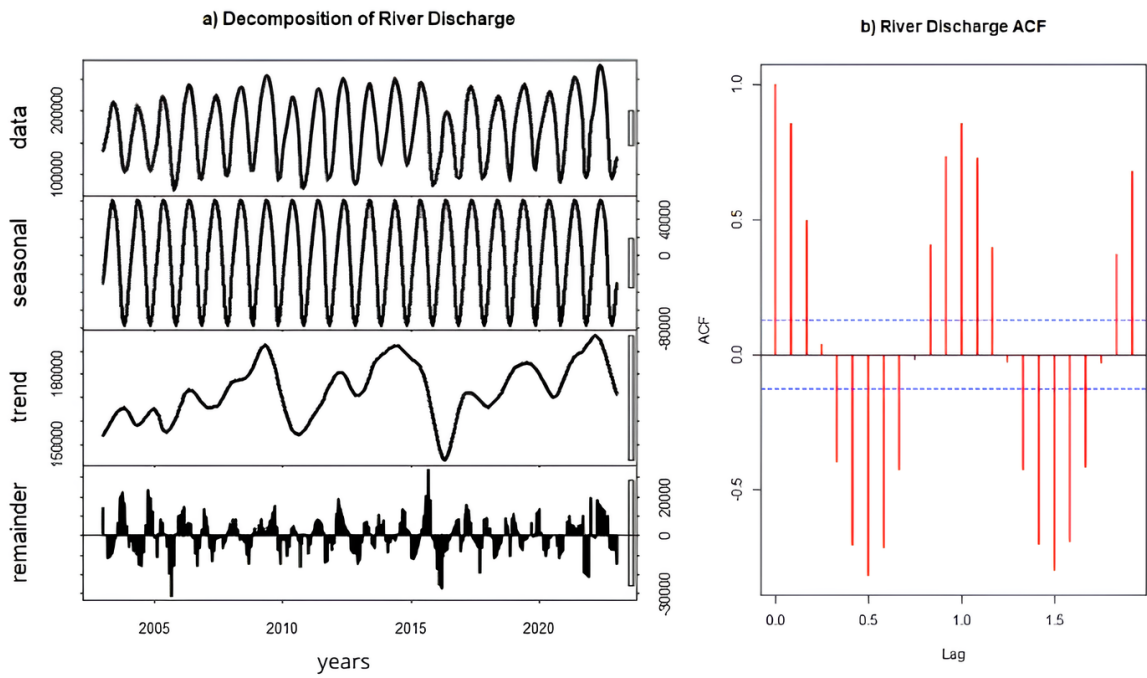


Figure 2. a) Decomposition components from river discharge time series (time series, seasonal component, trend component, residual component). b) Amazon River discharge auto correlogram (autocorrelation (ACF)).

Spatial Distribution of POC

The 21-yr median surface POC concentrations (2003-2023; Figure 3) are linked to the proximity with the river mouth. Latitudes closer to the Amazon River mouth up to 2°N had the lowest POC concentration values, with POC concentrations below 150 mg.m⁻³. The 21-yr POC concentrations were higher between latitudes 3°N and 6°N, with polygon #8 (4°N–5°N) showing the highest POC concentration, reaching almost 700 mg.m⁻³. At latitude 6°N, POC concentrations decline until 8°N (120 ± 34.3 mg.m⁻³), then increase again up to latitude 11°N (371.7 ± 98.5 mg.m⁻³). In general, POC concentrations increase from 1°N to 5°N, decline to 8°N, and then rise again towards higher latitudes.

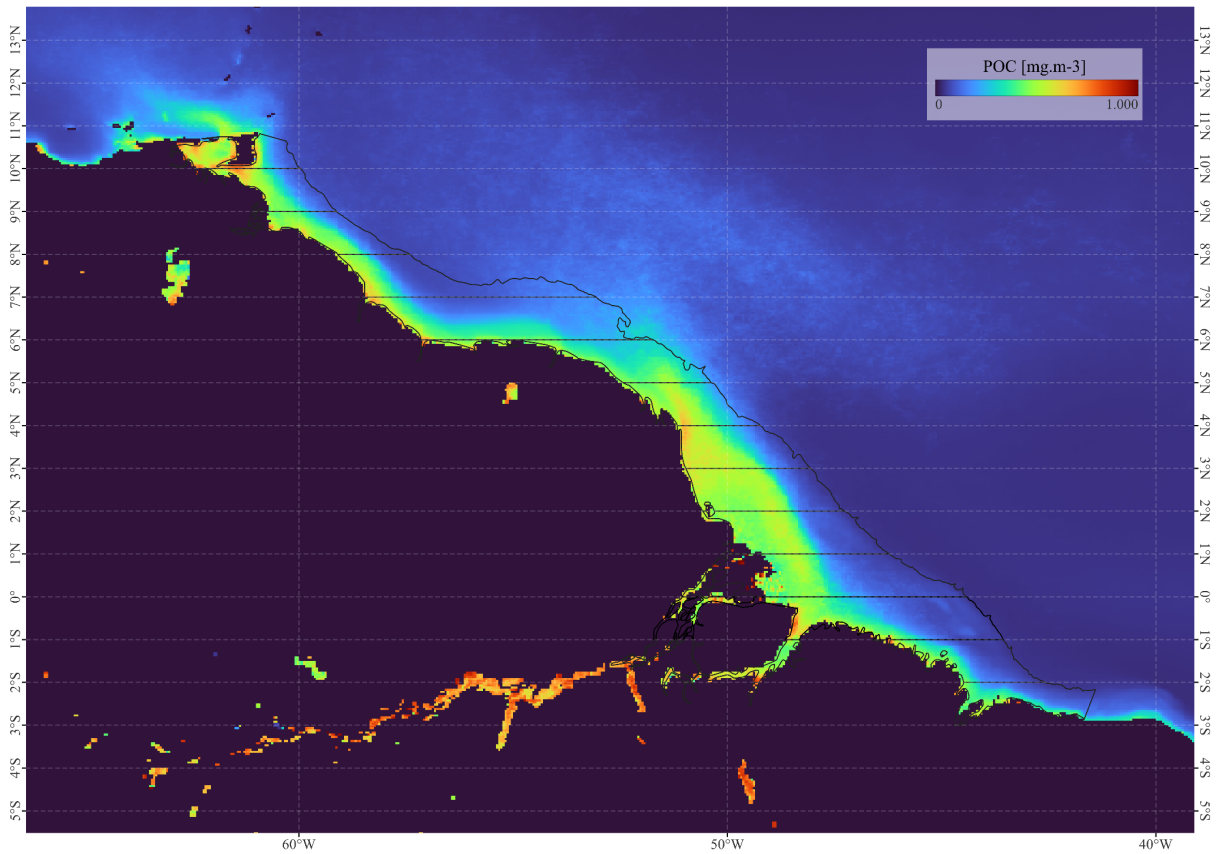


Figure 3. Composite of 21-years median surface POC concentrations averaged (2003-2023) for each polygon.

Cluster analysis identified four polygon groups based on dissimilarities that reinforce the POC spatial distribution (Figure 4). From south to north, the first cluster group was named Mouth (Polygons #1 – #5; Latitudes 3°S– 2°N), and averaged $127 \pm 37.7 \text{ mg.m}^{-3}$ of 21-yr POC concentration. The second, North group (Polygons #6 – #9; Latitudes 2°N–6°N) exhibited $318 \pm 88.9 \text{ mg.m}^{-3}$ of 21-yr mean POC concentration. The Guiana group (Polygons #10 – #11; Latitudes 6°N–8°N) presented $174.8 \pm 42.3 \text{ mg.m}^{-3}$ of 21-year POC concentration. And the fourth, Orinoco group (Polygons #12 – #14; Latitudes 8°N–11°N), presented $270 \pm 85.1 \text{ mg.m}^{-3}$ of 21-year mean POC concentration (Figure 4).

The POC concentrations time series of Guiana and Mouth groups had the highest correlations with river discharge time series ($r = 0.49$; $p = 2.2e^{-16}$; $r = 0.46$; $p = 1.379e^{-14}$, respectively), while North and Orinoco groups presented a weaker correlation ($r = 0.28$; $p = 7.777e^{-6}$; $r = 0.17$; $p < 0.0070$, respectively). All groups demonstrated a causal relationship between river discharge and POC concentrations, with the North and Guianan groups showing notably higher F-statistic values ($F = 47.54$, $p = 2.2e^{-16}$; $F = 43.62$, $p = 2.2e^{-16}$; respectively). Based on the linear regression between river discharge and POC concentrations, the Guianan

and Mouth groups showed higher fitting ($R^2 = 0.24$; $R^2 = 0.21$, respectively, with $p < 0.001$) than North and Orinoco groups ($R^2 = 0.08$; $R^2 = 0.03$, respectively, with $p < 0.001$).

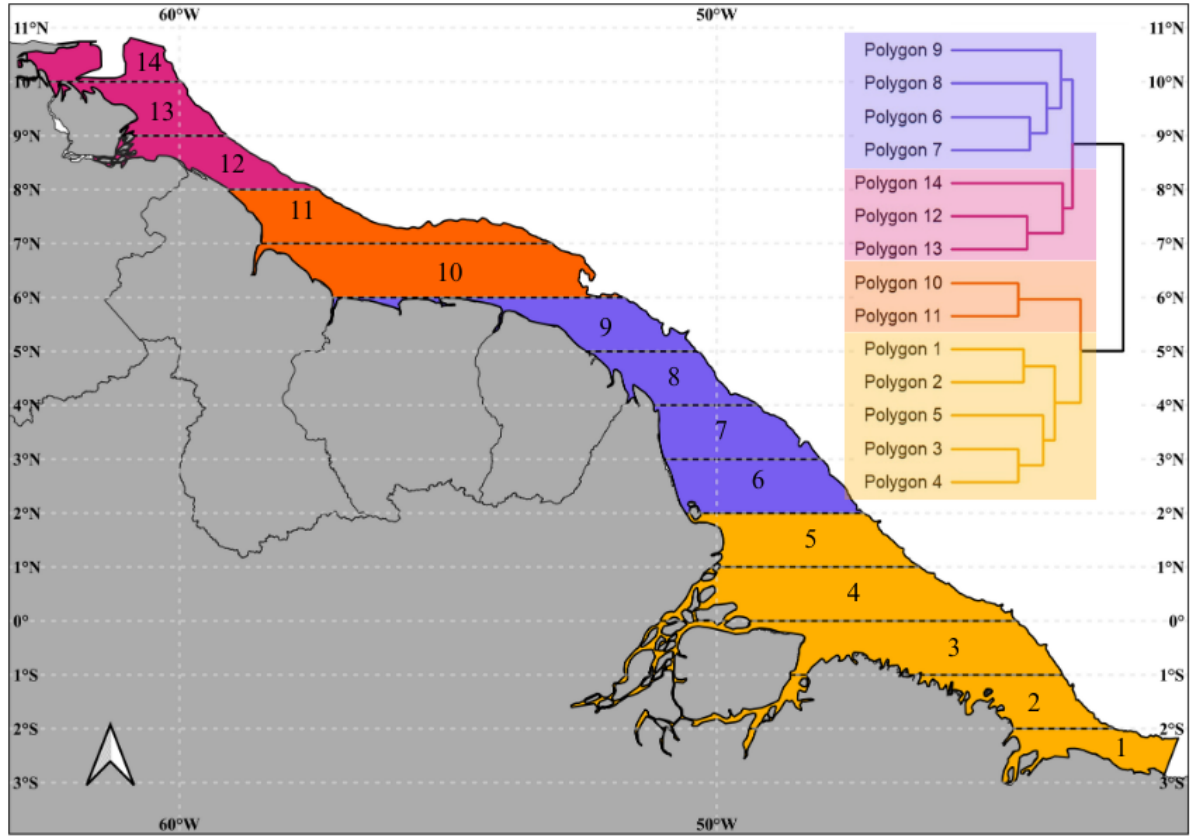


Figure 4. Hierarchical agglomerative clustering of median POC concentrations based on dissimilarities between latitude polygons using “average” linkage. Mouth group (yellow); North group (purple); Guianan group (orange); Orinoco group (pink).

Time series POC Concentrations

The time-series analysis for POC concentrations showed the Mouth group ranging from 73.4 to 375.4 mg.m^{-3} (108.0 ± 54.3) over the 21 years of data (Figure 5a). The North group (Figure 5b) showed POC concentrations ranging from 74.4 to 543.6 mg.m^{-3} (323.2 ± 108.1). The Guianan group presented POC concentrations ranging from 79.6 to 312.8 mg.m^{-3} (174.8 ± 49.5) (Figure 5c). The Orinoco group exhibited POC concentrations ranging from 95.5 to 571.7 mg.m^{-3} (257.0 ± 103.8) (Figure 5d).

The temporal trends in the patterns of POC concentrations across polygon groups showed minimal variations between years. The polygon groups, except the North, showed a

decrease in median POC concentrations between the years 2015, 2016, 2017 and 2023. POC concentrations showed a cyclical behavior, which rise during the first half of the year and decrease during the second half. Additionally, the North and Orinoco groups showed greater variations in POC concentrations over the 21 years, while the Mouth group showed the smallest variation between the groups over the years.

Annual differences along time series of POC concentrations assessed by a PERMANOVA, showed no significant differences between years ($F = 0.9272$; $p = 0.528$). For ENSO events, the PERMANOVA results showed a significant difference in POC concentrations only for the Mouth group ($F = 3.358$; $p = 0.036$), where is possible to notice a ~12% drop in POC concentrations according to a strong intensity El Niño event (2015-2016), compared to the 21-years averaged POC (Figure 6a).

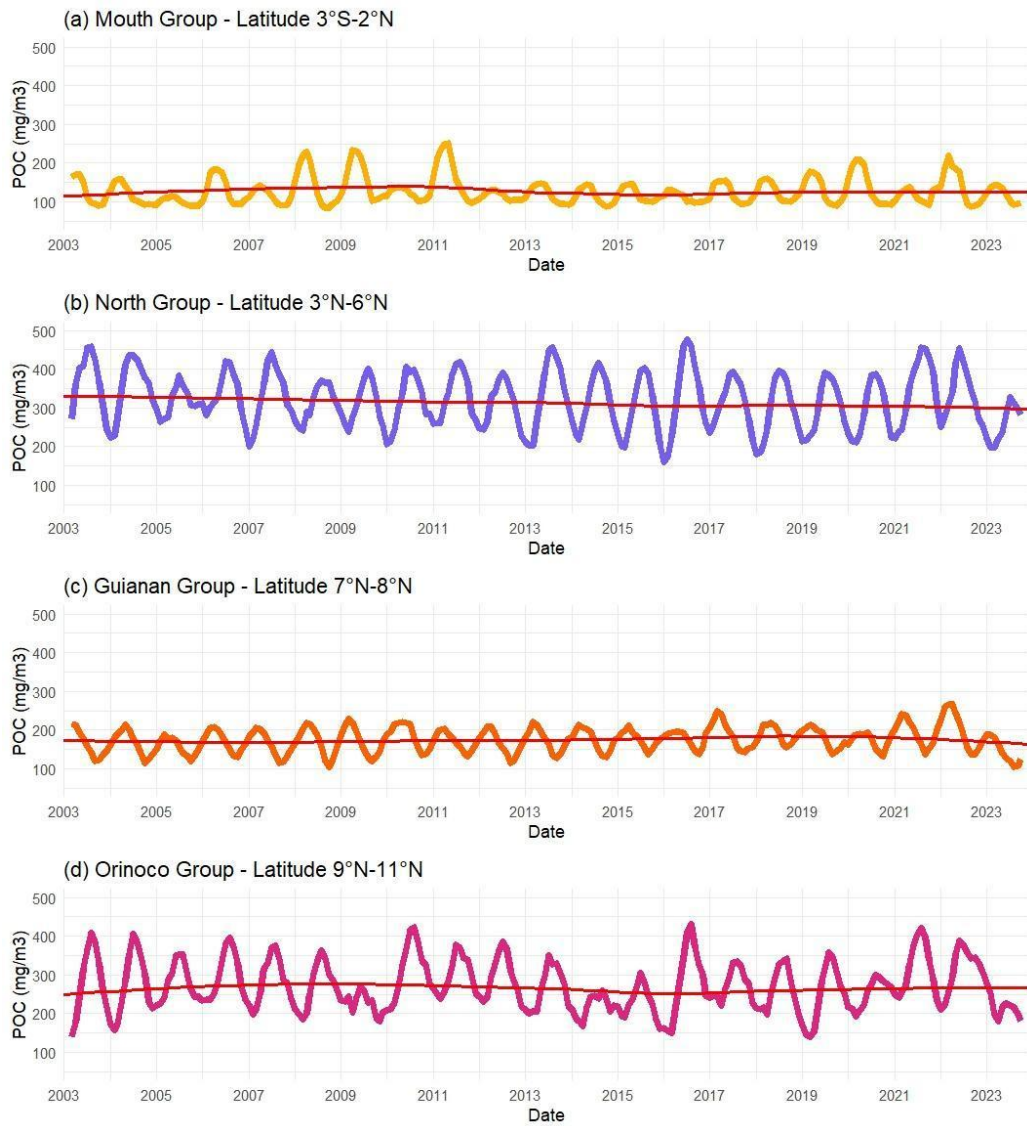


Figure 5. Monthly time series of mean POC concentrations for each polygon group from January/2003 to December/2023. (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; (d) Orinoco group.

