

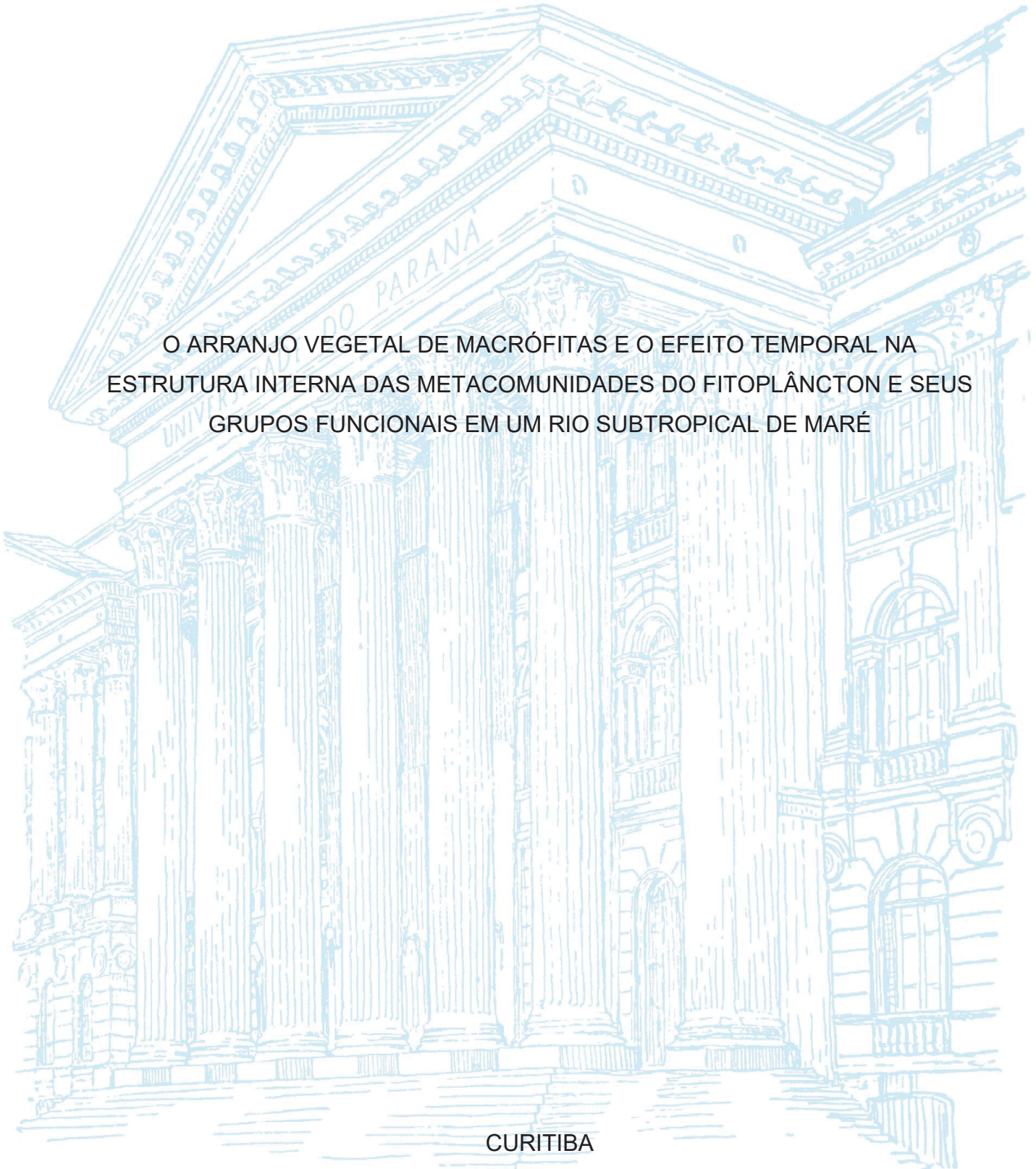
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ANDRADE RODRIGUES

O ARRANJO VEGETAL DE MACRÓFITAS E O EFEITO TEMPORAL NA  
ESTRUTURA INTERNA DAS METACOMUNIDADES DO FITOPLÂNCTON E SEUS  
GRUPOS FUNCIONAIS EM UM RIO SUBTROPICAL DE MARÉ

CURITIBA

2023



LUCAS ANDRADE RODRIGUES

O ARRANJO VEGETAL DE MACRÓFITAS E O EFEITO TEMPORAL NA  
ESTRUTURA INTERNA DAS METACOMUNIDADES DO FITOPLÂNCTON E SEUS  
GRUPOS FUNCIONAIS EM UM RIO SUBTROPICAL DE MARÉ.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Andre Andrian Padial

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Rodrigues, Lucas Andrade.

O arranjo vegetal de macrófitas e o efeito temporal na estrutura interna das metacomunidades do fitoplâncton e seus grupos funcionais em um rio subtropical de maré. / Lucas Andrade Rodrigues. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. André Andrian Padial.