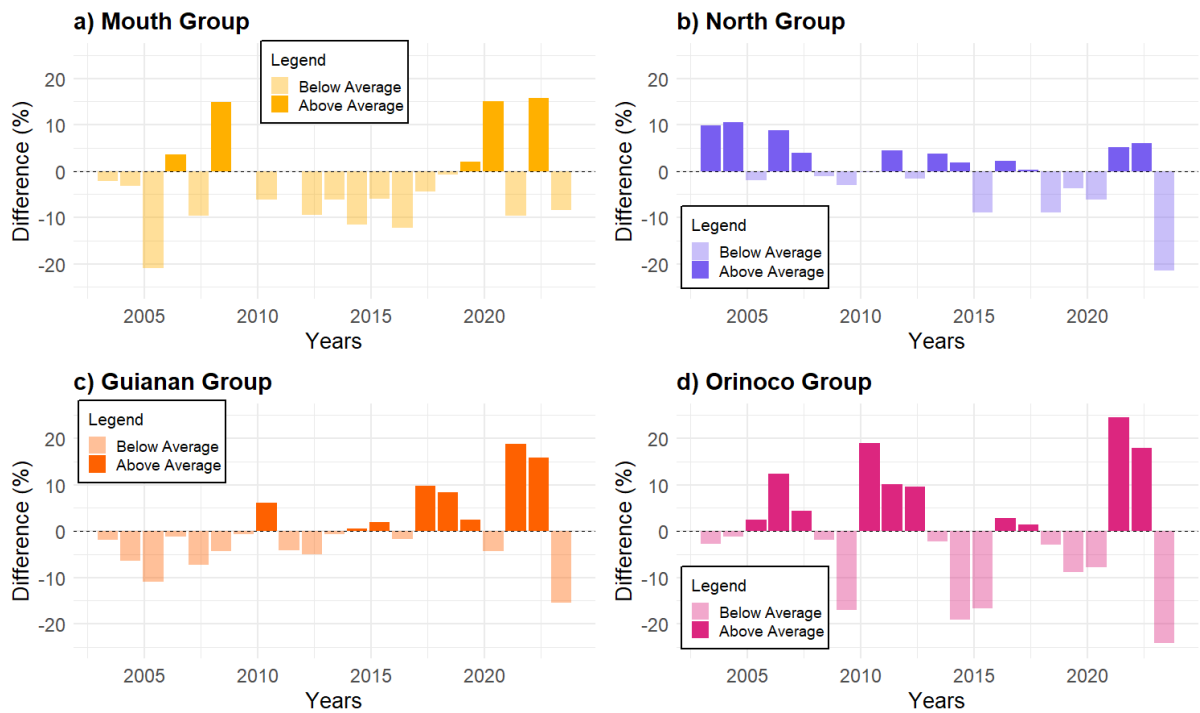


Figure 6. Differences between 21-years average POC concentrations and POC concentration in each year, in percentage, for each polygon group. (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; (d) Orinoco group.

Seasonality

For the Mouth group (3°S-2°N), annual POC concentrations varied from 70 mg.m⁻³ to 200 mg.m⁻³, with predominance of higher POC concentrations during wet periods (Figure 7a). In this group, the highest POC concentrations were observed during the wet period for most of the 21 years, reaching 200 mg.m⁻³ in 2011, after a Moderated Intensity La Niña event. The North group (2°N-6°N) presented annual POC concentrations varying from 150 to 300 mg.m⁻³ for wet period and from 300 to 450 mg.m⁻³ for dry period (Figure 7b). Further north, Guianan group (6°N-8°N) showed a similar behaviour to Mouth group, ranging from 100 to 250 mg.m⁻³, with a tiny predominance between dry and wet periods (Figure 7c). The Orinoco group (8°N-11°N) showed a higher variation in dry periods, ranging from 200 mg.m⁻³ to 400 mg.m⁻³, while wet periods showed a smooth pattern ranging from 150 mg.m⁻³ to almost 300 mg.m⁻³.

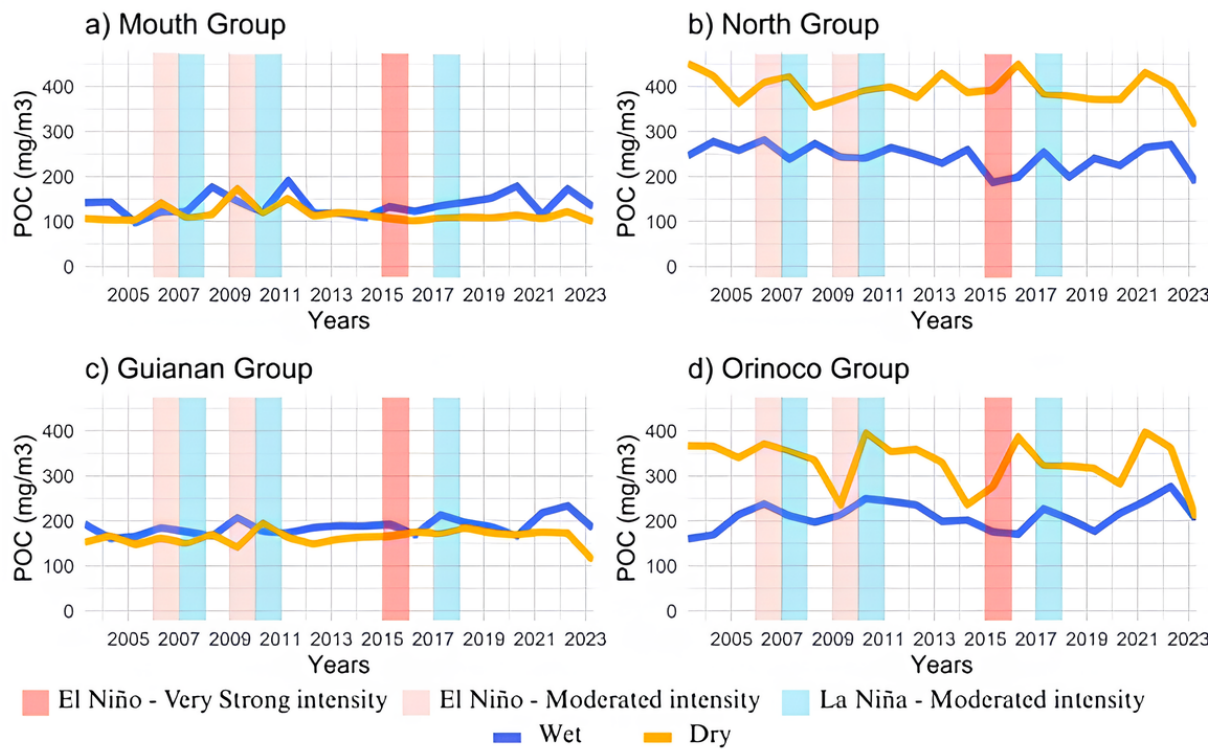


Figure 7. 21-year time series of surface POC concentrations for wet (blue line) and Dry (red line) periods in: (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; and (d) Orinoco group.

The monthly variation in POC concentrations for the Mouth group, shows the highest POC concentrations in April, marking the last month of the wet period. During the middle of the dry period, POC concentrations remain consistently low, before starting to rise again in the middle of the wet period (Figure 8a). In the North group, higher POC concentrations are observed during the dry periods, with a peak in August. Additionally, lower concentrations are noted throughout the almost entire wet period (Figure 8b). Greater variation in POC concentrations between months was observed in the Guianan group with the lowest values in October, at the end of the dry period. In contrast, in wet periods, POC concentrations vary with higher values (peaking in May) and begin to decay from the beginning of dry period (Figure 8c). The Orinoco group showed the highest POC concentrations in July, in the middle of the dry period. The wet period showed lower values, which began to rise at the start of the dry period (Figure 8d). In general, the North and Orinoco groups exhibited peaks in POC concentrations during the dry periods, while the Mouth and Guianan groups showed peaks in the transition between wet and dry periods. A 21-year monthly composite revealed distinct

POC concentrations, especially during the wet and dry periods (Figure S1). All the months showed a significant difference in POC concentrations (PERMANOVA $F = 36.74$; $p < 2e^{-16}$).

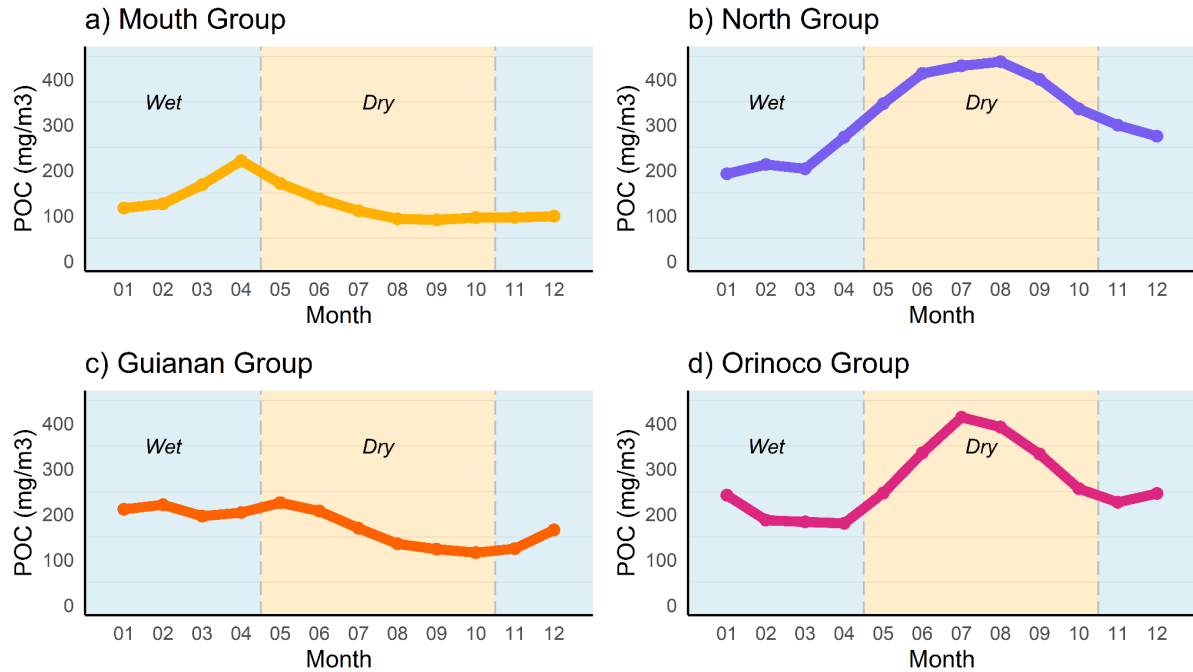


Figure 8. 21-year median variation of surface POC concentrations for each month in: (a) Mouth group; (b) North group; (c) Guianan group; and Orinoco group.

Discussion

The analysis of the Amazon River discharge at the Óbidos station highlights a well-defined seasonal hydrological regime, with a biannual oscillation characterized by increased discharge during the rainy season and reduced discharge during the dry season. This pattern is consistent with the precipitation-driven dynamics of large tropical river systems and is aligned with previous studies documenting the strong sensitivity of the Amazon to regional precipitation variability (e.g., Marengo et al., 2011; Marengo et al., 2016). The moderate but statistically significant correlation between river discharge and local precipitation ($r = 0.27$, $p = 0.038$) supports the role of precipitation as the main determining factor (Moura et al., 2019), although it also suggests the influence of additional hydrological or climatic factors, such as groundwater contributions, evapotranspiration variability, and large-scale climate anomalies like ENSO (Marengo et al., 2016).

Although we obtained non-significant statistical results, the highest/lowest peak flow values coincide with data from La Niña/El Niño events, typically associated with hydrological rains/droughts in the Amazon. This pattern highlights the significant impact of ENSO variability on interannual flow anomalies (Espinoza et al., 2011; Marengo et al., 2016).

Seasonal decomposition of the river time series reinforces the presence of a regular and predictable intraannual cycle, indicative of the Amazon River's response to seasonal climatic forcing. The smallest interannual variation in Mouth group suggests more stable environmental conditions, likely dominated by the persistent influence of the Amazon River plume and relatively consistent seasonal productivity (Coles et al., 2013). The seasonal component showed a stable periodicity, while the trend component revealed multiannual fluctuations that align with known ENSO phases, including negative anomalies during El Niño years (e.g., 2005, 2010, 2016) and positive anomalies during La Niña or neutral years (e.g., 2008, 2022). These results support that, in addition to the seasonal cycle, the Amazon flow also presents low-frequency variability modulated by large-scale ocean-atmosphere interactions (Foley et al., 2002).

The differences in POC concentrations between groups can be explained by the oceanic circulation of the region. The North Brazil Current (NBC) is a surface current that acts on the estuary region, pushing the equatorial waters in a northwesterly direction (Stramma et al., 2003). In this sense, much of the freshwater discharged into the ocean by the Amazon estuary is carried northward by the NBC, reducing the POC values below the Amazon River mouth. The freshwater then flows northwestward to the latitude of 7°N, where the NBC retroflexion occurs. Further north, the Guiana Current takes over, pushing waters northwestward across the continental shelf (Lumpkin & Garzoli, 2005). After 9°N, POC concentrations are more associated with the outflow of the Orinoco River, which is the fourth largest river in terms of discharge, and flows through its delta at latitudes of 9°N and 10°N, carrying its waters by Guiana Current mainly to the Gulf of Paria, located between 10°N and 11°N on the continental shelf (López et al., 2012).

The higher dependency on river discharge, from Mouth and Guiana groups, to achieve higher POC values, is probably due to the local circulation that disfavors the supply of continental water in these regions. The less correlation between North group and river discharge may be explained by the favoring of the NBC circulation that carries fresh water to

the region between 3°N and 6°N throughout the year, even in periods of low discharge. Also, the weaker correlation between Orinoco group and Amazon river discharge is probably due to its distance from the mouth, added to the local coastal dynamics being much more associated with the outflow of the Orinoco River, carried north by the Guiana Current (López et al., 2012).

The notable decline in river discharge trend line and POC concentrations of the Mouth and Orinoco groups, between 2015 and 2017, may be related to the ENSO events of "very strong" intensity (2016) and "moderate" intensity (2006 and 2010), according to the National Institute for Space Research (INPE). These events are associated with reduced precipitation in the Amazon basin, leading to decreased river inputs (Richey et al., 1989), a dynamic that aligns with extreme drought scenarios predicted in the literature (Marengo et al., 2016; Ometto et al., 2022; Gedney et al., 2024).

The 2015–2016 El Niño was one of the strongest extreme events in history (Varotsos et al., 2016; Kreppel et al., 2019; Tensubam et al., 2024) measured through indicators such as the Oceanic Niño Index (ONI) and Southern Oscillation Index (SOI). The decline in POC may reflect reduced fluvial inputs due to drought conditions in the Amazon and Orinoco basins, as well as changes in phytoplankton dynamics associated with anomalous sea surface temperatures (Brunskill, 2010; Moura et al., 2019; Gévaudan et al., 2022). Although the lowest discharge of the Amazon River was not found during the strongest El Niño period studied (2015-2016), we were able to find the lowest maximum discharge of the entire period (198417.9 m³/s), reflecting a 13% drop in POC concentration for the Mouth group compared to its 21-year average.

It is also noteworthy that most studies on organic carbon in the Amazon River estuary do not present long time series of data, relying mainly on data collected in situ over one or two years. However, 19 years (2003-2021) of NASA's satellite data were used to determine POC concentrations in the northeastern continental shelf region of the Gulf of Mexico, emphasizing a strong and positive correlation between POC and Chl-a related to the primary productivity of the region (Ahmad & Jhara, 2025). But it's known that using satellite ocean color data may not fully capture the complexities of turbid coastal waters, especially on a short temporal scale, thereby affecting the POC distribution (Ahmad & Jhara, 2025). So we suggest an investment in making in situ data available for the calibration and validation of

increasingly accurate and precise models, in addition to advancing research and knowledge about the Amazon region and its effects on the ecosystem.

Conclusions

This study carried the first 21-years analysis of the POC concentrations across the North Brazil Shelf province, highlighting the significant links to the Amazon River discharge. The analysis of the Amazon River discharge time series and its relations with seasonal and interannual events, especially those associated with ENSO, highlighted the presence of a well-defined cyclical pattern, and, simultaneously, the sensitivity of the Amazon system to large-scale climate change.

The spatial distribution of POC concentrations across different regions of the continental shelves is strongly modulated by regional ocean circulation, particularly by the influence of the North Brazil Current (NBC) and its retroflection, as well as by freshwater inputs from major river systems in the region, such as the Amazon and Orinoco. Seasonal variations further emphasize the role of environmental factors such as precipitation, a main force to control Amazon River discharge, in modulating POC dynamics. Annual oscillations in POC concentrations revealed the role of the Amazon River discharge and its variability including ENSO events in modulating POC dynamics. Furthermore, the notable declines in POC concentration and river discharge during El Niño events reinforce the effect of extreme weather events on primary productivity and carbon cycles in the region.

These results reinforce the important river to ocean feedbacks to marine productivity and to a comprehensive understanding of the carbon cycle in the World's oceans. We suggest that future studies integrating in situ observations with satellite data and modeling techniques should be conducted to better capture the complexities of POC dynamics, particularly in regions influenced by large-scale climate events that would lead to large-scale impacts.

References

Ahmad, H., Jhara, S.I. (2025). Mapping the Dynamics of Particulate Organic Carbon: Satellite Observations of Coastal to Shelf Variability in the Northeastern Gulf of Mexico. *Ocean Sci. J.* 60, 7. <https://doi.org/10.1007/s12601-024-00203-9>.

Antoine, D., André, J., Morel, A. (1996). Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll. *Global Biogeochem. Cycles*, 10(1), 57–69, doi:10.1029/95GB02832.

Araujo, G., Rocha, L., Lastrucci, N., Luiz, O., Di Dario, F., Floeter, S. (2022). The Amazon-Orinoco Barrier as a driver of reef-fish speciation in the Western Atlantic through time. *Journal of Biogeography*, 49, 1407–1419. <https://doi.org/10.1111/jbi.14398>.

Araujo, M., Noriega, C., Lefèvre, N. (2014). Nutrients and carbon fluxes in the estuaries of major rivers flowing into the tropical Atlantic. *Front. Mar. Sci.* 1:10. doi: 10.3389/fmars.2014.00010.

Baklouti, M., J.-L. Devenon, A. Bourret, J.-M. Froidefond, J.-F. TERNON, and J.-L. Fuda. (2007). New insights in the French Guiana continental shelf circulation and its relation to the North Brazil Current retroflexion, *J. Geophys. Res.*, 112, C02023, <https://doi.org/10.1029/2006JC003520>.

Berenguer, E., Lennox, G.D., Ferreira, J., Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Barreto, J.R., Del Bon Espírito-Santo, F., Figueiredo, A.E.S., França, F., Gardner, T.A., Joly, C.A., Palmeira, A.F., Quesada, C.A., Rossi, L.C., de Seixas, M.M.M., Smith, C.C., Withey, K., Barlow, J. (2021). Tracking the impacts of El Niño drought and fire in human-modified Amazonian forests, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118 (30) e2019377118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2019377118>.

Bouchez, J., Galy, V., Hilton, R., Gaillardet, J., Moreira-Turcq, P., Pérez, M., France-Lanord, C., Maurice, L. (2014). Source, transport and fluxes of Amazon River particulate organic carbon: Insights from river sediment depth-profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 133, 280-298, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.032>.

Briggs, N., Guðmundsson, K., Cetinić, I., D'Asaro, E., Rehm, E., Lee, C., and Perry, M. J. (2018). A multi-method autonomous assessment of primary productivity and export efficiency in the springtime North Atlantic. *Biogeosciences*, 15, 4515–4532, <https://doi.org/10.5194/bg-15-4515-2018>.

Brunskill, G. (2010). Tropical Margins. In: Liu, K.K., Atkinson, L., Quiñones, R., Talaue-McManus, L. (eds) *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins*. Global

Change – The IGBP Series. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-92735-8_8.

Callede, J., Guyot, J. L., Ronchail, J., Molinier, M., and De Oliveira, E. (2002). The River Amazon at Obidos (Brazil): Statistical studies of the discharges and water balance. *Hydrol. Sci. J.*, v 47, 321–333pp.

Carvalho, R., Resende, A., Barlow, J., França, F., Moura, M., Maciel, R., Alves-Martins, F., Shutt, J., Nunes, C., et al. (2023). Pervasive gaps in Amazonian ecological research. *Current Biology*. Elsevier. 33. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.07.046>.

Coles, V. J., Brooks, M. T., Hopkins, J., Stukel, M. R., Yager, P. L., & Hood, R. R. (2013). The pathways and properties of the Amazon River plume in the tropical North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 6894–6913. <https://doi.org/10.1002/2013JC008981>.

Coyne, A., Seyler, P., Etcheber, H., Meybeck, M., Orange, D. (2005). Spatial and seasonal dynamics of total suspended sediment and organic carbon species in the Congo River. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB4019, doi:10.1029/2004GB002335.

Dai, A., & Trenberth, K. E. (2002). Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations. *Journal of Hydrometeorology*, 3(6), 660–687. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003%3C0660:EOFDFC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003%3C0660:EOFDFC%3E2.0.CO;2).

Del Vecchio, R. D., & Subramaniam, A. (2004). Influence of the Amazon River on the surface optical properties of the western tropical North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 109, C11001. <https://doi.org/10.1029/2004JC002503>.

Ducklow, H.W., D.K. Steinberg, and K.O. Buesseler. (2001). Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography* 14(4):50–58, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.06>.

Espinoza, J. C., J. Ronchail, J. L. Guyot, C. Junquas, P. Vauchel, W. Lavado, G. Drapeau, and R. Pombosa (2011), Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406, doi:10.1029/2011GL047862.

Falkowski, P., Barber, R., Smetacek, V. (1998). Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production. *Science*, 281,200-206.DOI:10.1126/science.281.5374.200.

Feng, L., Hu, C. (2017). Land adjacency effects on MODIS Aqua top-of-atmosphere radiance in the shortwave infrared: Statistical assessment and correction, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 4802–4818, doi:10.1002/2017JC012874.

Foley, J., Botta, A., Coe, M., Costa, M. (2002). El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1132, doi:10.1029/2002GB001872.

Gedney N, Rudorff C, Betts RA. (2024). Future amazon basin wetland hydrology under projected climate change. *PLOS Water* 3(9):e0000225. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000225>.

Gévaudan, M., Durand, F., & Jouanno, J. (2022). Influence of the Amazon-Orinoco discharge interannual variability on the western tropical Atlantic salinity and temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127. <https://doi.org/10.1029/2022JC018495>.

Gibbs, R. (1972). Water chemistry of the Amazon River. *Geochim. Cosmochim. Acta* 36, 1061-1066pp. doi: 10.1016/0016-7037(72)90021-X.

Gloor, M., Brien, R., Galbraith, D., Feldpausch, T., Schöngart, J., Guyot, J., Espinoza, J., Lloyd, J. Phillips, O. (2013). Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1729–1733, doi:10.1002/grl.50377.

Goes, J. I., Gomes, H. do R. G., Haugen, E. M., McKee, K. T., D'Sa, E. J., Chekalyuk, A. M., et al. (2014). Fluorescence, pigment and microscopic characterization of Bering Sea phytoplankton community structure and photosynthetic competency in the presence of a Cold Pool during summer. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Volume 109, 84-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.12.004>.

Gouveia, N., Gherardi, D., Aragão, L. (2019). The role of the Amazon River plume on the intensification of the hydrological cycle. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 12221-12229. <https://doi.org/10.1029/2019GL084302>.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kahru, M.; Kudela, R.; Manzano-Sarabia, M.; Mitchell, B. G. (2009). Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of geophysical research: oceans*, v. 114, n. 2, p. 1–7, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JC004979>.

Kennish, M. J. (1990). *Ecology of estuaries: biological aspects*. Volume II.

Kreppel K, Caminade C, Govella N, Morse AP, Ferguson HM, Baylis M. (2019). Impact of ENSO 2016–17 on regional climate and malaria vectordynamics in Tanzania. *Environ. Res. Lett.* 14, 075009. doi:10.1088/1748-9326/ab26c7.

Labat, D, Ronchail, J., Guyot, J. (2005). Recent advances in wavelet analyses: Part 2-Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology*, 314, 289-311, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.004>.

Loisel, H., J.-M. Nicolas, P.-Y. Deschamps, and R. Frouin. (2002). Seasonal and inter-annual variability of particulate organic matter in the global ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2196, doi:10.1029/2002GL015948.

López, R., C. E. Del Castillo, R. L. Miller, J. Salisbury, and D. Wisser (2012), Examining organic carbon transport by the Orinoco River using SeaWiFS imagery, *J. Geophys. Res.*, 117, G03022, doi:10.1029/2012JG001986.

Lumpkin, R., and Garzoli, S. L. (2005). Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Volume 52, 495-518. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.09.001>.

Ma, S., Tao, Z., Yang, X., Yu, Y., Zhou, X., Ma, W., et al. (2014). Estimation of Marine Primary Productivity From Satellite-Derived Phytoplankton Absorption Data. In *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, pp. 3084-3092. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2298863>.

Marengo, J.A. (2009). Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrol. Process.*, 23: 3236-3244. <https://doi.org/10.1002/hyp.7396>.

Marengo, J. A., Nobre, C. A., Sampaio, G., Salazar, L. F., & Borma, L. S. (2011). Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. In *Tropical rainforest responses to climatic change* (pp. 259-283). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Marengo, J.A., Williams, E.R., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A. (2016). Extreme Seasonal Climate Variations in the Amazon Basin: Droughts and Floods. In: Nagy, L., Forsberg, B., Artaxo, P. (eds) *Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin*. Ecological Studies, vol 227. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_4.

Medeiros, P. M., Seidel, M., Ward, N. D., Carpenter, E. J., Gomes, H. R., Niggemann, J., et al. (2015). Fate of the Amazon River dissolved organic matter in the tropical Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 29, 677–690. <https://doi.org/10.1002/2015GB005115>.

Moura, M., Santos, A., Pezzopane, J., Alexandre, R., da Silva, S., Pimentel, S., Andrade, M., Silva, F., et al. (2019). Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of The Total Environment*, 651, 1639-1651, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>.

NASA Ocean Biology Processing Group. (2019). Ancillary Data Sources. Retrieved from <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/ancillary/>.

Ometto, J.P., K. Kalaba, G.Z. Anshari, N. Chacón, A. Farrell, S.A. Halim, H. Neufeldt, and R. Sukumar. (2022). Cross-Chapter Paper 7: Tropical Forests. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2369–2410, doi:10.1017/9781009325844.024.

Otsuka, A., Feitosa, F., Araújo, M., Veleda, D., Cunha, M., Lefèvre, N., Gaspar, F., Montes, M., Borges, G., Noriega, C. (2018). Dynamics of Primary Productivity and

Oceanographic Parameters under Influence of the Amazon River Plume. *Open Journal of Ecology*, 8, 590-606. doi: 10.4236/oje.2018.811035.

Paredes-Trejo, F., Barbosa, H. A., Giovannettone, J., Lakshmi Kumar, T. V., Thakur, M. K., & de Oliveira Buriti, C. (2021). Long-Term Spatiotemporal Variation of Droughts in the Amazon River Basin. *Water*, 13(3), 351. <https://doi.org/10.3390/w13030351>.

Pham, A. H., Choisnard, N., Carrera, A. F., Subramaniam, A., Strobe, E. K., et al. (2024). Planktonic habitats in the Amazon Plume region of the Western Tropical North Atlantic. *Frontier Marine Science*, Volume 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1287497>.

QGIS Development Team, <2023>. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing version: R-4.3.1 . R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>.

Richey, J., Hedges, J., Devol, H., Quay, D., Victoria, R., Martinelli, L., Forsberg, B. (1990). Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, 35, doi: 10.4319/lo.1990.35.2.0352.

Richey, J., Nobre, C., Deser, C. (1989). Amazon River Discharge and Climate Variability: 1903 to 1985. *Science*, 246, 101-103. DOI: 10.1126/science.246.4926.101.

Smith, W. O. Jr., & DeMaster, D. J. (1996). Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: Correlation with seasonal river discharge. *Continental Shelf Research*, 6, 227–244. [http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343\(95\)00007-N](http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343(95)00007-N).

Spalding, M. D., Fox, H. E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdeña, Z. A., Finlayson, M. A. X., et al... (2007). Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 57(7), 573-583. <https://doi.org/10.1641/B570707>.

Stramma, L., Fischer, J., Brandt, P., Schott, F. (2003). Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic, *Elsevier Oceanography Series*, Volume 68, 1-22, [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(03\)80141-1](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(03)80141-1).

Stramski, D., Joshi, I. & Reynolds, R. (2022). Ocean color algorithms to estimate the concentration of particulate organic carbon in surface waters of the global ocean in support of

a long-term data record from multiple satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112776. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112776>.

Stramski, D., Reynolds, R. A., Babin, M., Kaczmarek, S., Lewis, M. R., Röttgers, R., Sciandra, A., Stramska, M., Twardowski, M. S., Franz, B. A., Claustre, H. (2008). Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans. *Biogeosciences*, 5(1), 171-201. doi:10.5194/bg-5-171-2008

Subramaniam, A., Yager, P. L., Carpenter, E. J., Mahaffey, C., Bjorkman, K., Cooley, S., et al. (2008). Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 10,460–10,465. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710279105>.

Tensubam, C., Babanin, A., Dash, M. (2024). Fingerprints of El Niño Southern Oscillation on global and regional oceanic chlorophyll-a timeseries (1997–2022), *Science of The Total Environment*, 955, 176893, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176893>.

The MathWorks Inc. (2020). MATLAB version: 9.8.0 (R2020a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>.

Utsumi, G. S., He, D., Berelson, W. M., Castelao, R. M., Yager, P. L., & Medeiros, P. M. (2025). Influence of the Amazon River on the composition of particulate organic carbon in the western tropical Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 389, 84-99. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.09.011>.

Varotsos, C. A., Tzanis, C. G., and Sarlis, N. V. (2016). On the progress of the 2015–2016 El Niño event, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 2007–2011, <https://doi.org/10.5194/acp-16-2007-2016>.

Wang, G., Zhou, W., Cao, W., Yin, J., Yang, Y., Sun, Z., Zhang, Y., Zhao, J. (2011). Variation of particulate organic carbon and its relationship with bio-optical properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary, *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1939-1947, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.07.003>.

White, A. E., B. Barone, R. M. Letelier, and D. M. Karl. (2017). Productivity diagnosed from the diel cycle of particulate carbon in the North Pacific Subtropical Gyre. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3752–3760, doi:10.1002/2016GL071607.

CAPÍTULO II

Efeitos da Pluma do Rio Amazonas nos Padrões de Distribuição de Invertebrados Bentônicos em Plataformas Continentais Tropicais

Araiene Peres Pereira¹, Daniela Yepes Gaurisas¹, Angelo Fraga Bernardino¹

¹ *Departamento de Oceanografia e Ecologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brazil*

Autor de Correspondência: Araiene Pereira¹

Av. Fernando Ferrari, Vitória, Espírito Santo, 29075-910, Brazil

Email: araiene.peres@gmail.com

Resumo

A plataforma continental Amazônica é fortemente influenciada pela pluma do Rio Amazonas, cuja descarga de nutrientes e carbono orgânico particulado (COP) molda gradientes físicos e biológicos ao longo da região. O COP atua como fonte energética essencial para a fauna bentônica, influenciando sua composição e distribuição. No entanto, a biodiversidade bentônica dessa plataforma ainda é pouco conhecida. Este estudo investiga a influência da variabilidade espacial do COP na distribuição de invertebrados bentônicos ao longo da província da Plataforma Norte do Brasil, divididas em quatro regiões latitudinais. Foram utilizados dados de ocorrências de organismos bentônicos disponibilizados online, e imagens MODIS Aqua (2003–2023) para estimar concentrações medianas de COP. Os 4.541 registros de ocorrência se distribuíram em 12 filos, com predominância de Arthropoda,

Cnidaria e Echinodermata. A maior riqueza taxonômica foi observada na região da Boca, influenciada diretamente pela pluma do Rio Amazonas. Análises de agrupamento e SIMPER revelaram padrões espaciais distintos, com forte separação entre Boca e Norte, e maior similaridade entre Guiana e Orinoco. A ANOVA indicou diferenças significativas de COP entre os filós, destacando o papel do COP na estrutura das comunidades. Espécies como *Xiphopenaeus kroyeri*, *Penaeus subtilis* e *P. aztecus* estiveram associadas a altos níveis de COP, enquanto corais como *Meandrina brasiliensis*, *Madracis pharensis* e *Premocyathus cornuformis* foram associados a áreas de baixa turbidez e menor aporte de COP. A diversidade e composição bentônica observadas na plataforma amazônica refletem a forte influência de processos fluviais e gradientes ambientais modulados pela pluma do Rio Amazonas. A heterogeneidade espacial observada, especialmente entre a região da Boca e as demais, evidencia como a variabilidade hidrodinâmica e o aporte de COP criam barreiras ecológicas e favorecem assembleias distintas. Esses resultados reforçam a plataforma amazônica como um importante ecossistema para a biodiversidade marinha, cuja estrutura bentônica é moldada por gradientes ambientais complexos e influências fluviais de larga escala. Compreender esses padrões é essencial para subsidiar estratégias de conservação e monitoramento frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Invertebrados Bentônicos; Plataforma Continental Tropical; Carbono Orgânico Particulado; Pluma Amazônica; OBIS.