1. Comunidades vegetais – Guaraguaçu, Rio (PR). 2. Ecologia aquática. 3. Variação (Biologia). 4. Microalga. 5. Fitoplâncton. 6. Macrófitas. I. Padial, André Andrian, 1981-. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação. III. Título.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS ANDRADE RODRIGUES** intitulada: **O ARRANJO VEGETAL DE MACRÓFITAS E O EFEITO TEMPORAL NA ESTRUTURA INTERNA DAS METACOMUNIDADES DO FITOPLÂNCTON E SEUS GRUPOS FUNCIONAIS EM UM RIO SUBTROPICAL DE MARÉ**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRE ANDRIAN PADIAL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Julho de 2023.

Assinatura Eletrônica

01/08/2023 10:36:13.0

ANDRE ANDRIAN PADIAL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/08/2023 12:15:24.0

FABIANA SCHNECK

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE)

Assinatura Eletrônica

01/08/2023 11:13:41.0

DANIELLE KATHARINE PETSCH

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST. PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO)

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, minha mãe Maria Fabiana de Andrade Rodrigues, que mesmo diante de todas as dificuldades da vida, sempre me tratou com muito carinho e amor. Você enfrentou muitos dos preconceitos da sociedade, sendo negra e pobre, e que não teve tantas oportunidades. No entanto, nunca desistiu de buscar uma vida melhor, principalmente pensando em mim e minha irmã. Você sempre fez questão de que eu não faltasse um dia sequer à escola. Naquela época, ainda criança, eu não tinha plena noção da importância desse gesto e do valor que você dava à minha educação, tanto na escola quanto em casa. Sua calma e serenidade combinam muito comigo, tanto que costumo dizer que me pareço muito com você. Desde criança, sou muito apegado a você e sempre quis ser mais parecido com você. Seu sorriso enche meu coração de alegria, e ver você feliz me faz feliz também. Meu coração fica aflito por não poder estar pertinho de você e aproveitar da sua comida caseira, que eu amo. Eu a considero um exemplo de mulher, mesmo após tantas perdas e momentos difíceis, você continua seguindo em frente. Te amo muito, minha mãe.

Também dedico esta dissertação ao meu pai, Elson Aragão Rodrigues. Quando criança, eu o olhava com respeito, mas à medida que fui crescendo, passei a admirá-lo. Sempre com um sorriso no rosto, você passava alegria para as pessoas ao seu redor. Você me ensinou a ser uma pessoa ética e justa consigo mesmo, não apenas por meio de suas conversas, mas também através de suas atitudes. Lembro dos momentos em que íamos trabalhar juntos, viajando para as fazendas do interior, e da sua empatia com as pessoas mais humildes. Você tinha um coração generoso e nunca negava ajuda a quem precisasse. Sua partida repentina nos pegou desprevenidos, pois você era o pilar central de nossa família. No entanto, você construiu uma base sólida e nós continuamos unidos mesmo após sua partida. A dor de sua ausência é algo que o tempo não pode apagar. Estou estudando longe do conforto de casa, em um lugar com uma cultura diferente, mas carrego comigo todos os ensinamentos, lembranças, histórias e alegria. Gostaria que você estivesse aqui comigo para poder compartilhar esses momentos. Eu sempre te amarei, meu amigo, meu patrão, meu professor, meu pai.

## AGRADECIMENTOS

Quero dar início aos meus agradecimentos, em primeiro lugar, à minha família: minha mãe Fabiana, meu pai Elson e minha irmã Jéssica. Agradeço por todo o carinho e por proporcionarem um ambiente familiar repleto de amor. Vocês tornaram minha infância mais feliz e sempre me fizeram sentir que tenho um porto seguro. Saber que posso contar com cada um de vocês a qualquer momento é algo muito especial.

Agradeço aos meus amigos que estiveram comigo no início da minha graduação: Gabriele, Graciele, Dávila e Marcela. Juntos nós compartilhamos anseios e dificuldades nas disciplinas, assim como momentos de alegria, como nossas saídas, principalmente para comer. Também agradeço ao Danilo e, especialmente, ao Samuel, que foram muito importantes e fizeram parte dessa jornada.

A todos os meus professores que me ensinaram muito e acreditaram que eu poderia alcançar voos mais altos na vida acadêmica, gostaria de expressar minha gratidão. Em especial, agradeço a Bianca Terra por me mostrar a ecologia de uma forma única e por despertar em mim uma paixão por essa área. Também sou grato ao Kaoli Cavalcante, por seu constante apoio em minhas decisões e por ser uma pessoa incrível tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

Aos meus xarás Lucas Fernandes e Lucas Cavalcante, que durante o período da pandemia, unidos pelo amor aos jogos de tabuleiro, encontramos um refúgio contra o isolamento e fortalecemos nossos laços de amizade.