Introdução

A plataforma continental amazônica é caracterizada por um ambiente altamente hidrodinâmico, controlado pela interação dos ventos alísios, ondas, correntes, marés e a descarga de água doce do Rio Amazonas (Nittrouer et al., 1995; Geyer et al., 1996). Variações sazonais na vazão do Rio Amazonas controlam a distribuição espacial e temporal de sua pluma, além de modular a disponibilidade de luz e nutrientes que influenciam diretamente os organismos bentônicos adjacentes à sua foz (DeMaster et al., 1996; Omachi et al., 2019; Nittrouer et al., 2021).

O Rio Amazonas é o maior rio do mundo, responsável por cerca de 17% da descarga global de água doce para o oceano (Callede et al., 2002), servindo como uma importante conexão entre o continente e o Oceano Atlântico tropical (Coles et al., 2013). A grande

quantidade de matéria orgânica e sedimentos transportados pelo Rio Amazonas tem forte influência na composição e estrutura das comunidades biológicas de sua plataforma continental (Dagg et al., 2004; Medeiros et al., 2015). A descarga da água doce do Rio Amazonas ao oceano forma uma pluma de baixa salinidade, que se estende até aproximadamente 10°N, alterando significativamente as características físicas e químicas da coluna d'água e dos sedimentos (Aller & Blair, 2006).

A pluma exerce forte controle sobre os fluxos biogeoquímicos da região, estendendo-se também aos fluxos de carbono, que nesta área são superiores aos observados em outras regiões oceânicas, como o Atlântico equatorial oriental, o Atlântico Sul e o Oceano Antártico (Chong et al., 2014). A produção de carbono orgânico particulado (COP), via fotossíntese, representa uma das principais rotas para a remoção de carbono da superfície oceânica, sendo posteriormente exportado para camadas mais profundas (Volk & Hoffert, 1985; Ducklow et al., 2001). Ao atingir o fundo marinho, o COP passa a sustentar as comunidades bentônicas e a influenciar a ciclagem de nutrientes (Stramska et al., 2003; Evers-King et al., 2017).

O COP atua como uma fonte energética essencial para a macrofauna bentônica, influenciando diretamente sua composição, diversidade e distribuição espacial (Danovaro et al., 1999; Levin et al., 2001). Estudos indicam que áreas com maior deposição de COP tendem a apresentar maior biomassa bentônica (Pearson & Rosenberg, 1978; Cosson et al., 1997). E ainda, o aumento da profundidade e da distância das zonas costeiras provoca declínio na concentração de COP, devido à redução no aporte de nutrientes (Rex et al., 2006).

Os organismos bentônicos desempenham um papel crucial na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas aquáticos, contribuindo para processos ecológicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, a remineralização e decomposição da matéria orgânica e processos de transferência de carbono da superfície para os sedimentos (Gray & Elliott, 2009). A bioturbação por organismos bentônicos aumenta a heterogeneidade do habitat e a reciclagem da matéria orgânica ao irrigar e misturar o COP com sedimentos mais profundos (Levin et al., 1997; Nugteren et al., 2009).

A fauna bentônica da região amazônica é altamente sensível às condições ambientais e à disponibilidade de recursos (Aller & Stupakoff, 1996; Lana et al., 1996; Montagna et al., 2017). Essa região é caracterizada por intensos aportes de matéria orgânica, sedimentos finos e nutrientes provenientes da pluma amazônica, que criam um mosaico de habitats bentônicos

(Geyer et al., 1996; Dagg et al., 2004). A distribuição da macrofauna bentônica é altamente heterogênea e está associada a gradientes espaciais de salinidade, profundidade, tipo de sedimento e concentração de carbono orgânico particulado (COP), refletindo padrões biogeográficos distintos ao longo da plataforma (Bissoli & Bernardino, 2018; Soares et al., 2022)

Grupos como poliquetas, moluscos e crustáceos dominam em sedimentos inconsolidados e desempenham funções ecológicas essenciais, como bioturbação, filtração e detritivoria, além de apresentarem rápida resposta às mudanças na quantidade e qualidade do COP (Aller & Aller, 1998; Alongi, 1998; Carvalho et al., 2023). Em estuários amazônicos, como o de Caeté, há predominância de anelídeos, padrão comum em ambientes tropicais (Flint & Younk, 1983; Dittman, 1995; Gambi et al., 1997). Já em sedimentos marinhos inconsolidados, os filos Annelida e Arthropoda são os mais representativos (Labruno et al., 2008; Pacheco et al., 2011; Moura et al., 2023). Em geral, os estuários da região amazônica apresentam menor riqueza de espécies bentônicas do que a observada em outros sistemas estuarinos ao redor do mundo (Dittman, 2000; Currie & Small, 2005; Lu, 2005).

As variações na disponibilidade de COP exercem influência marcante sobre a biomassa, a composição trófica e os padrões de recrutamento da macrofauna bentônica (Gooday, 2002; Smith et al., 1994). Por exemplo, os altos fluxos de COP tendem a favorecer comunidades oportunistas, com aumento na abundância de crustáceos e poliquetas depositívoros (Jumars & Wheatcroft, 1989; Levin & Dayton, 2009). Ademais, estudos indicam que a perda da biodiversidade bentônica acarreta uma redução significativa no funcionamento dos ecossistemas profundos, incluindo a diminuição das taxas de remineralização do carbono (Danovaro et al., 2008).

Apesar de sua importância ecológica, a fauna bentônica da plataforma continental amazônica é ainda pouco estudada, sendo considerada uma das regiões menos conhecidas do Brasil nesse aspecto (Soares et al., 2022; Gaurisas & Bernardino, 2023). A estrutura e dinâmica dessas comunidades são fortemente moduladas pela vazão do Rio Amazonas, influenciada pela sazonalidade pluviométrica e pelo regime de macromarés (Nittrover & Demaster, 1996). Portanto, compreender a relação entre a fauna bentônica e a variabilidade do COP na plataforma continental amazônica é essencial para avaliar os impactos de mudanças climáticas sobre a biodiversidade e o equilíbrio biogeoquímico da região (Aller & Blair, 2006).

Dada a influência do COP na distribuição dos organismos bentônicos nas plataformas continentais, este estudo visa compreender a diversidade e os padrões de distribuição dos bentos em plataformas continentais tropicais com relação ao COP. Considerando a influência do COP na distribuição dos organismos bentônicos, espera-se que estes organismos se distribuam de acordo com a dispersão da pluma, com maior diversidade e número de ocorrências próximo ao estuário e decaindo com o aumento da latitude. Para isso, bases de dados disponibilizadas no Ocean Biodiversity Information System (OBIS) foram utilizadas, a fim de comparar a diversidade de organismos bentônicos invertebrados registrados nas ecorregiões das Guianas e Amazônia, na província da Plataforma Norte do Brasil (Spalding et al., 2007; Baklouti et al., 2007) com as regiões de concentrações de COP definidas por Pereira et al. (em preparação).

Os dados disponibilizados pelo OBIS desempenham um papel fundamental na compreensão da biodiversidade marinha em escala global. Ao constituir a maior plataforma global de dados de ocorrência de espécies marinhas, reunindo registros padronizados de diversas origens, como cruzeiros científicos, museus, publicações e iniciativas de monitoramento ambiental (Costello et al., 2007; OBIS, 2023), o OBIS permite o mapeamento detalhado da distribuição das espécies, além de subsidiar a definição de áreas prioritárias para conservação (Canonico, et al., 2019). A integração com dados ambientais também permite avaliar os fatores que influenciam a estrutura das comunidades bentônicas, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento ecológico e para o monitoramento de impactos ambientais em um cenário de mudanças climáticas globais (Montes-Herrera, E., & Muller-Karger, F., 2019).

Materiais & Métodos

Área de Estudo

A área de estudo foi definida ao longo do trajeto da pluma do Rio Amazonas, atravessando as ecorregiões “Guiana” e “Amazônia”, na plataforma continental da província da Plataforma Norte do Brasil (Spalding et al., 2007; Baklouti et al., 2007) (Figura 1). A área foi dividida em quatro polígonos com diferentes concentrações de COP com base no trabalho de Pereira et al. (em preparação). Assim, o polígono Boca compreende as latitudes de 3°S até 2°N; o polígono Norte compreende de 2°N até 6°N; o polígono Guiana de 6°N até 8°N; e o

polígono Orinoco compreende as latitudes de 8°N até 11°N. Para cada polígono, foram extraídas as ocorrências de espécies bentônicas disponibilizadas pelo OBIS.

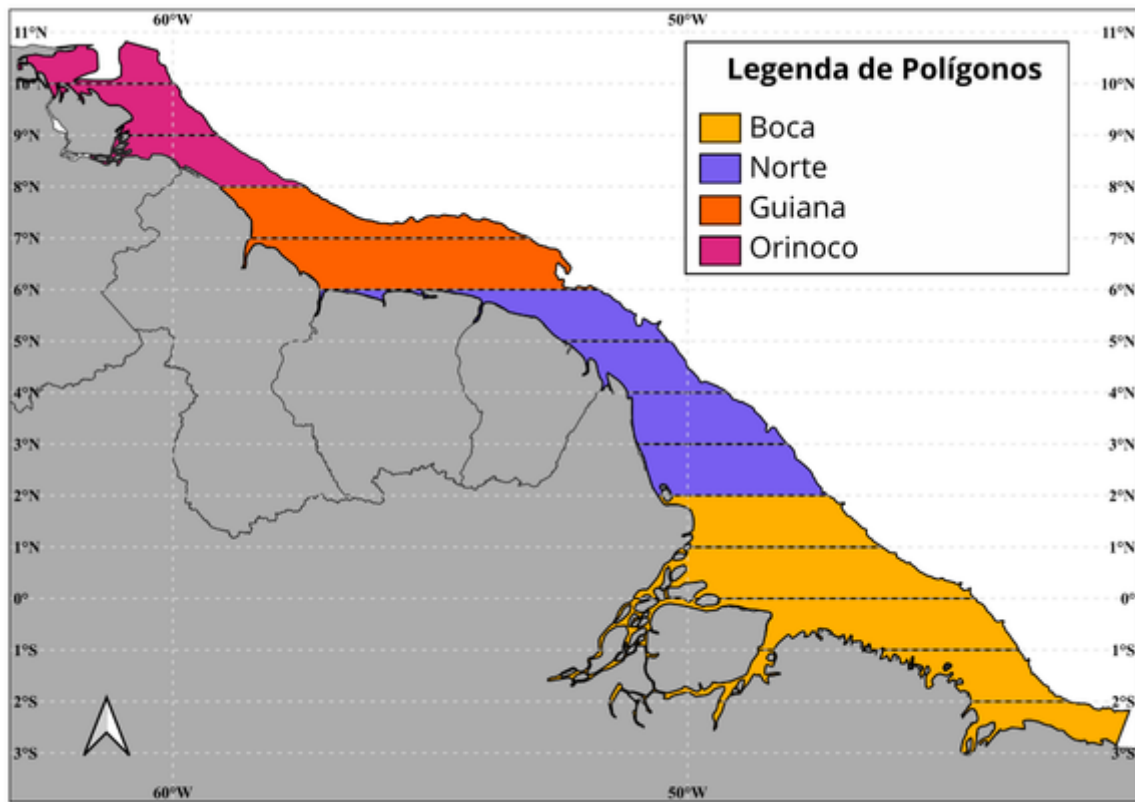


Figura 1. Mapa da região da pluma do Rio Amazonas indicando os polígonos de latitude usados para comparar a fauna bentônica. Modificado de Pereira et al. (em preparação).

Aquisição e Processamento de Dados

Dados de ocorrência de espécies da região de estudo foram obtidos do aplicativo ‘mapper’ no site do Ocean Biodiversity Information System (OBIS) em julho de 2024, no formato raster, e recortadas para os quatro polígonos de latitude através da ferramenta ‘raster’ do software QGIS 3.32.3 (QGIS Development Team, 2023), com o shapefile da distribuição espacial dos registros de espécies. Assim, todos os registros distribuídos fora dos polígonos foram excluídos. Os dados de ocorrência recortados foram manipulados no software R-4.3.1 (R Core Team 2020a) para filtrar os registros de invertebrados bentônicos, de acordo com a classificação de “Grupo Funcional” disponível no site do Registro Mundial de Espécies Marinhas (WoRMS, 2025).

Dados de concentração de Carbono Orgânico Particulado (COP; mg.m^{-3}) foram obtidos por meio de produtos de sensoriamento remoto das coleções do satélite MODIS Aqua (Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada; resolução espacial de 4 km; resolução temporal mensal) por um período de 21 anos (2003-2023). O produto MODIS calcula as concentrações de COP usando um algoritmo produzido por Stramski et al. (2022) e disponível no site EarthData - NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Este algoritmo estima a concentração de carbono orgânico particulado (COP), em mg.m^{-3} , com base em uma relação empírica derivada de medições in situ e razões de reflectância azul-verde (Rrs) de sensoriamento remoto (Stramski et al., 2008).

Análise dos Dados

Os registros de ocorrência bentônica foram atribuídos aos respectivos polígonos em que se encontravam e plotados usando o software QGIS 3.32.3 (QGIS Development Team, 2023). Mapas de ocorrência de espécies por Filo em cada polígono foram produzidos através do mesmo software.

Os dados de satélite para concentrações de COP foram processados no software SeaDAS (versão 9.1.0), que utiliza algoritmos desenvolvidos pelo Ocean Biology Processing Group (OBPG) para calibrar e gerar produtos de alta precisão. Os dados gerados pelo software SeaDAS foram então carregados e processados no MATLAB (versão R2020a) para obter valores médios de concentração de COP para todo período entre 2003 e 2023. Os valores de COP são dados em mg.m^{-3} para cada pixel da imagem de satélite, com os respectivos valores de latitude e longitude. Assim, foram obtidos os valores médios de COP para coordenada de ocorrência de espécies registrado pelo OBIS.

As diferenças nas concentrações medianas de 21 anos de COP (2003-2023) para cada ocorrência foram calculadas por um teste de Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA) com 999 permutações através do software R (versão 4.2.3), usando a função ‘adonis2’ do pacote ‘vegan’. Gráficos de barras empilhadas com porcentagem foram plotados através do software R (versão 4.2.3) para observar a prevalência de cada Filo e Classe em cada um dos polígonos de latitude.

A nível de Espécie, os registros sem identificação (representados por campos vazios ou contendo apenas vírgulas) foram preenchidos utilizando o nível de Gênero, seguido da notação “sp” (e.g., *Genus sp*), preservando a estrutura taxonômica da amostra. Em seguida, os

registros de ocorrência de espécies foram transformados para presença/ausência para reduzir os vieses nos métodos de amostragem e no esforço entre as regiões. A matriz de presença-ausência foi utilizada para calcular a dissimilaridade entre as regiões com base no índice de dissimilaridade de Simpson, por meio da função ‘recluster.dist’ do pacote ‘recluster’ (Simpson, 1960). Este índice é baseado na rotação espacial das espécies e, portanto, é menos influenciado pelas diferenças na riqueza de espécies entre as regiões (Baselga, 2012).

Em seguida, a estruturação das comunidades foi avaliada utilizando análise de agrupamento, realizada através do software R versão 4.3.1 (R Core Team, 2020a) utilizando o pacote ‘recluster’ (Dapporto et al., 2020), em que a função ‘simp.dist’ foi utilizada para construir as matrizes de dissimilaridade da rotatividade para a beta-diversidade faunística.

Para evitar as múltiplas soluções equivalentes de agrupamento e minimizar o viés causado por empates e zeros, comuns em dados biológicos, foram realizadas reamostragens aleatórias reestruturando a matriz de presença-ausência, resultando em uma árvore de consenso com base em 50% dos nós (função ‘recluster.cons’) que resume os agrupamentos mais estáveis entre essas reamostragens (Dapporto et al., 2013).

Para dar suporte aos nós, uma análise bootstrap sucessiva foi conduzida construindo 1.000 árvores de consenso, cada uma composta por 100 sítios reordenados (função ‘recluster.boot’). Para dar a cada espécie a oportunidade de ser incluída nas matrizes bootstrap e fortalecer o suporte para os nós (Dapporto et al., 2013), e permitir a avaliação da consistência dos agrupamentos ao longo de diferentes tamanhos de amostra (Suzuki & Shimodaira, 2006), foi realizada a reamostragem usando análise bootstrap multiescala com os mesmos parâmetros ‘recluster.boot’ e 10 níveis, através da função ‘recluster.multi’ (Dapporto et al., 2013).

Para dar suporte aos agrupamentos, a matriz de presença-ausência foi utilizada para a análise SIMPER (Porcentagens de Similaridade), baseada na decomposição do índice de dissimilaridade de Bray-Curtis, identificando as dissimilaridades entre os grupos através da composição das comunidades bentônicas, relacionando os taxa que mais contribuíram para a diferença observada entre as regiões (Clarke, 1993).

Resultados

Ocorrências Bentônicas

Os registros de ocorrência do OBIS se mostraram bem distribuídos espacialmente ao longo de cada região de estudo (Figura 2). Um total de 4.541 ocorrências de 52 bases de dados diferentes foram registradas para a área de estudo após a curadoria e padronização dos dados (Tabelas 1). Cerca de 50,8% dos dados de ocorrência foram registrados em profundidades inferiores à 50 metros. E ainda, 90,4% das ocorrências foram encontradas distribuídas nos primeiros 100 metros.

Foram encontrados 12 filos de metazoários (Tabela 1). O filo que apresentou o maior número de ocorrências foi Arthropoda, (1.965 ocorrências; 43,3%), seguido por Cnidaria (893 ocorrências; 19,7%) e Echinodermata (739 ocorrências; 16,3%). Mollusca, Annelida e Porifera também se destacaram, compondo juntos 20,0% das ocorrências totais, enquanto outros filos representaram menos de 1%.

A maior parte das ocorrências pertencem à região da Boca (1.271 ocorrências; 28,4%), seguida pelas regiões Orinoco (1.195 ocorrências; 25,9%), Guiana (1.069 ocorrências; 23,2%), e Norte (1.006 ocorrências; 22,3%). Os polígonos Guiana e Boca apresentaram maiores riquezas, com 241 e 232 espécies, nesta ordem. Já os polígonos Norte e Orinoco apresentaram as menores riquezas, com 166 e 201 espécies, respectivamente. Entre o total de ocorrências para a região de estudo, as classes predominantes foram Malacostraca (47,0%), Gastropoda (10,4%), Octocorallia (7,3%), Ophiuroidea (6,6%), Asteroidea (6,3%), e Hexacorallia (6,0%).

Tabela 1. Número de ocorrências de cada filo de metazoários bentônicos registradas no banco de dados do Ocean Biodiversity Information System (OBIS) até julho de 2024.

Phylum	Boca	Norte	Guiana	Orinoco	Total
Annelida	20	71	18	64	173
Arthropoda	453	502	388	622	1965
Brachiopoda	0	0	4	3	7
Bryozoa	0	2	4	0	6
Chordata	5	4	5	4	18
Cnidaria	484	79	193	137	893

Ctenophora	0	2	0	0	2
Echinodermata	57	135	306	241	739
Hemichordata	0	0	0	1	1
Mollusca	201	189	104	123	617
Platyhelminthes	0	0	3	0	3
Porifera	51	22	44	0	117
Total	1271	1006	1069	1195	4.541

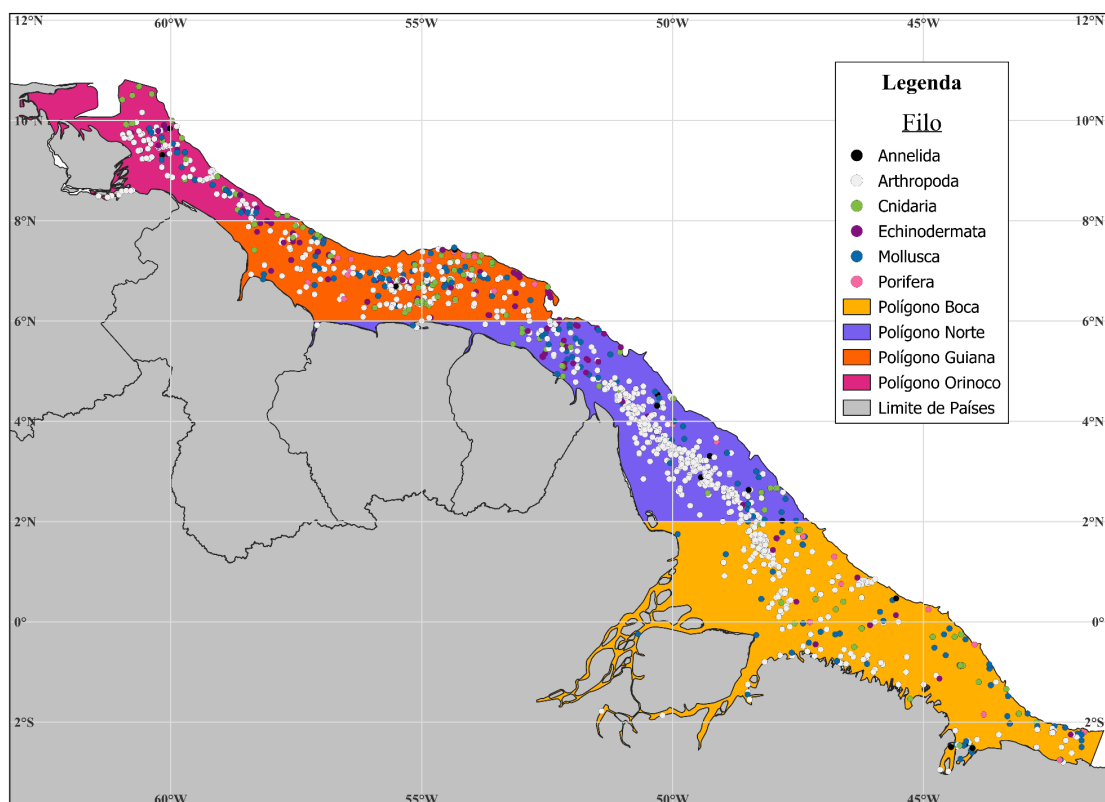


Figura 2. Mapa da distribuição de ocorrências dos filos de metazoários bentônicos mais representativos (em quantidade de ocorrências) em cada uma das regiões delimitadas dentro da área de estudo.

Para todas as regiões de estudo, exceto a região da Boca, o filo Arthropoda predominou em número das ocorrências registradas (Figura 3). Para a região da Boca, o filo predominante foi Cnidaria (38,1%), seguido de Arthropoda (35,6%), e Mollusca (15,8%). Na região Norte, após o filo Arthropoda (49,9%), a segunda taxa com maior número de ocorrências foi Mollusca (18,8%), seguida pelo filo Echinodermata (13,4%). Mais ao norte, as regiões da Guiana e Orinoco apresentaram o seus segundos maiores números de ocorrências para o filo Echinodermata (28,6%; 20,3%), e depois Cnidaria (18,0%; 16,1%).

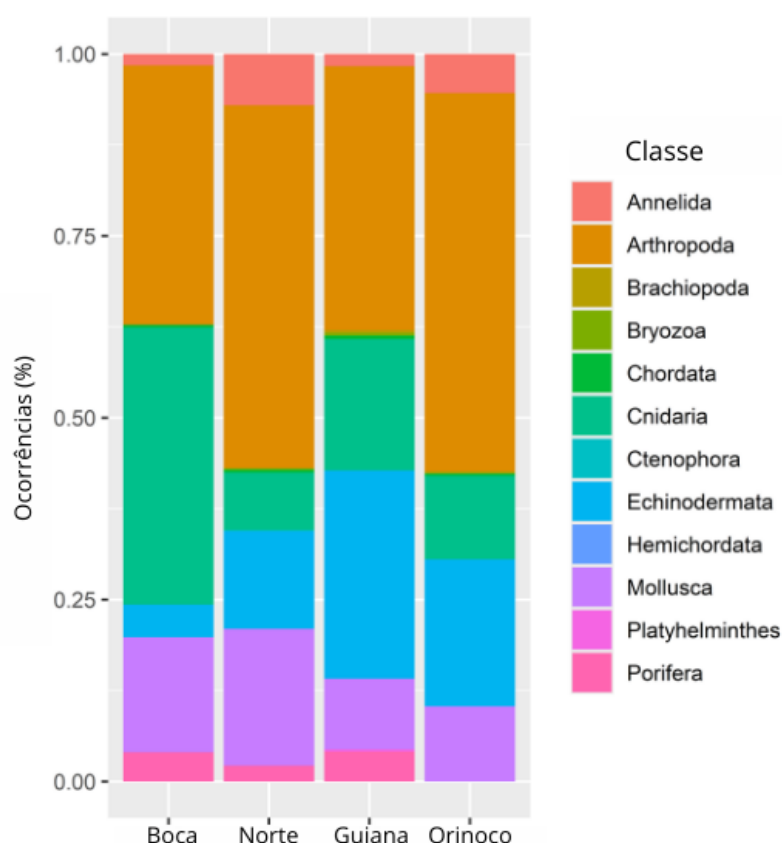


Figura 3. Porcentagem de ocorrências por filo de metazoários bentônicos em cada região de estudo.

COP em relação ao Benthos

O resultado do cluster de agrupação dos registros bentônicos mostrou que as regiões Boca e Norte são totalmente independentes, revelando assembleias bentônicas diferentes

(Figura 4). As regiões mostraram-se diferentes uma da outra, e a composição das comunidades bentônicas foi mais semelhante entre as regiões da Guiana e Orinoco, formando um cluster com um bom suporte de nós bootstrap (~70%).

As regiões Guiana e Orinoco apresentaram a maior similaridade entre si (60,7%). A região Boca apresentou maior similaridade com a região Norte (25,9%), seguida pela região do Orinoco (19,9%) e a região da Guiana (14,6%). Já a região Norte apresentou a maior similaridade com a região da Guiana (34,3%), seguida pela região Orinoco (27,7%), e menos similar à região da Boca.

O agrupamento entre as regiões Guiana e Orinoco foi sustentado especialmente pelas espécies compartilhadas dos camarões *Penaeus brasiliensis* e *Xiphopenaeus kroyeri*, e do estomatópode *Squilla lijdingi*. A independência da região Boca foi sustentada com a exclusividade de espécies como os gastrópodes *Stramonita haemastoma* e *Ucides cordatus*, os gêneros *Cytaeis* sp., *Chthamalus* sp. e *Tetraclita* sp. Já a separação da região Norte foi sustentada pela exclusividade das espécies *Cardiomya ornatissima*, *Ellisella elongata* e *Ophioderma brevispinum*, e o gênero *Coxiella* sp.

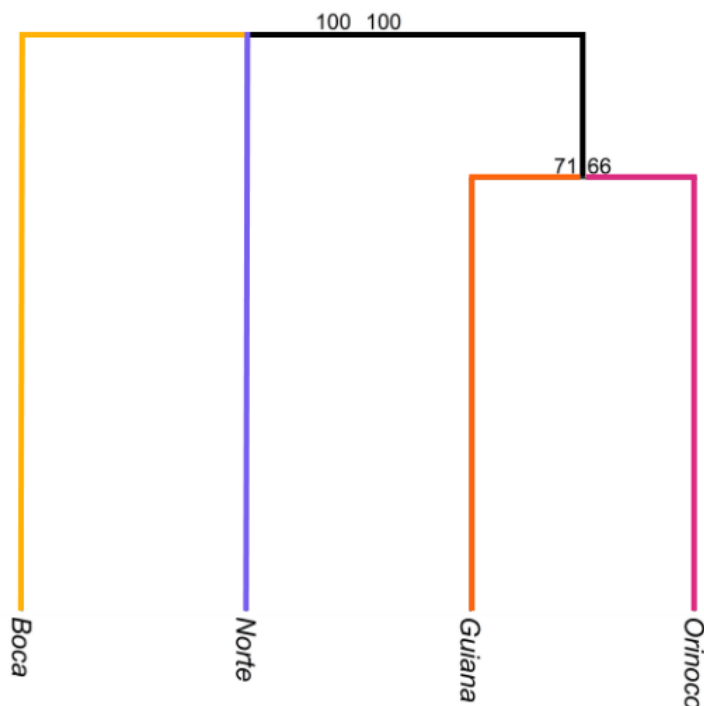


Figura 4. Resultado do agrupamento das regiões de estudo de acordo com as ocorrências de espécies bentônicas.

Os quatro filos mais representativos (Arthropoda, Cnidaria, Echinodermata e Mollusca) apresentaram diferenças significativas nas concentrações de COP em superfície das coordenadas de suas ocorrências. As menores concentrações de COP em superfície (abaixo de 52 mg.m^{-3}) foram associadas às coordenadas das espécies *Meandrina brasiliensis*, *Madracis pharensis*, e *Premocyathus cornuformis*, todas cnidários da classe Hexacorallia. Já as maiores concentrações (acima de 630 mg.m^{-3}) foram associadas à espécie de crustáceo *Nematopalaemon schmitti*, e ao gastrópode *Polystira albida* e o bivalve *Mulinia cleryana*.

Esses resultados foram sustentados pela comparação entre os boxplots dos quatro filos mais representativos, demonstrando diferentes faixas de concentração de COP em superfície (Figura 5). Os filos Arthropoda e Mollusca foram relacionados às concentrações de COP mais variadas, abrangendo, em média, de 150 a 450 mg.m^{-3} . Os filos Cnidaria e Echinodermata se distribuíram em menores faixas de concentração de COP e também as menores concentrações. E ainda, o filo Cnidaria apresentou as ocorrências relacionadas às menores concentrações de COP ($50 - 200 \text{ mg.m}^{-3}$) (Figura 5).

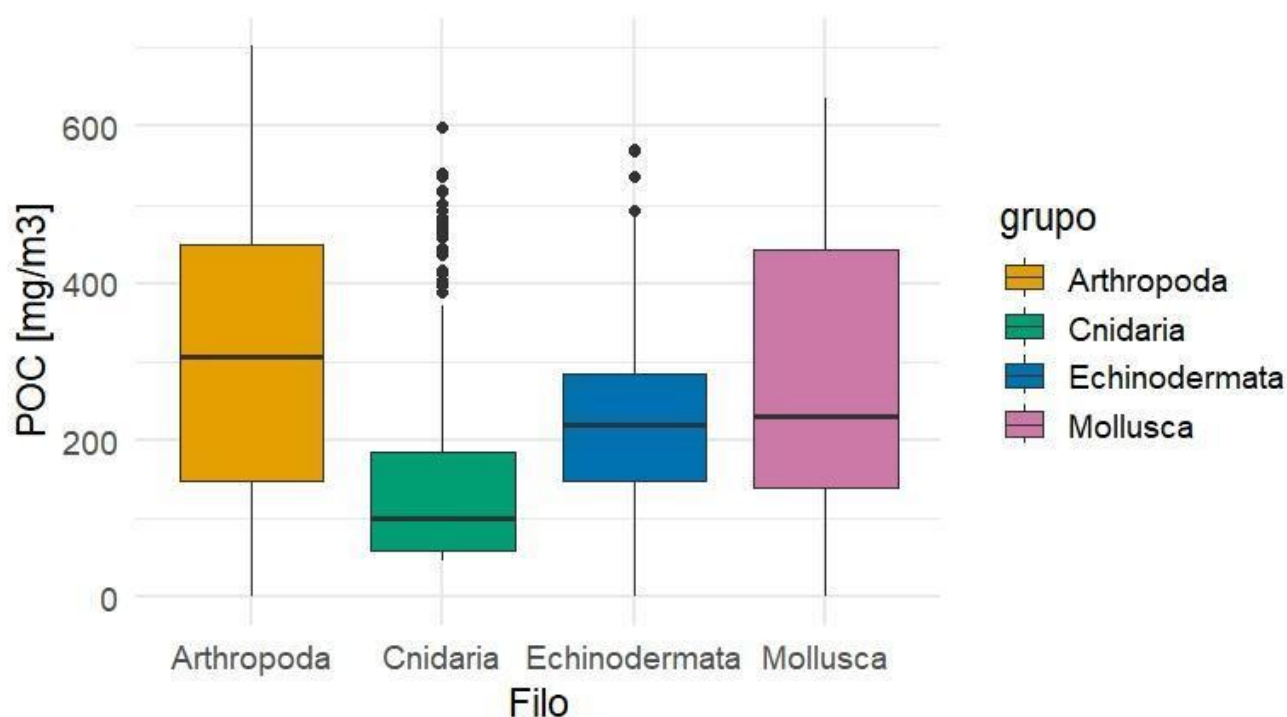


Figura 5. Boxplot da variação nas concentrações de COP em superfície para cada um dos quatro filis mais representativos (em número de ocorrências) em cada coordenada dos registros de ocorrência.

Phylum Arthropoda

Os artrópodes apresentaram o maior número de ocorrências (1.965 ocorrências (43,3%)). O subfilo Crustacea dominou as ocorrências (99,1%), e a classe mais recorrente nas ocorrências foi a Malacostraca (96,4%) em todas as quatro regiões de estudo (Boca: 89,1%; Norte: 97,6%; Guiana: 97,9%; Orinoco: 99,8%; Figura 6a). A região da Boca apresentou a classe Thecostraca como a segunda com maior número de ocorrências (9,3%). As regiões Norte, Guiana e Orinoco apresentaram alta predominância da classe Malacostraca. A classe Ostracoda não foi encontrada para os polígonos Guiana e Orinoco, e ainda, a classe Thecostraca também não foi encontrada no polígono Orinoco. As classes Ostracoda e Pycnogonida totalizam menos de 1,5% das ocorrências para o filo Arthropoda.