Um agradecimento especial à minha companheira Ana Márcia, que desde o início da minha graduação está comigo. Você é uma pessoa que me conhece muito bem, e queria te agradecer por me permitir compartilhar todos esses anos ao seu lado. Estar ao lado de uma pessoa com um coração tão bom nos faz refletir e nos tornar melhores. Sempre digo que mudei bastante e hoje sou uma pessoa melhor por sua causa. Ainda vamos realizar muitos dos nossos sonhos, e desejo todas as coisas boas do mundo para você. Te amo muito.

Ao meu orientador Andre Andrian, agradeço por aceitar o desafio de iniciar uma orientação remota a um aluno que mal conhecia, em meio de uma pandemia. Calmo e compreensivo e sempre disposto a ajudar e a aconselhar da melhor forma,

tanto nas disciplinas quanto na orientação do meu mestrado. Nossas conversas são sempre de grande aprendizado, e tudo é conduzido de maneira leve e prazerosa.

Aos meus amigos de laboratório, Alejandro, Juliana, Fernando, Elena e Letícia, que estiveram presentes comigo durante as horas de trabalho no laboratório. Agradeço pelas conversas e pela companhia nas horas do almoço no RU, assim como pelas partidas de feijãozinho com aquele cafezinho, os quais sinto bastante falta.

Ao meu amigo Hugo, que me recebeu na universidade desde o início. Durante as coletas que realizamos juntos, ele mostrou-se uma pessoa muito feliz e bem-humorada, sempre disposto a ajudar.

Um agradecimento especial a Maria Clara e José Ricardo, que me acolheram em Curitiba e tornaram minha estadia durante esse breve período de mestrado inesquecível. Nos aproximamos bastante na ecologia de campo, e durante esse tempo em que eu não estava me sentindo muito bem, vocês me ajudaram a esquecer os problemas por um tempo. Quero agradecer por estarem sempre ao meu lado nos momentos difíceis e nos momentos felizes. Amo vocês demais.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

## RESUMO

O estudo das distribuições de espécies em metacomunidades é crucial para compreender as respostas dos fenômenos naturais em diferentes escalas. No entanto, pouco se sabe sobre efeitos de co-relação entre os grupos biológicos do mesmo nível trófico. As macrófitas aquáticas são organismos que habitam ecossistemas aquáticos e desempenham funções vitais, como absorção de nutrientes da água e criação de um ambiente adequado para a manutenção de outros organismos, como as microalgas do fitoplâncton. As microalgas, por sua vez, são adaptadas a ambientes aquáticos e apresentam diversidade notável em formas e tamanhos. Ecologicamente, o fitoplâncton desempenha um papel crucial na regulação da exploração de diversas fontes de nutrientes e serve como base da cadeia alimentar em muitos ambientes aquáticos. O rio Guaraguaçu, localizado na bacia hidrográfica litorânea paranaense, foi o local deste estudo. As coletas de fitoplâncton e macrófitas foram realizadas no inverno e verão durante três anos em 16 pontos ao longo do rio Guaraguaçu, localizado na bacia hidrográfica litorânea paranaense. As microalgas foram identificadas e classificadas de acordo com seus grupos funcionais, enquanto as macrófitas tiveram suas características funcionais medidas e sumarizadas em uma matriz ambiental. Para analisar a estrutura da comunidade, utilizou-se o modelo de regressão multivariada JSDMs (Joint Species Distribution Models), que examina as contribuições ambientais das espécies, sua autocorrelação espacial e a covariância entre elas. Durante o verão, foi observada uma contribuição significativa da estrutura da comunidade fitoplanctônica relacionada ao ambiente, possivelmente ligada à estruturação vegetal das macrófitas. O grupo funcional mais abundante foi o grupo MP, e houve uma diminuição na diversidade de grupos funcionais durante essa estação. As correlações entre as espécies revelaram diferenças nas relações entre diferentes setores do rio. Esses resultados destacam a importância do monitoramento de longo prazo para compreender as mudanças nas comunidades fitoplanctônicas e as interações entre as espécies. Além disso, o uso de novas ferramentas de análise de comunidades biológicas e a integração de múltiplos organismos são cruciais para obter uma visão mais completa das dinâmicas das metacomunidades e dos ecossistemas.

Palavras-Chave: Comunidades, Variação temporal, Gradiente ambiental, Co-distribuição