As classes do filo Arthropoda mostraram diferenças significativas nas concentrações de COP em superfície das coordenadas de suas ocorrências. As maiores concentrações de COP em superfície (acima de 600 mg.m⁻³) estiveram associadas às espécies de crustáceos *Nematopalaemon schmitti*, *Pseudosphaeroma jakobii*, e *Xiphopenaeus kroyeri*. Já as menores concentrações (abaixo de 55 mg.m⁻³) foram associadas às espécies *Pylopagurus discoidalis*, *Meiosquilla schmitti*, e *Pseudosquilla ciliata*.

Phylum Cnidaria

O filo Cnidaria apresentou o segundo maior número de ocorrências registradas no OBIS (893 ocorrências (19,7%)). Dentro deste filo, a classe Hydrozoa apresentou uma predominância de ocorrências para a região da Boca (51,3%), seguida pela classe Hexacorallia (35,9%) e Octocorallia (12,8%) (Figura 6b). O subfilo Anthozoa dominou as ocorrências das regiões Norte (93,1%), Guiana (100%), e Orinoco (98,6%). Para a região do Norte, 74,4% das ocorrências pertencem à classe Octocorallia. Na região da Guiana, 75% das ocorrências pertenceram à classe Octocorallia. Já na região do Orinoco, a classe Hexacorallia apresentou 59,5% das ocorrências.

As classes do filo Cnidaria mostraram diferenças significativas nas concentrações de COP em superfície das coordenadas de suas ocorrências. As maiores concentrações de COP em superfície (acima de 530 mg.m⁻³) estiveram associadas às espécies *Pacificorgia elegans*, *Lytrea plana*, e *Renilla muelleri*, todas pertencentes à classe Octocorallia. Já as menores

concentrações (abaixo de 55 mg.m^{-3}) foram associadas às espécies *Meandrina brasiliensis*, *Madracis pharensis*, e *Premocyathus cornuformis*, todas pertencentes à classe Hexacorallia.

Phylum Echinodermata

O filo Echinodermata representou o terceiro maior filo em ocorrências (739 ocorrências; 16,3%). Para esse filo, as classes com mais registros de ocorrência foram as classes Asteroidea (33,4%) e Ophiuroidea (35,2%) (Figura 6c). Para a região Boca, a predominância de ocorrências das classes Asteroidea (33,3%) e Ophiuroidea (28,1%) foram próximas à da classe Echinoidea (21,0%), havendo ainda presença relevante da classe Crinoidea (14,0%) e Holothuroidea (3,5%). Na região norte, as ocorrências dos equinóides (14,5%), as holotúrias (10,4%), e os crinóides (3,7%) foram menores que as ocorrências das estrelas do mar (37,0%) e os ofiuróides (34,8%). A região da Guiana apresentou suas ocorrências na seguinte ordem: Asteroidea (37,9%), Ophiuroidea (26,1%), Echinoidea (20,6%), Crinoidea (13,1%), e Holothuroidea (2,3%). Já a região do Orinoco inverte a ordem para: Ophiuroidea (48,5%), Asteroidea (25,7%), Crinoidea (14,1%), Echinoidea (7,9%), Holothuroidea (3,7%).

As classes do filo Echinodermata mostraram diferenças significativas nas concentrações de COP em superfície das coordenadas de suas ocorrências. As maiores concentrações de COP em superfície (acima de 560 mg.m^{-3}) estiveram associadas às espécies *Encope emarginata*, *Echinaster (Othilia) echinophorus*, e *Astrophyton muricatum*, pertencentes às classes Echinoidea, Asteroidea e Ophiuroidea, respectivamente. Já as menores concentrações (abaixo de 62 mg.m^{-3}) foram associadas às espécies *Tropiometra carinata*, *Eucidaris tribuloides*, e *Linckia guildingi*, pertencentes às classes Crinoidea, Echinoidea e Asteroidea, respectivamente.

Phylum Mollusca

O filo Mollusca representou o quarto maior filo em ocorrências (617 ocorrências; 13,6%). Para esse filo, a classe Gastropoda dominou as ocorrências em todas as regiões (66,7%), disputando apenas com a classe Bivalvia (Figura 6d). E ainda, nas regiões Boca e Norte, a predominância da classe Gastropoda foi de mais de 70%, enquanto as regiões Guiana e Orinoco variaram entre 50% e 60%.

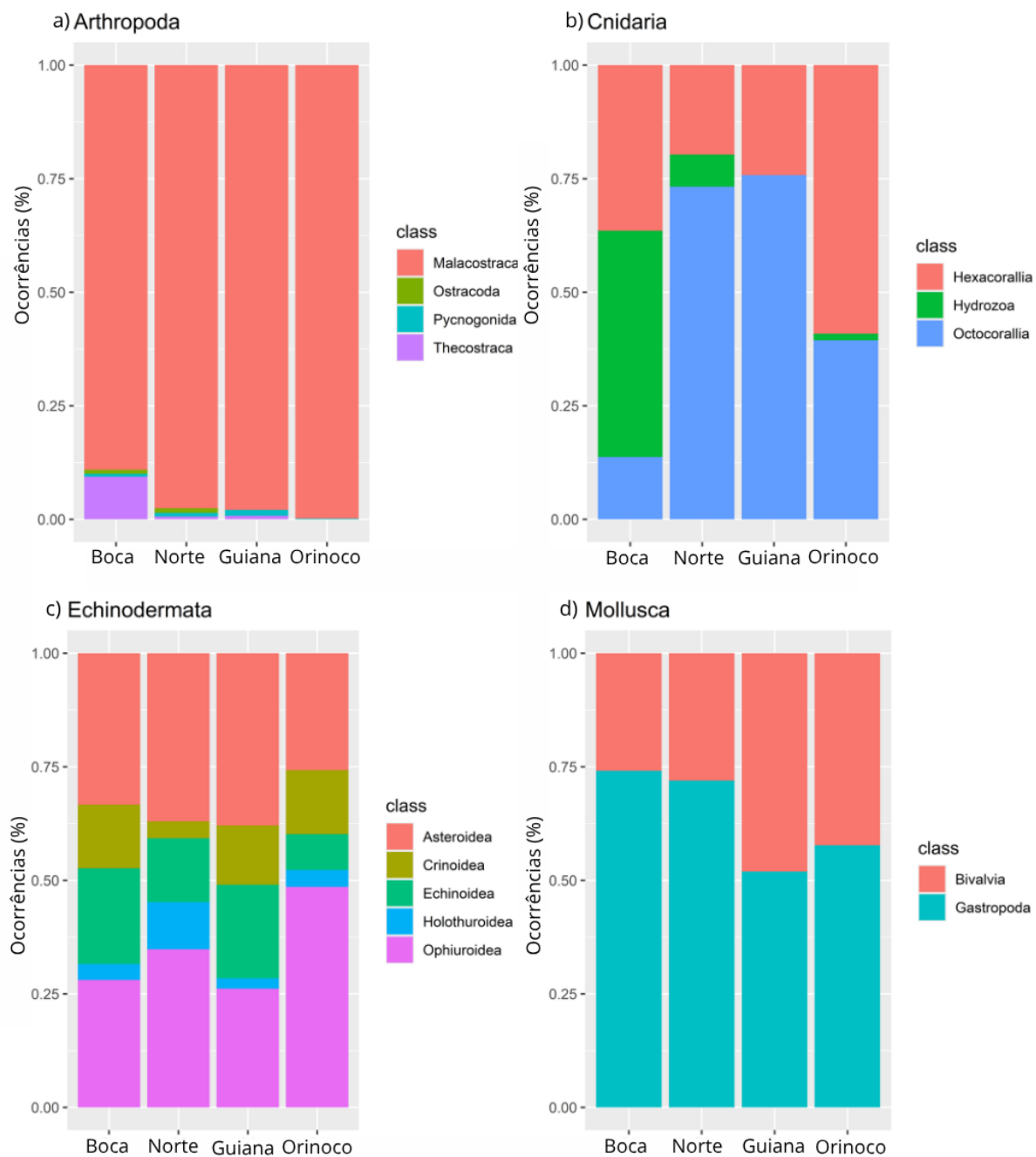


Figura 6. Porcentagem de ocorrências de organismos bentônicos invertebrados por classe em cada região de estudo para cada filo: a) Arthropoda; b) Cnidaria; c) Echinodermata; d) Mollusca.

As classes do filo Mollusca, Gastropoda e Bivalvia, não mostraram diferenças significativas nas concentrações de COP em superfície das coordenadas de suas ocorrências. As maiores concentrações de COP em superfície (acima de 580 mg.m^{-3}) estiveram associadas as espécies *Polystira albida*, *Mulinia cleryana*, e *Nuculana concentrica*, pertencentes às

classes Gastropoda, Bivalvia e Bivalvia, respectivamente. Já as menores concentrações (abaixo de 53 mg.m⁻³) foram associadas as espécies *Nassarius scissuratus*, *Adelphotectonica uruguayana*, e *Ancilla matthewsi*, todas pertencentes à classe Gastropoda.

Discussão

A análise dos dados de ocorrência obtidos do banco OBIS revelou uma alta diversidade bentônica na plataforma continental amazônica, com 4.541 registros distribuídos entre 12 filos, o que reflete a elevada riqueza ecológica de uma região altamente influenciada por processos fluviais e oceanográficos. O filo Arthropoda, predominante em mais de 40% das ocorrências, destaca-se especialmente pela elevada representatividade da classe Malacostraca — um padrão consistente com estudos em ambientes costeiros tropicais com alta produtividade (Levin et al., 2001; Alongi, 2020).

A composição e estrutura das comunidades bentônicas mostrou-se espacialmente heterogênea, com padrões de riqueza associados à influência diferenciada da pluma. Regiões sob forte influência fluvial, como a Boca e o Orinoco, apresentaram maior riqueza e ocorrência de espécies, provavelmente favorecida pela influência direta dos rios Amazonas e Orinoco, cujas descargas fluviais transportam grandes quantidades de nutrientes, matéria orgânica e sedimentos finos — fatores reconhecidamente associados à alta diversidade bentônica (Rabouille et al., 2001; Aller et al., 2004).

A composição regional mostrou padrões distintos. Arthropoda foi dominante nas regiões Norte, Guiana e Orinoco, o que pode estar relacionado à alta representatividade de dados oriundos de programas de monitoramento pesqueiro, que frequentemente utilizam arrastos e armadilhas seletivas para crustáceos de importância comercial (Boakes et al., 2010; Costello et al., 2013). Já na região da Boca, Cnidaria foi o filo mais registrado, com destaque para Hexacorallia e Hydrozoa, sugerindo influência de substratos consolidados e zonas recifais que ocorrem próximas à foz do Amazonas (Moura et al., 2016).

A formação de agrupamento, como o observado entre as regiões Guiana e Orinoco, sugere que essas áreas compartilham características ambientais semelhantes, como maior deposição de matéria orgânica e estabilidade hidrodinâmica, que favorecem a presença de espécies como *Penaeus brasiliensis*, *Xiphopenaeus kroyeri* e *Squilla lijdingi*, adaptadas a substratos lamosos e ricos em matéria orgânica (Aller & Stupakoff, 1996).

Por outro lado, a região da Boca apresentou exclusividade de espécies como *Stramonita haemastoma* e *Ucides cordatus*, indicativas de ambientes com maior variabilidade hidrológica, salinidade e aporte de sedimentos grossos, reflexo da descarga direta do rio e da instabilidade típica da zona estuarina (Nordhaus et al., 2006; Souza Filho et al., 2009). Esse padrão é coerente com o alto turnover de espécies (dissimilaridade >80%) observado entre Boca e outras regiões, evidenciando uma barreira ecológica promovida pela dinâmica da pluma (Araujo et al., 2022; Tosetto et al., 2022).

Para o filo Arthropoda, as regiões Boca e Norte apresentaram maior similaridade com os crustáceos *Xiphopenaeus kroyeri* e *Penaeus aztecus* como principais contribuintes das diferenças. Segundo Clarke (1993), as espécies mais abundantes geralmente apresentam altas contribuições para os agrupamentos, o que reforça a influência do tipo de esforço amostral sobre a composição observada uma vez que tais espécies de crustáceos são frequentemente capturadas em campanhas pesqueiras.

Os resultados também mostraram que filos como Arthropoda e Mollusca estão associados a faixas mais amplas de concentração de COP, indicando maior tolerância às possíveis alterações nessas concentrações. Crustáceos como *Nematopalaemon schmitti* e *Xiphopenaeus kroyeri*, presentes em todas as regiões, são conhecidos por sua capacidade de explorar ambientes ricos em matéria orgânica, devido à sua dieta detritívora e hábitos bentônicos móveis (Carvalho et al., 2023). Já moluscos bivalves, como *Mulinia cleryana*, encontrado na região da Guiana, contribuem ativamente para o fluxo de carbono por sua capacidade filtradora, funcionando como importante mediador do ciclo do carbono (Incze et al., 1982). Embora bivalves apresentem elevada adaptabilidade a diferentes níveis de turbidez e concentrações de COP, gastrópodes como *Polystira albida*, não encontrada apenas na região da Guiana, podem exibir diferentes estratégias de alimentação que são menos estudadas (Arapov et al., 2010; Kijewska et al., 2023).

Em contrapartida, os filos Cnidaria e Echinodermata apresentaram menor variação nas concentrações de COP em suas áreas de ocorrência, com destaque para a associação de espécies de corais (*Meandrina brasiliensis*, *Madracis pharensis*, e *Premocyathus cornuformis*) a áreas com baixa concentração de COP. Esses corais demonstraram uma preferência por áreas com baixa concentração de POC, associada a ambientes de água relativamente clara e baixa turbidez, pois são sensíveis à sedimentação, que pode entupir seus pólipos e afetar a fotossíntese simbiótica (Telesnicki & Goldberg, 1995; Rogers, 1990).

Regiões com alta turbidez, como a Boca, tendem a apresentar menor ocorrência de Echinodermata, especialmente Crinoidea e Echinoidea (Pomory & Lares, 2000). Isso ocorre pois as espécies suspensívoras, como crinóides, dependem de águas relativamente claras e bem oxigenadas para alimentação eficiente. A alta turbidez da pluma amazônica prejudica o fluxo laminar necessário para a captura de partículas alimentares (Rogers, 2000). Além disso, os equinodermos, especialmente da classe Crinoidea, são reconhecidos como indicadores de ambientes mais oligotróficos, devido à sua alimentação baseada em partículas suspensas e sua baixa tolerância a ambientes eutrofizados, como os associados a COP elevado (Aller & Stupakoff, 1996). Esses fatos podem ajudar a explicar a queda expressiva de registros de ocorrência de equinodermos para a região da Boca.

A distribuição espacial das comunidades bentônicas observada nas plataformas continentais Amazônica e das Guianas reflete a influência de fatores hidrodinâmicos, sedimentares e biogeoquímicos associados ao aporte de carbono orgânico particulado (COP) advindo da pluma do Rio Amazonas. Os resultados encontrados sugerem que variáveis ambientais como disponibilidade de COP desempenham papel importante na distribuição das comunidades bentônicas.

Conclusão

Este estudo evidenciou a complexidade da distribuição espacial da fauna bentônica nas plataformas continentais Amazônica e das Guianas, revelando o papel central do carbono orgânico particulado (COP) em superfície como modulador da composição e riqueza dessas comunidades. A distribuição dos principais filos bentônicos mostrou-se fortemente influenciada por gradientes ambientais associados à pluma do Rio Amazonas, como turbidez, hidrodinâmica e aporte de matéria orgânica. Enquanto crustáceos e moluscos demonstraram ampla tolerância às variações de COP, cnidários e equinodermos estiveram mais associados a ambientes com menor turbidez e concentrações mais baixas de matéria orgânica particulada.

A predominância de certos grupos, como Arthropoda, também reflete possíveis vieses decorrentes do esforço amostral historicamente concentrado em campanhas pesqueiras e monitoramentos setoriais, o que reforça a necessidade de programas de amostragem padronizados e abrangentes. Esses resultados destacam a importância de integrar variáveis biogeoquímicas em análises de biodiversidade, especialmente em regiões sob influência de grandes sistemas fluviais, como a bacia amazônica.

Esses resultados reforçam a plataforma amazônica como um importante ecossistema para a biodiversidade marinha, cuja estrutura bentônica é moldada por gradientes ambientais complexos e influências fluviais de larga escala. A compreensão desses padrões é essencial para subsidiar ações de conservação e monitoramento frente às crescentes pressões antrópicas e mudanças climáticas.

Referências

Aller, R. C., and Aller, J. Y. (1998). The effect of biogenic irrigation intensity and solute exchange on diagenetic reaction rates in marine sediments. *Journal of Marine Research* 56, 4.

Aller, R. C., Blair, N. E. (2006). Carbon remineralization in the Amazon–Guianas tropical mobile mudbelt: A sedimentary incinerator, *Continental Shelf Research*, Volume 26, Issues 17–18, Pages 2241-2259, ISSN 0278-4343, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.07.016>.

Aller, R. C., Blair, N. E., Xia, Q., & Rude, P. D. (1996). Remineralization rates, recycling, and storage of carbon in Amazon shelf sediments. *Continental Shelf Research*, 16(5-6), 753-786.

Aller, R. C., Heilbrun, C., Panzeca, C., Zhu, Z., & Baltzer, F. (2004). Coupling between sedimentary dynamics, early diagenetic processes, and biogeochemical cycling in the Amazon–Guianas mobile mud belt: coastal French Guiana. *Marine Geology*, 208(2-4), 331-360.

Alongi, D.M. (1998). *Coastal Ecosystem Processes* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003057864>.

Alongi, D. M. (2020). *Coastal ecosystem processes*. CRC press.

Arapov, J., Ezgeta-Balić, D., Peharda, M., & Ninčević Gladan, Ž. (2010). Bivalve feeding — how and what they eat? *Croatian Journal of Fisheries*, 68(3), 105–116.

Araujo, G. S., Rocha, L. A., Lastrucci, N. S., Luiz, O. J., Di Dario, F., & Floeter, S. R. (2022). The Amazon-Orinoco Barrier as a driver of reef-fish speciation in the Western Atlantic through time. *Journal of Biogeography*, 49(8), 1407-1419.

Baklouti, M., J.-L. Devenon, A. Bourret, J.-M. Froidefond, J.-F. TERNON, and J.-L. Fuda (2007). New insights in the French Guiana continental shelf circulation and its relation

to the North Brazil Current retroflection, *J. Geophys. Res.*, 112, C02023, doi:10.1029/2006JC003520.

Baselga, A. (2012), The relationship between species replacement, dissimilarity derived from nestedness, and nestedness. *Global Ecology and Biogeography*, 21: 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00756.x>.

Bissoli, L. B., & Bernardino, A. F. (2018). Benthic macrofaunal structure and secondary production in tropical estuaries on the Eastern Marine Ecoregion of Brazil. *PeerJ*, 6, e4441.

Boakes EH, McGowan PJK, Fuller RA, Chang-qing D, Clark NE, O'Connor K, et al. (2010). Distorted Views of Biodiversity: Spatial and Temporal Bias in Species Occurrence Data. *PLoS Biol* 8(6): e1000385. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000385>.

de Carvalho, C., Keunecke, K.A. & Lavrado, H.P. (2023). Differences in feeding ecology of the pink shrimps *Penaeus brasiliensis* and *P. paulensis* (Decapoda: Penaeidae) in Brazilian tropical ecosystems. *Aquat Ecol* 57, 701–714. <https://doi.org/10.1007/s10452-023-10040-y>.

Canonico, G., Buttigieg, P. L., Montes, E., Muller-Karger, F. E., Stepien, C., Wright, D., ... & Murton, B. (2019). Global observational needs and resources for marine biodiversity. *Frontiers in Marine Science*, 6, 367.

Chong, L.S., Berelson, W.M., McManus, J., Hammond, D.E., Rollins, N.E., Yager, P.L. (2014). Carbon and biogenic silica export influenced by the Amazon River Plume: patterns of remineralization in deep-sea sediments, *Deep-Sea Res. I*, 85 (2014), pp. 124-137.

Clarke, K.R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18: 117-143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>

Coles, V. J., M. T. Brooks, J. Hopkins, M. R. Stukel, P. L. Yager, and R. R. Hood. (2013). The pathways and properties of the Amazon River plume in the tropical North Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6894–6913.

Cosson, N., Sibuet, M., & Galeron, J. (1997). Community structure and spatial heterogeneity of the deep-sea macrofauna at three contrasting stations in the tropical northeast Atlantic. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(2), 247-269.

Costello, M. J., Stocks, K., Zhang, Y., Grassle, J. F., & Fautin, D. G. (2007). About the Ocean biogeographic information system.

Costello, M.J., Michener, W.K., Gahegan, M., Zhang, Z.Q., Bourne, P.E. (2013). Biodiversity data should be published, cited, and peer reviewed, *Trends in Ecology & Evolution*, Volume 28, Issue 8, Pages 454-461, ISSN 0169-5347, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.05.002>.

Currie, D. & Small, K. (2005). Macrobenthic community responses to long-term environmental change in an east Australian sub-tropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 63. 315-331. 10.1016/j.ecss.2004.11.023.

Dagg, M. Benner, R., Lohrenz, S., Lawrence, D. (2004). Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes *Continental Shelf Res.*, 24 (2004), pp. 833-858.

Danovaro, R., Dinet, A., Duineveld, G., & Tselepides, A. (1999). Benthic response to particulate fluxes in different trophic environments: a comparison between the Gulf of Lions–Catalan Sea (western-Mediterranean) and the Cretan Sea (eastern-Mediterranean). *Progress in Oceanography*, 44(1-3), 287-312.

Dapporto L, Ramazzotti M, Fattorini S, Talavera G, Vila R, Dennis RL. (2013). recluster: an unbiased clustering procedure for beta-diversity turnover. *Ecography* 36(10):1070-1075

Dapporto L, Ramazzotti M, Fattorini S, Vila R, Talavera G, Dennis RL. (2020). recluster: ordination methods for the analysis of beta-diversity indices. R package version 2.9

DeMaster D.J., Smith W.O., Nelson D.M., Aller J.Y. (1996). Biogeochemical processes in Amazon shelf waters: chemical distributions and uptake rates of silicon, carbon and nitrogen, *Continental Shelf Research*, 16, pp. 617-643

Dittman, S. (1995). Benthos structure on tropical tidal flats of Australia. *Helgoländer Meeresunters*, v. 49, p. 539-551.

Dittmann, S. (2000). Zonation of benthic communities in a tropical tidal flat of north-east Australia [Journal of Sea Research 43 (2000) 33–51]. Journal of Sea Research - J SEA RES. 43. 178-178. 10.1016/S1385-1101(00)00026-5.

Ducklow, H.W., D.K. Steinberg, and K.O. Buesseler. (2001). Upper ocean carbon export and the biological pump. Oceanography 14(4):50–58, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.06>.

Evers-King, H., Martinez-Vicente, V., Brewin, R. J. W., Dall’Olmo, G., Hickman, A. E., Jackson, T., Kostadinov, T. S., Krasemann, H., Loisel, H., Röttgers, R., Roy, S., Stramski, D., Thomalla, S., Platt, T. and Sathyendranath, S. (2017). Validation and Intercomparison of Ocean Color Algorithms for Estimating Particulate Organic Carbon in the Oceans. Front. Mar. Sci. 4:251. doi: 10.3389/fmars.2017.00251.

Flint, R.W., Younk, J.A. (1983). Estuarine benthos: Long-term community structure variations, corpus Christi Bay, Texas. Estuaries 6, 126–141. <https://doi.org/10.2307/1351703>.

Gambi, M. C. & Ramella, L. & Sella, G.a & Protto, P. & Aldieri, E. (1997). Variation in Genome Size in Benthic Polychaetes: Systematic and Ecological Relationships. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 77. 1045 - 1057. 10.1017/S0025315400038613.

Gaurisas, D. Y., & Bernardino, A. F. (2023). Benthic biogeographic patterns on the deep Brazilian margin. PeerJ, 11, e14585. <https://doi.org/10.7717/peerj.14585>.

Geyer, W.R., Beardsley, R.C., Lentz, S.J., Candela, J., Limeburner, R., Johns, W.E., Castro, B.M., Soares, I.D. (1996). Physical oceanography of the Amazon shelf, Continental Shelf Research, 16, pp. 575-616.

Gray & Elliott. (2009). Ecology of Marine Sediments – From Science to Management (second ed.), Oxford University Press, Oxford.

Incze, L. S., Mayer, L. M., Sherr, E. B., & Macko, S. A. (1982). Carbon inputs to bivalve mollusks: a comparison of two estuaries. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 39(10), 1348-1352.

Kijewska, A., Koroza, A., Grudlewska-Buda, K., Kijewski, T., Wiktorczyk-Kapischke, N., Zorena, K., & Skowron, K. (2023). Molluscs—A ticking microbial bomb. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1061223>.

Labrune, C., Grémare, A., Amouroux, JM. et al. (2008). Structure and diversity of shallow soft-bottom benthic macrofauna in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Helgol Mar Res* 62, 201–214. <https://doi.org/10.1007/s10152-008-0108-9>.

Lana, P. C.; Camargo, M. G.; Brogim, R. A.; Isaac, V. J. (1996). O Bentos da Costa Brasileira: avaliação crítica e levantamento. Rio de Janeiro: FEMAR. 431p.

Levin, L., Blair, N., DeMaster, D., Plaia, G., Fornes, W., Martin, C., & Thomas, C. (1997). Rapid subduction of organic matter by maldanid polychaetes on the North Carolina slope.

Levin, L. A., Etter, R. J., Rex, M. A., Gooday, A. J., Smith, C. R., Pineda, J., ... & Pawson, D. (2001). Environmental influences on regional deep-sea species diversity. *Annual review of ecology and systematics*, 32(1), 51-93.

Lu, Y., Zuo, L., Shao, X., Wang, H., Li, H. (2005). A 2D mathematical model for sediment transport by waves and tidal currents *China Ocean Engineering*, 19 (4), pp. 571-586

Medeiros, P. M., M. Seidel, N. D. Ward, E. J. Carpenter, H. R. Gomes, J. Niggemann, A. V. Krusche, J. E. Richey, P. L. Yager, and T. Dittmar. (2015). Fate of the Amazon River dissolved organic matter in the tropical Atlantic Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 29, 677–690, doi:10.1002/2015GB005115.

Montagna, P.A., Baguley, J.G., Cooksey, C., Hyland, J.L. (2017). Persistent impacts to the deep soft-bottom benthos one year after the Deepwater Horizon event *Integrated Environ. Assess. Manag.*, 13 (2), pp. 342-351.

Montes-Herrera, E., & Muller-Karger, F. (2019). Global observational needs and resources for marine biodiversity. *Frontiers in Marine Science*, 3.

Moura, R.L., Amado-Filho, G.M., Moraes, F.C., Brasileiro, P.S., Salomon, P.S., Mahiques, M.M., Bastos, A.C., Almeida, M.G., Silva, J.M., Araújo, B.F., Brito, F.P., Rangel, T.P., Oliveira, B.C.V., Bahia, R.G., Paranhos, R.P., Dias, R.J.S., Siegle, E., Figueiredo Jr, A.G., Pereira, R.C., Leal, C.V., Hadju, E., Asp, N.E., Gregoracci, G.B., Neumann-Leitão, S.,

Yager, P., Francini-Filho, R.B., Fróes, A., Campeão, M., Silva, B.S., Moreira, A.P.B., Oliveira, L., Soares, A.C., Araujo, L., Oliveira, N.L., Teixeira, J.B., Valle, R.A.B., Thompson, C.C., Rezende, C.E., Thompson, F.L. (2016). An extensive reef system at the Amazon River mouth, *Sci. Adv.*, 2 (4), Article e1501252, 10.1126/sciadv.1501252.

Moura, R. B. D., Dalto, A. G., Sallorenzo, I. D. A., Moreira, D. L., & Lavrado, H. P. (2023). Community structure of the benthic macrofauna along the continental slope of Santos basin and São Paulo plateau, SW Atlantic. *Ocean and Coastal Research*, 71, e23032.

Nittrouer, C. A., & DeMaster, D. J. (1996). The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental shelf research*, 16(5-6), 553-573.

Nittrouer, C. A., DeMaster, D. J., Kuehl, S. A., Figueiredo Jr, A. G., Sternberg, R. W., Faria, L. E. C., Silveira, O. M., Allison, M. A., Kineke, G. C., Ogston, A. S., Filho, W. M. S., Asp, N. E., Nowacki, D. J., Fricke, A. T. (2021). Amazon sediment transport and accumulation along the continuum of mixed fluvial and marine processes. *Annual Review of Marine Science*, 13(1), 501-536.

Nittrouer, C.A., Kuehl, S.A., Sternberg, R.W., Figueiredo, A.G., Faria, L.E.C. (1995). An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon Continental-Shelf, *Marine Geology*, 125 (3–4) (1995), pp. 177-192.

Nordhaus, I., Wolff, M., & Diele, K. (2006). Litter processing and population food intake of the mangrove crab *Ucides cordatus* in a high intertidal forest in northern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2), 239–167..

van Nugteren, P., Moodley, L., Brummer, G. J., Heip, C. H., Herman, P. M., & Middelburg, J. J. (2009). Seafloor ecosystem functioning: the importance of organic matter priming. *Marine biology*, 156, 2277-2287.

OBIS – Ocean Biodiversity Information System. What is OBIS? 2023. Disponível em: <https://obis.org/about/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

Omachi, C.Y. , Asp, N.E., Siegle, E., Couceiro, M.A.A. , Francini-Filho, R.B., Thompson, F.L. (2019). Light availability for reef-building organisms in a plume-influenced shelf, *Cont. Shelf Res.* 10.1016/j.csr.2019.05.005.

Pacheco, A.S., González, M.T., Bremner, J. et al. (2011). Functional diversity of marine macrobenthic communities from sublittoral soft-sediment habitats off northern Chile. *Helgol Mar Res* 65, 413–424. <https://doi.org/10.1007/s10152-010-0238-8>.

Pereira, A. P., Gaurisas, D. Y., Bernardino, A. F. (em preparação). Long-term effects of the Amazon River Discharge on Particulated Organic Carbon Distribution in the Amazon coast of Brazil.

Pomory, C.M. & Lares, M.T. (2000). Effects of suspensions and organic enrichment on feeding in suspension-feeding brittle stars. *Marine Ecology Progress Series*, 197, 155–167.

QGIS Development Team, <2023>. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

R Core Team (2020a). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available in: <<https://www.R-project.org>> (Accessed on April 10, 2024).

Rabouille, C., Mackenzie, F. T. and Ver, L. M. (2001). Influence of the human perturbation on carbon, nitrogen, and oxygen biogeochemical cycles in the global coastal ocean, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65(21), 3615–3641, doi:10.1016/S0016-7037(01)00760-8.

Rex, M. A., Etter, R. J., Morris, J. S., Crouse, J., McClain, C. R., Johnson, N. A., ... & Avery, R. (2006). Global bathymetric patterns of standing stock and body size in the deep-sea benthos. *Marine Ecology Progress Series*, 317, 1-8.

Richey, J. E., Meade, R. H., Salati, E., Devol, A. H., Nordin Jr. C. F., and Dos Santos, U. (1986). Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon River: 1982–1984, *Water Resour. Res.*, 22, 756–764, doi:10.1029/WR022i005p00756.

Rogers, A.D. (2000). The role of the oceanic oxygen minima in generating biodiversity in the deep sea. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(1–2), 119–148. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00103-2).

Rogers, C. S. (1990). Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 62(1), 185-202.

Simpson GG. (1960). Notes on the measurement of faunal resemblance. *American Journal of Science*. 258–A:300–311.

Soares, H. S. .; Pestana, S. S.; Barros, M. F. De S.; Sousa, R. R.; Oliveira, V. M. De; Carvalho Neta, R. N. F. (2022). The diversity of benthic macrofauna in Brazil: a bibliographic review. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 13, p. e583111335752. DOI: 10.33448/rsd-v11i13.35752.

Souza Filho, P. W. M. et al. (2009). The subsiding macrotidal barrier-estuarine system of the Eastern Amazon coast, Northern Brazil. In Dillenburg, S. F. & Hesp, P. A. (Eds.), *Lecture Notes in Earth Sciences* (Vol. 107, pp. 347–376). Springer.

Spalding, M. D., Fox, H.E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdaña, Z. A., Finlayson, M., Halpern, B. S., Jorge, M. A., Sara A. L., Martin, L. K. D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, C. A., Robertson, J. (2007). Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas, *BioScience*, 57, Issue 7, Pages 573–583, <https://doi.org/10.1641/B570707>.

Stramska, M., Stramski, D., Hapter, R., Kaczmarek, S., Stoń, J. (2003). Bio-optical relationships and ocean color algorithms for the north polar region of the Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 108 (C5), p. 3143, [10.1029/2001JC001195](https://doi.org/10.1029/2001JC001195).

Stramski, D., Reynolds, R. A., Babin, M., Kaczmarek, S., Lewis, M. R., Röttgers, R., Sciandra, A., Stramska, M., Twardowski, M. S., Franz, B. A., Claustre, H. (2008). Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans. *Biogeosciences*, 5, 171-201, <https://doi.org/10.5194/bg-5-171-2008>.

Stramski, D., Joshi, I., & Reynolds, R. A. (2022). Ocean color algorithms to estimate the concentration of particulate organic carbon in surface waters of the global ocean in support of a long-term data record from multiple satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112776.

Telesnicki, G. J., & Goldberg, W. M. (1995). Effects of turbidity on the photosynthesis and respiration of two south Florida reef coral species. *Bulletin of Marine Science*, 57(2), 527-539.

Tosetto, E. G., Bertrand, A., Neumann-Leitão, S. et al. (2022). The Amazon River plume, a barrier to animal dispersal in the Western Tropical Atlantic. *Sci Rep* 12, 537. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04165-z>.

Volk, T. and Hoffert, M.I. (1985). Ocean Carbon Pumps: Analysis of Relative Strengths and Efficiencies in Ocean-Driven Atmospheric CO₂ Changes. In *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present* (eds E.T. Sundquist and W.S. Broecker). <https://doi.org/10.1029/GM032p0099>.