## ABSTRACT

The study of species distributions in metacommunities is crucial for understanding the responses of natural phenomena at different scales. However, little is known about the co-occurrence effects among biological groups at the same trophic level. Aquatic macrophytes inhabit aquatic ecosystems and play vital roles such as nutrient absorption from the water and creating a suitable environment for maintaining other organisms, such as microalgae from the phytoplankton. Microalgae, in turn, are adapted to aquatic environments and exhibit remarkable diversity in forms and sizes. Ecologically, phytoplankton plays a crucial role in regulating the exploitation of various nutrient sources and serves as the foundation of the food chain in many aquatic environments. The Guaraguaçu River, located in the coastal watershed of Paraná, was the site of this study. Phytoplankton and macrophyte collections were carried out in winter and summer over three years at 16 points along the Guaraguaçu River in the coastal watershed of Paraná. Microalgae were identified and classified according to their functional groups, while macrophytes had their functional traits measured and summarized in an environmental matrix. The Joint Species Distribution Models (JSDMs) multivariate regression model was used to analyze the community structure, which examines the environmental contributions of species, their spatial autocorrelation, and covariance between them. During the summer, a significant contribution of the phytoplankton community structure related to the environment was observed, possibly linked to the vegetation structure of the macrophytes. The most abundant functional group was the MP group, and there was a decrease in the diversity of functional groups during this season. Species correlations revealed differences in relationships between different sectors of the river. These results highlight the importance of long-term monitoring to understand changes in phytoplankton communities and species interactions. Furthermore, using new tools to analyze biological communities and integrate multiple organisms is crucial for obtaining a more comprehensive understanding of metacommunity dynamics and ecosystems.

Keywords: Communities, Temporal Variation, Environmental Gradient, Co-Distribution.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 – Bacia litorânea do Paraná: em azul, está destacado o Rio Guaraguaçu. As formas dos pontos indicam diferentes zonas (setores). Em destaque em verde, está a Estação Ecológica do Guaraguaçu..... 19
- FIGURA 2 – Gráficos ternários descrevendo os três componentes da estrutura interna da metacomunidade e a distribuição dos grupos funcionais do fitoplâncton em cada período do ano para cada ano de amostragem. As cores dos grupos funcionais correspondem a seu gráfico específico (veja os grupos funcionais na Tabela 1). Cada ponto representa uma espécie diferente na metacomunidade. A localização do ponto indica a importância da variação atribuída a cada fator: ambiental (inferior esquerdo), autocorrelação espacial (inferior direito) e co-distribuição (superior).....24
- FIGURA 3 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o verão de 2017. As cores representam os grupos funcionais, e a identidade desses estão destacados com letras maiúsculas antes do nome das espécies. A barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas. Veja a tabela completa das espécies em Material Suplementar, e a tabela dos grupos funcionais em Métodos).....26
- FIGURA 4 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o inverno de 2017. As cores representam os grupos funcionais, e a identidade desses estão destacados com letras maiúsculas antes do nome das espécies. A barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas. Veja a tabela completa das espécies em Material Suplementar, e a tabela dos grupos funcionais em Métodos). .....27
- FIGURA 5 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o verão de 2019. As cores representam os grupos funcionais, e a identidade desses estão destacados com letras maiúsculas antes do nome das espécies. A barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas.

Veja a tabela completa das espécies em Material Suplementar, e a tabela dos grupos funcionais em Métodos).....28

FIGURA 6 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o verão de 2017. As cores representam os agrupamentos que indicam a presença de cada espécie nos respectivos setores em que elas foram identificadas, enquanto a barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas.....29

FIGURA 7 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o inverno de 2017. As cores representam os agrupamentos que indicam a presença de cada espécie nos respectivos setores em que elas foram identificadas, enquanto a barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas. ....30

FIGURA 8 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o verão de 2019. As cores representam os agrupamentos que indicam a presença de cada espécie nos respectivos setores em que elas foram identificadas, enquanto a barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas.....31

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – GRUPOS FUNCIONAIS E SEUS MODELOS DE HABITAT .....	20
TABELA 2 – LISTA DE ESPÉCIES DAS COMUNIDADES DO FITOPLANCTÔNICAS DO RIO GUARAGUAÇU E SEUS GRUPOS FUNCIONAIS .....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>18</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO .....	18
2.2 COLETA DO FITOPLÂNCTON .....	20
2.3 COLETA DAS MACRÓFITAS E VARÁVEIS AMBIENTAIS .....	22
2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	22
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>23</b>
3.1 CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS ESPÉCIES CONSIDERANDO OS GRUPOS FUNCIONAIS .....	25
3.2 CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS ESPÉCIES DE ALGAS PARA OS SETORES DO RIO GUARAGUAÇU .....	29
<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>
3.3 ESTRUTURA INTERNA DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA .....	32
3.4 CORRELAÇÃO DAS ESPÉCIES POR GRUPO FUNCIONAL .....	33
3.5 CORRELAÇÃO DAS ESPÉCIES POR DIFERENTES REGIÕES DO RIO .....	34
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>38</b>
<b>MATERIAL SUPLEMENTAR</b> .....	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais questões a serem respondidas nos estudos ecológicos é como e porque uma espécie está presente em um determinado local, e assim compreender os padrões de distribuição das espécies (BORREGAARD; RAHBEK, 2010). A presença ou ausência de uma espécie em um determinado ambiente pode ser consequência de uma interação de fatores, como filtro ambiental, limitação de dispersão ou interações bióticas como competição e facilitação (CADOTTE; TUCKER, 2017). A formação da metacomunidade pode ser definida como o conjunto de comunidades locais conectados pela dispersão de espécies (DALLAS, 2014; LEIBOLD; HOLYOAK; MOUQUET; AMARASEKARE *et al.*, 2004). Entender a importância dos processos ambientais e espaciais na estruturação das comunidades é o principal objetivo da abordagem de metacomunidade (LEIBOLD; HOLYOAK; MOUQUET; AMARASEKARE *et al.*, 2004). Neste contexto, a distribuição das espécies em metacomunidades é uma importante aliada na compreensão de padrões entre comunidades locais e regionais em ambientes distintos, pois podem evidenciar a diferenciação nas respostas de fenômenos naturais em diferentes escalas (CASTILLO-ESCRIVÀ; MESQUITA-JOANES; RUEDA, 2020; LI; TONKIN; MENG; LIU *et al.*, 2022; LEIBOLD; HOLYOAK; MOUQUET; AMARASEKARE *et al.*, 2004). Recentemente, muitos estudos têm discutido também o papel de interações ecológicas com outros organismos na organização de metacomunidades (KOEHL, 2022).

Várias abordagens integram um ou múltiplos grupos biológicos em estudos de metacomunidades aquáticas (HEINO; MELO; SIQUEIRA; SOININEN *et al.*, 2015; PADIAL; CESCHIN; DECLERCK; DE MEESTER *et al.*, 2014; DE ALMEIDA CAMPELO, 2013; FRANÇA; MELO; OLIVEIRA; REIS *et al.*, 2010). Entretanto, ainda pouco se discute o possível efeito interativo entre grupos biológicos de um mesmo nível trófico. Um exemplo é a ocorrência de macrófitas aquáticas e microalgas, ambos importantes produtores primários em ecossistemas aquáticos. As macrófitas aquáticas (ou plantas aquáticas) habitam diferentes ecossistemas aquáticos, têm a capacidade de absorver nutrientes da água e também fornecem um ambiente favorável para a colonização de outros organismos, como microalgas (que compõem o fitoplâncton). Essas, por sua vez, são adaptadas a ambientes aquáticos abertos e

apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos (REYNOLDS; IRISH, 1997). Há muito tempo já tem se reconhecido que as macrófitas possuem a capacidade de alterar a estrutura das comunidades de fitoplâncton, exercendo influência sobre a seleção e dominância das espécies presentes nessas comunidades. Essas interações entre as espécies de macrófitas são consideradas indicativas de mudanças na estrutura da comunidade fitoplanctônica (JASSER, 1995; JUPP; SPENCE, 1977). Apesar disso, os estudos com metacomunidades de fitoplâncton geralmente focam no papel das características físico-químicas do ambiente aquático (BORICS; TÓTHMÉRÉSZ; VÁRBÍRÓ; GRIGORSZKY *et al.*, 2016; NASELLI-FLORES; BARONE, 2000).

O fitoplâncton é importante por sua função regulatória na exploração de fontes alternativas de nutrientes, e por ser a base da cadeia alimentar em muitos ambientes aquáticos (REYNOLDS; IRISH, 1997). Além disso, o fitoplâncton é capaz de se estabelecer em diversos ecossistemas aquáticos devido à sua diversidade e adaptabilidade às diferentes condições ambientais, como clima, temperatura, luz e propriedades químicas da água (ZOHARY; PADISÁK; NASELLI-FLORES, 2010; IRIGOIEN; HUISMAN; HARRIS, 2004). A proporção dos grupos fitoplanctônicos em um ambiente aquático pode indicar seu estado ambiental, afetando sua absorção de carbono, taxa fotossintética e crescimento (AHMED; MADHUSOODHANAN; YAMAMOTO; FERNANDES *et al.*, 2022; ESTIFANOS; GEBRE-MESKEL; HAILU, 2022). Além das suas características ecológicas, o fitoplâncton apresenta uma grande diversidade filogenética e funcional, que pode ser mensurada por meio de diferentes grupos funcionais. (AMORIM; MOURA, 2022; MABERLY; CHAO; FINLAY, 2022).

Nesse sentido, o uso da morfologia taxonômica é um bom preditor para a classificação dos grupos funcionais do fitoplâncton que podem ser correlacionados com as diferentes condições ambientais (KRUK; DEVERCELLI; HUSZAR; HERNANDEZ *et al.*, 2017). A diversidade de grupos funcionais pode não apresentar uma grande diversidade em características taxonômicas, mas pode possuir funções que influenciam o ecossistema. A maior diversidade funcional pode ser medida pela variedade de grupos funcionais presentes (TILMAN, 2001). É entendido que avaliar os elementos funcionais, como diversidade funcional, valor funcional e composição dos grupos funcionais, pode proporcionar uma compreensão mais clara da dinâmica

do ecossistema do que apenas o número de espécies (DÍAZ; CABIDO, 2001). Diferentes distúrbios podem ser evidenciados quando analisamos a estrutura funcional das comunidades biológicas no ambiente (MOUILLOT; GRAHAM; VILLÉGER; MASON *et al.*, 2013; DÍAZ; LAVOREL; MCINTYRE; FALCZUK *et al.*, 2007). Alguns estudos utilizando fitoplâncton já demonstraram que é possível obter respostas significativas sobre diferentes ambientes aquáticos, como nível de poluição e qualidade da água, ao resumir a diversidade funcional em grupos funcionais (WU; WANG; WANG; LI *et al.*, 2023; AMORIM; MOURA, 2022; ABONYI; LEITAO; LANÇON; PADISÁK, 2012).