IV. DISCUSSÃO GERAL

O presente estudo trouxe uma abordagem integrativa para compreender como a variabilidade espacial e temporal do carbono orgânico particulado (COP), impulsionada principalmente pela descarga do Rio Amazonas, influencia a estrutura da comunidade bentônica na plataforma continental Amazônica e das Guianas.

A variabilidade espacial e temporal do carbono orgânico particulado (COP) nas plataformas continentais Amazônica e das Guianas está fortemente relacionada à sazonalidade da vazão do Rio Amazonas e aos padrões de circulação regional das correntes oceânicas, especialmente a Corrente Norte do Brasil (Stramma et al., 2003).

A maior concentração de COP observada na região Norte pode ser atribuída ao transporte constante da pluma amazônica pela Corrente Norte do Brasil ao longo do ano inteiro (Coles et al., 2013). Em contraste, a menor concentração observada na região da Guiana reflete a influência da Corrente de Retroflexão Norte do Brasil, que desvia parte significativa da pluma em direção ao oceano aberto, reduzindo sua influência direta sobre a plataforma (Lumpkin & Garzoli, 2005).

Essa dinâmica oceanográfica influencia diretamente nos padrões de distribuição das comunidades bentônicas. Grupos como Arthropoda e Mollusca demonstraram maior tolerância às variações de COP, refletindo estratégias adaptativas mais eficientes (Carvalho et al., 2023). Por outro lado, filos como Cnidaria e Echinodermata estiveram associados a águas com menores concentrações de COP em superfície, como as regiões Boca e Guiana, com destaque para corais como *Meandrina brasiliensis*, sensíveis à sedimentação excessiva (Rogers, 1990). A baixa ocorrência de equinodermos na Boca, por exemplo, pode ser explicada pela alta turbidez e deposição de matéria orgânica que limita espécies filtradoras como os crinóides (Pomory & Lares, 2000).

A maior riqueza taxonômica apresentada pela região da Boca reflete um ambiente de alta variabilidade hidrológica, sedimentos finos e grande aporte de matéria orgânica (Aller et al., 2004). Esses fatores favorecem espécies adaptadas a substratos lamosos ricos em COP, como os crustáceos *Xiphopenaeus kroyeri* e *Penaeus subtilis* (Aller & Stupakoff, 1996). O agrupamento de acordo com composição da fauna bentônica entre as regiões Guiana e Orinoco pode ser explicado devido à essas regiões compartilharem de características

ambientais como deposição de matéria orgânica e menor influência direta da pluma (Aller et al., 1996; Coles et al., 2013; Moura et al., 2016).

Eventos climáticos extremos acentuam essa complexidade. O El Niño de 2015–2016, por exemplo, provocou uma redução de 17% na vazão do Amazonas, resultando em uma queda estimada de 13% nas concentrações de COP na região da Boca. A sensibilidade desse sistema à intensificação de eventos extremos sob o cenário das mudanças climáticas de larga escala demonstra o grau de dependência da produtividade regional em relação ao aporte fluvial, com potenciais impactos sobre a biodiversidade bentônica e os serviços ecossistêmicos marinhos (Marengo et al., 2016; Moura et al., 2016; Gévaudan et al., 2022).

A integração entre dados espaciais de biodiversidade e séries temporais de COP revela um quadro ecológico complexo, no qual os processos fluviais, oceanográficos e biogeoquímicos interagem para moldar os padrões de biodiversidade e funcionamento das comunidades bentônicas nas plataformas continentais tropicais. Compreender essas interações é essencial para antecipar os efeitos das mudanças ambientais sobre ecossistemas costeiros tropicais e subsidiar estratégias eficazes de conservação e monitoramento em uma das regiões mais produtivas e vulneráveis do oceano Atlântico tropical.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação buscou integrar abordagens espaciais e temporais para compreender a relação entre a descarga do rio Amazonas, a dispersão do COP e os padrões biogeográficos de biodiversidade bentônica ao longo da plataforma continental da província da Plataforma Norte do Brasil.

No Capítulo 1, a partir da análise de 21 anos de dados satelitais (2003–2023), foi identificada a influência direta de fatores hidrológicos e climáticos, como o regime sazonal do Rio Amazonas e eventos extremos como o El Niño, na modulação das concentrações de COP na região. A forte relação entre descarga fluvial e variações espaciais do COP reforça o papel do Rio Amazonas como uma importante fonte de matéria orgânica para o oceano Atlântico tropical.

No Capítulo 2, com base em dados de ocorrência bentônica do OBIS, foram analisados os padrões biogeográficos de biodiversidade bentônica na região, indicando que a composição

das comunidades bentônicas varia de acordo com as regiões de diferentes concentrações de COP. Essa variação sugere que a disponibilidade de carbono orgânico particulado, influenciada pela descarga do Rio Amazonas e pela hidrodinâmica local, desempenha um papel determinante na estruturação das comunidades bentônicas ao longo do gradiente continental.

A divisão espacial das plataformas em quatro regiões indicou padrões ecológicos interessantes, principalmente para a região da Boca, onde a maior variabilidade hidrológica, aporte de nutrientes e riqueza taxonômica indicam um ambiente ecologicamente complexo e produtivo. Investimentos em amostragem contínua e padronizada, juntamente com abordagens que combinem dados *in situ*, sensoriamento remoto e modelagem, são essenciais para o entendimento e a preservação desse ecossistema de importância global.

De forma geral, os resultados destacam a importância de abordagens interdisciplinares que combinem dados oceanográficos, biológicos e climáticos para compreender os mecanismos que regulam a produtividade primária e a biodiversidade marinha em plataformas tropicais influenciadas por grandes rios. Esta dissertação contribui para o avanço do conhecimento sobre os efeitos dos eventos extremos na pluma amazônica e na fauna bentônica da região, oferecendo subsídios para estratégias de conservação e monitoramento ambiental frente ao cenário de mudanças climáticas globais e os desafios impostos pela intensificação de eventos extremos.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aller, R. C., Heilbrun, C., Panzeca, C., Zhu, Z., & Baltzer, F. (2004). Coupling between sedimentary dynamics, early diagenetic processes, and biogeochemical cycling in the Amazon–Guianas mobile mud belt: coastal French Guiana. *Marine Geology*, 208(2-4), 331-360.

Alongi, D.M. (1998). *Coastal Ecosystem Processes* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003057864>.

Callede, J., Guyot, J. L., Ronchail, J., Molinier, M., and De Oliveira, E. (2002). The River Amazon at Obidos (Brazil): Statistical studies of the discharges and water balance. *Hydrol. Sci. J.*, v 47, 321–333pp.

de Carvalho, C., Keunecke, K.A. & Lavrado, H.P. (2023). Differences in feeding ecology of the pink shrimps *Penaeus brasiliensis* and *P. paulensis* (Decapoda: Penaeidae) in Brazilian tropical ecosystems. *Aquat Ecol* 57, 701–714. <https://doi.org/10.1007/s10452-023-10040-y>.

Chong, L.S., Berelson, W.M., McManus, J., Hammond, D.E., Rollins, N.E., Yager, P.L. (2014). Carbon and biogenic silica export influenced by the Amazon River Plume: patterns of remineralization in deep-sea sediments, *Deep-Sea Res. I*, 85 (2014), pp. 124-137.

Coles, V. J., Brooks, M. T., Hopkins, J., Stukel, M. R., Yager, P. L., & Hood, R. R. (2013). The pathways and properties of the Amazon River plume in the tropical North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 6894–6913. <https://doi.org/10.1002/2013JC008981>.

Dagg, M. Benner, R., Lohrenz, S., Lawrence, D. (2004). Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes *Continental Shelf Res.*, 24 (2004), pp. 833-858.

Danovaro, R., Gambi, C., Dell'Anno, A., Corinaldesi, C., Fraschetti, S., Vanreusel, A., Gooday, A. J. (2008). Exponential decline of deep-sea ecosystem functioning linked to benthic biodiversity loss. *Current Biology*, 18(1), 1-8.

Ducklow, H.W., D.K. Steinberg, and K.O. Buesseler. (2001). Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography* 14(4):50–58, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.06>.

Gaurisas, D. Y., & Bernardino, A. F. (2023). Benthic biogeographic patterns on the deep Brazilian margin. *PeerJ*, 11, e14585. <https://doi.org/10.7717/peerj.14585>.

Gévaudan, M., Durand, F., & Jouanno, J. (2022). Influence of the Amazon-Orinoco discharge interannual variability on the western tropical Atlantic salinity and temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127. <https://doi.org/10.1029/2022JC018495>.

Gooday, A. J. (2002). Biological responses to seasonally varying fluxes of organic matter to the ocean floor: a review. *Journal of Oceanography*, 58(2), 305-332.

Gouveia, N., Gherardi, D., Aragão, L. (2019). The role of the Amazon River plume on the intensification of the hydrological cycle. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 12221-12229. <https://doi.org/10.1029/2019GL084302>.

Gray & Elliott. (2009). *Ecology of Marine Sediments – From Science to Management* (second ed.), Oxford University Press, Oxford.

Jumars, P. A., Wheatcroft, R. A. (1989). Responses of benthos to changing food quality and quantity, with a focus on deposit feeding and bioturbation. *Productivity of the ocean: Present and past*, 235-253.

Lana, P. C.; Camargo, M. G.; Brogim, R. A.; Isaac, V. J. (1996). *O Bentos da Costa Brasileira: avaliação crítica e levantamento*. Rio de Janeiro: FEMAR. 431p.

Lumpkin, R., and Garzoli, S. L. (2005). Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Volume 52, 495-518. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.09.001>.

Marengo, J.A., Williams, E.R., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A. (2016). Extreme Seasonal Climate Variations in the Amazon Basin: Droughts and Floods. In: Nagy, L., Forsberg, B., Artaxo, P. (eds) *Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin*. Ecological Studies, vol 227. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_4.

Moura, R.L., Amado-Filho, G.M., Moraes, F.C., Brasileiro, P.S., Salomon, P.S., Mahiques, M.M., Bastos, A.C., Almeida, M.G., Silva, J.M., Araújo, B.F., Brito, F.P., Rangel, T.P., Oliveira, B.C.V., Bahia, R.G., Paranhos, R.P., Dias, R.J.S., Siegle, E., Figueiredo Jr, A.G., Pereira, R.C., Leal, C.V., Hadju, E., Asp, N.E., Gregoracci, G.B., Neumann-Leitão, S., Yager, P., Francini-Filho, R.B., Fróes, A., Campeão, M., Silva, B.S., Moreira, A.P.B., Oliveira, L., Soares, A.C., Araujo, L., Oliveira, N.L., Teixeira, J.B., Valle, R.A.B., Thompson, C.C., Rezende, C.E., Thompson, F.L. (2016). An extensive reef system at the Amazon River mouth, *Sci. Adv.*, 2 (4), Article e1501252, 10.1126/sciadv.1501252.

Nittrouer, C. A., & DeMaster, D. J. (1996). The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental shelf research*, 16(5-6), 553-573.

Pomory, C.M. & Lares, M.T. (2000). Effects of suspensions and organic enrichment on feeding in suspension-feeding brittle stars. *Marine Ecology Progress Series*, 197, 155–167.

Rogers, C. S. (1990). Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 62(1), 185-202.

Ruhl, S. (2020). Temporal variability in benthic-pelagic exchanges: Seasonal cycles, inter-and multiannual variability, and long-term climate change driven trends (Doctoral dissertation, University of Southampton).

Smith, W. O. Jr., & DeMaster, D. J. (1996). Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: Correlation with seasonal river discharge. *Continental Shelf Research*, 6, 227–244. [http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343\(95\)00007-N](http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343(95)00007-N).

Smith Jr, K. L., Kaufmann, R. S., & Baldwin, R. J. (1994). Coupling of near-bottom pelagic and benthic processes at abyssal depths in the eastern North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 39(5), 1101-1118.

Snelgrove, P. V. R. (1999). Getting to the bottom of marine biodiversity: sedimentary habitats. *BioScience*, v. 49, n. 2, p. 129–138. <https://doi.org/10.2307/1313538>.

Soares, H. S. .; Pestana, S. S.; Barros, M. F. De S.; Sousa, R. R.; Oliveira, V. M. De; Carvalho Neta, R. N. F. (2022). The diversity of benthic macrofauna in Brazil: a bibliographic review. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 13, p. e583111335752. DOI: 10.33448/rsd-v11i13.35752.

Stramma, L., Fischer, J., Brandt, P., Schott, F. (2003). Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic, Elsevier Oceanography Series, Volume 68, 1-22, [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(03\)80141-1](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(03)80141-1).

Subramaniam, A., Yager, P. L., Carpenter, E. J., Mahaffey, C., Bjorkman, K., Cooley, S., et al. (2008). Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 10,460–10,465. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710279105>.

Volk, T. and Hoffert, M.I. (1985). Ocean Carbon Pumps: Analysis of Relative Strengths and Efficiencies in Ocean-Driven Atmospheric CO₂ Changes. In *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present* (eds E.T. Sundquist and W.S. Broecker). <https://doi.org/10.1029/GM032p0099>.

VII. ANEXOS

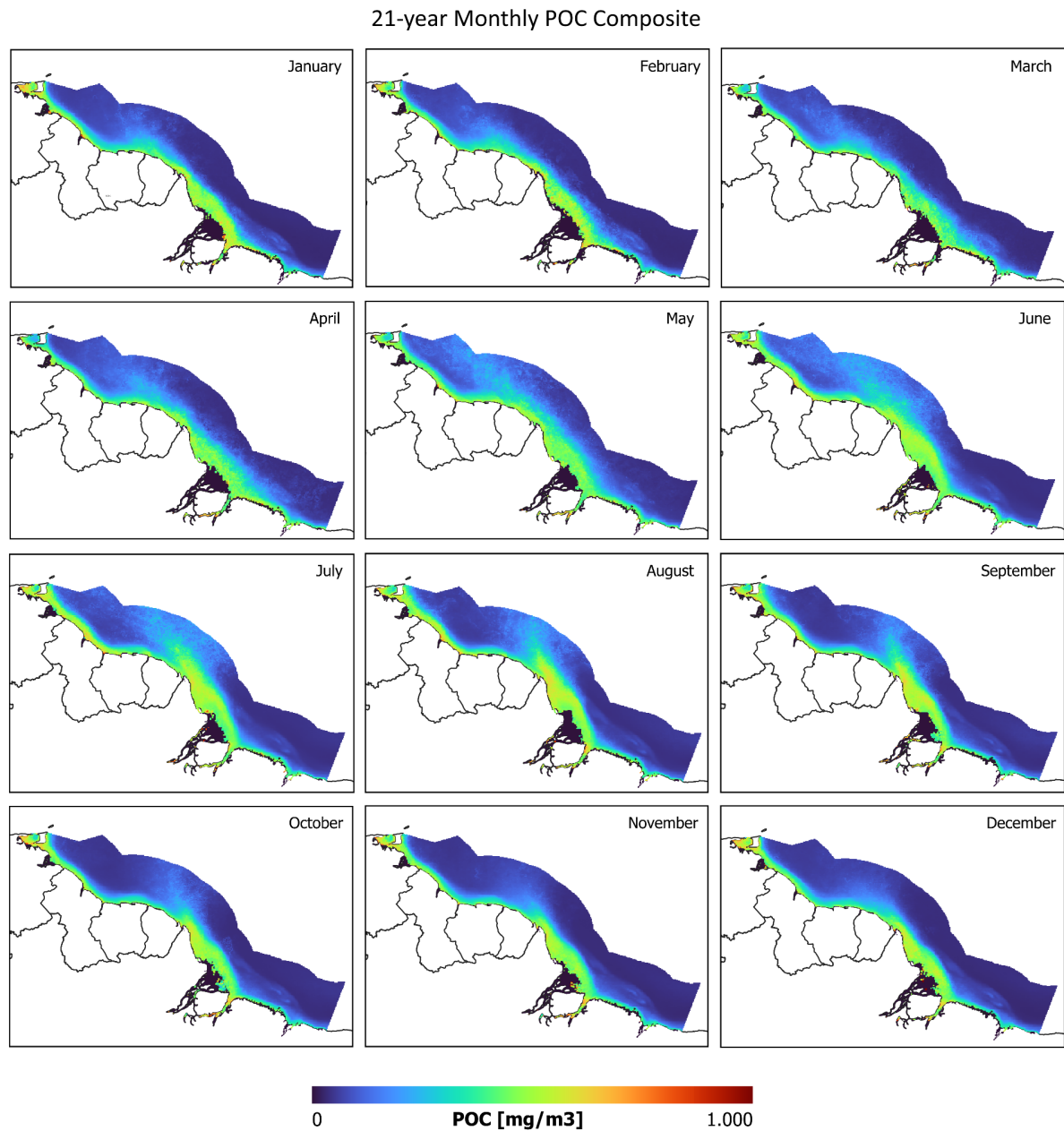


Figure S1. Mean-monthly POC composite for the Amazon and Guianan Continental Shelves (2003 - 2023).