Uma das maneiras de avaliar a estrutura de comunidades é através do estudo de seus elementos, como proposto por Leibold & Mikkelsen (2002). O **framework** analisa a interação entre *Coherence*, *Turnover* e *Boundary clumping*, que podem assumir seis padrões diferentes. Os padrões mais comumente encontrados nas comunidades são os padrões aninhados e Clementsianos. Além desses, existem também padrões aleatórios, em tabuleiro de xadrez, gradiente espaçado e gleasoniano (HENRIQUES-SILVA; LINDO; PERES-NETO, 2013). Os modelos SDMs (“species distribution models”) exploram a ocorrência geográfica das espécies e as variáveis ambientais com o objetivo de construir uma estrutura de comunidades (SRIVASTAVA; LAFOND; GRIESS, 2019; NAIMI; ARAÚJO, 2016). As análises mais utilizadas para estudar as metacomunidades têm como foco a explicação dos atributos globais da metacomunidade, incluindo a diversidade alfa, beta e gama, bem como o particionamento de sua variação composicional (LEIBOLD; RUDOLPH; BLANCHET; DE MEESTER *et al.*, 2022).

As abordagens clássicas consideram que os processos atuam de maneira semelhante em todas as espécies e locais dentro de uma comunidade, sendo afetados principalmente por condições ambientais e espaciais. Esses padrões, que determinam a distribuição das espécies com base em processos gerais para a metacomunidade, são definidos como estrutura externa da metacomunidade. Modelos como JSJM (“joint species distribution models”) são propostos para avaliar a estrutura interna, que se refere à estimativa da contribuição individual de cada espécie, levando em consideração os efeitos ambientais, espaciais e de co-distribuição (LEIBOLD; RUDOLPH; BLANCHET; DE MEESTER *et al.*, 2022).

A estrutura de análises metacomunitárias é um processo complexo que envolve diversos fatores, mas é comumente estudado de forma fragmentada, atribuindo sua formação a fatores ambientais e espaciais (LEIBOLD; RUDOLPH; BLANCHET; DE MEESTER *et al.*, 2022). Os efeitos ambientais, assim como as interações bióticas, que ocorrem constantemente exercem pressões que afetam a permanência dos indivíduos em seus habitats (CADOTTE; TUCKER, 2017). Entretanto, ainda é pouco compreendido a questão de múltiplas espécies interagindo entre si e moldando sua dinâmica de estruturação (URBAN; LEIBOLD; AMARASEKARE; DE MEESTER *et al.*, 2008). Dessa forma, torna-se necessário adotar novas perspectivas tanto nos processos quanto nas metodologias para compreender melhor os padrões biogeográficos das espécies (BYERS; CUDDINGTON; JONES; TALLEY *et al.*, 2006; HUISMAN; WEISSING, 1995). Com base nessas novas perspectivas, métodos que utilizam gradientes bióticos e grupos funcionais em abordagens híbridas estão sendo amplamente utilizados (WISZ; POTTIER; KISSLING; PELLISSIER *et al.*, 2013). A modelagem conjunta de espécies (JSDM) é um modelo em desenvolvimento que analisa dados de comunidades de forma combinada com covariáveis ambientais, características das espécies e relações filogenéticas em um contexto espacial e temporal (OVASKAINEN; ABREGO, 2020). Visto isso, os objetivos deste trabalho foram: 1) Identificar os grupos funcionais fitoplanctônicos; 2) Utilizar a estrutura vegetal das macrófitas para avaliar as variações espaciais e temporais do fitoplâncton; 3) Avaliar a estrutura interna da metacomunidade fitoplanctônica em um rio subtropical de maré caracterizado por um grande gradiente ecológico em uma pequena extensão espacial: o rio Guaraguaçu, Paraná, Brasil.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

Localizado na bacia hidrográfica litorânea paranaense, o Rio Guaraguaçu atravessa os municípios de Pontal do Paraná, Paranaguá e Matinhos, no sul do estado do Paraná, no Brasil. Sua nascente se encontra na Serra do Mar, a 766 metros acima do nível do mar. Ele se estende por uma área de 395,5 km<sup>2</sup> e deságua na Baía de Paranaguá, sendo o maior rio da Bacia Costeira do Paraná. O clima dessa região é tropical úmido, com uma média de chuvas superior a 1000 mm distribuídas ao longo do ano, sendo julho o mês mais seco e fevereiro o mais chuvoso (TREMARIN; LUDWIG; MOREIRA FILHO, 2008; VITULE; UMBRIA; ARANHA, 2006). Na região de sua bacia hidrográfica estão incluídas áreas de proteção ambiental, sendo elas a APA de Guaratuba e a estação ecológica do Rio Guaraguaçu, o que reforça a importância da conservação de toda a sua extensão hídrica e áreas adjacentes. O Rio Guaraguaçu representa uma área crítica para a conservação, sendo um *hotspot* da Mata Atlântica (DA SILVA ARAÚJO; VITULE; PADIAL, 2021) e é o principal rio de água doce de uma região reconhecida pela Unesco como Patrimônio Mundial: o complexo estuarino conhecido como Lagamar (veja <https://whc.unesco.org/en/list/>).

O rio Guaraguaçu ilustra bem a dinâmica dos ambientes aquáticos e suas rápidas mudanças (REIS; FRANÇA; MOTYL; CORDEIRO *et al.*, 2015; VITULE, 2008). Ele possui um curso sinuoso afetado pelo regime de marés, com mistura gradual de água doce e salgada na sua foz e variações do nível da água de até três metros devido ao avanço e recuo das marés (SATO; COSTA; PADIAL, 2021; VITULE, 2008). O rio exibe um marcante gradiente ambiental e flui por áreas praticamente intocadas, como a região do caixetal, onde a árvore *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC. domina o ambiente. Essa vegetação circundante contribui para a presença de compostos orgânicos nessa porção, conferindo-lhes características ácidas e coloração mais escura em suas águas. Na porção intermediária, é evidente o impacto humano, devido à alta densidade populacional nas margens, que culmina no despejo de esgoto e intensa atividade pesqueira, além da presença de um aterro sanitário desativado localizado nas proximidades de um de seus afluentes nesta região. À jusante, a porção do rio é caracterizada por

ecossistemas de mangue com baixa degradação e maior salinidade (SAMPAIO; FERREIRA; LUDWIG; PADIAL, 2023; DA SILVA ARAÚJO; VITULE; PADIAL, 2021; SINGO; DE ARAÚJO-RAMOS; DA ROCHA, 2020). Esse gradiente ambiental pronunciado é evidenciado na distribuição das comunidades de macrófitas ao longo do rio. No entanto, ambientes tão dinâmicos como esse ainda são pouco estudados em relação às respostas conjuntas das comunidades, mas as evidências indicam que as comunidades aquáticas respondem de forma marcada ao gradiente ecológico (GALVANESE; COSTA; ARAÚJO; FALKIEVICZ *et al.*, 2022).

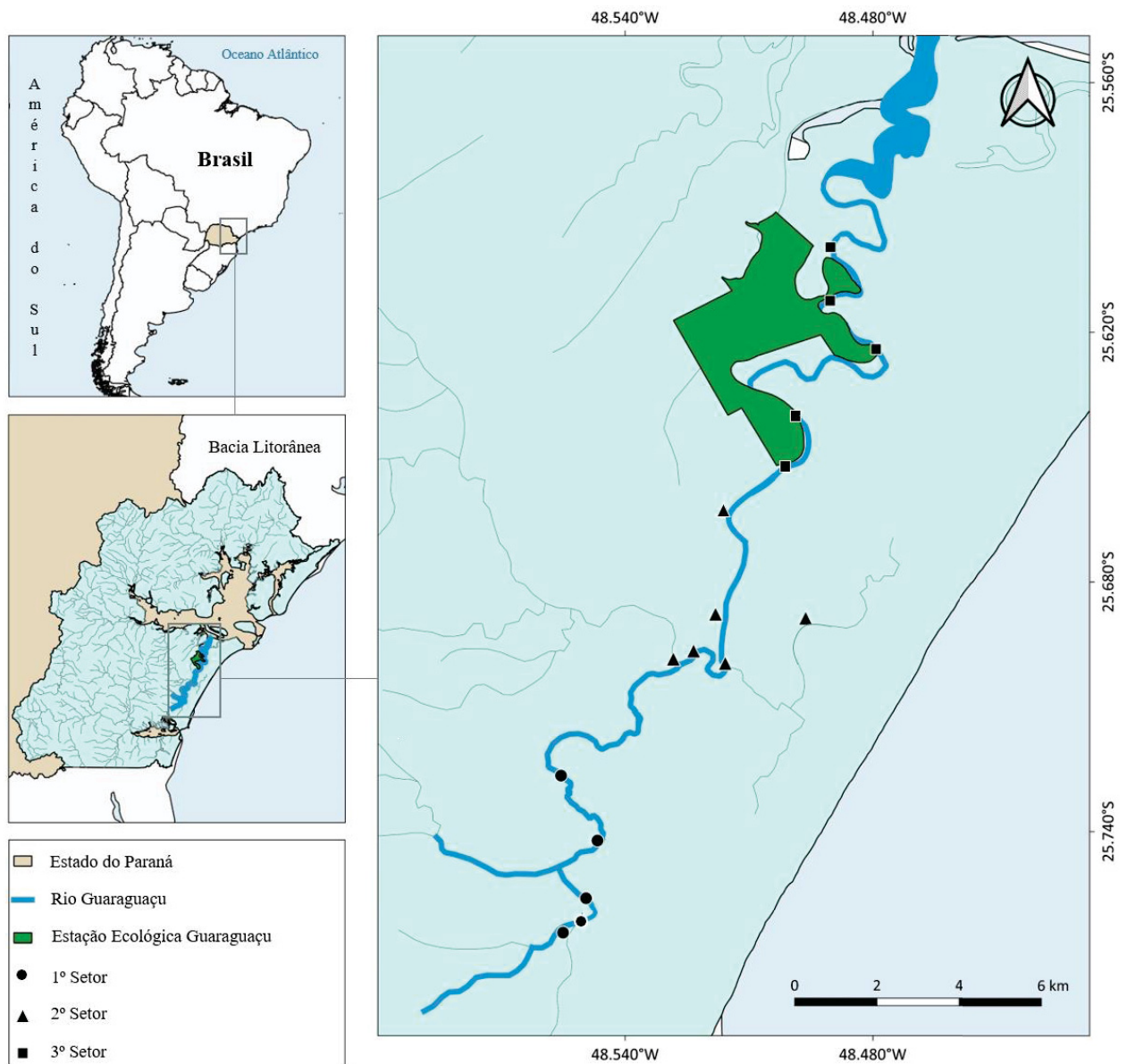


FIGURA 1 – Bacia litorânea do Paraná: em azul, está destacado o Rio Guaraguaçu. As formas dos pontos indicam diferentes zonas (setores). Em destaque em verde, está a Estcao Ecológica do Guaraguaçu.

## 2.2 COLETA DO FITOPLÂNCTON

As coletas do fitoplâncton foram realizadas em 16 locais ao longo do rio Guaraguaçu, filtrando 200 litros de água em uma rede fitoplanctônica de 20 µm. O balde utilizado para a coleta tinha capacidade para 10 litros de água, que foram despejados na rede fitoplanctônica. As concentrações das amostras foram armazenadas em potes de plástico de 100 mL e adicionadas a uma solução de Lugol acético a 10% para preservação. As coletas foram distribuídas em seis períodos, sendo março e abril de 2017, 2018 e 2019 (final do verão no hemisfério sul) e setembro e outubro de 2017, 2018 e 2019 (final do inverno no hemisfério sul). Para a análise quantitativa do fitoplâncton, foi utilizado o método de Utermöhl (1958). As células foram contadas em câmaras de sedimentação utilizando um microscópio de luz invertida Olympus IX70 com um aumento de 600X, até que a curva de rarefação das espécies fosse alcançada (BICUDO, 1990). Os táxons foram identificados até o nível mais baixo possível, utilizando bibliografia especializada e artigos atuais. As densidades do fitoplâncton foram estimadas em células por mililitro, de acordo com Ross (1979). Os grupos funcionais de Reynolds foram classificados de acordo com Kruk et al (2017) e Padisák et al (2009). Embora esse modelo não leve em consideração as características ambientais das condições locais, essa classificação representa com precisão os grupos funcionais do fitoplâncton presente nas amostras (KRUK; DEVERCELLI; HUSZAR; HERNANDEZ *et al.*, 2017).

TABELA 1 – GRUPOS FUNCIONAIS E SEUS MODELOS DE HABITAT

<b>Grupo Funcional</b>	<b>Modelo de Habitat</b>
A	Águas mais claras, profundas e com baixa concentração de nutrientes e espécies sensíveis ao aumento do pH.
C	Ambientes eutróficos, com espécies sensíveis ao início da estratificação.
D	Águas rasas e turvas, incluindo rios.
E	Ambientes pequenos mais rasos, pobres e mais básicos, ou heterotróficos.
F	Ambientes meso-eutróficos com águas mais claras, profundas e misturadas.
G	Ambientes ricos em nutrientes, colunas de água estagnada; ambientes eutróficos e estáveis.
H1	Ambientes eutróficos, tanto estratificados quanto rasos, com baixo teor de nitrogênio.
J	Ambientes rasos, misturados e altamente enriquecidos (incluindo

<b>Grupo Funcional</b>	<b>Modelo de Habitat</b>
	muitos rios de baixo gradiente).
LM	Ambientes pequenos a médios, eutróficos a hipertóficos.
LO	Ambientes profundos e rasos, oligotróficos a eutróficos, de médio a grande porte.
M	Ambientes como corpos d'água de pequeno a médio porte, eutróficos a hipertóficos.
MP	Ambientes rasos frequentemente agitados e turvos de forma inorgânica.
NA	Ambientes oligo-mesotróficos, latitudes mais baixas, com espécies sensíveis à desestratificação.
P	Semelhante ao do código N, mas em estados tróficos mais elevados. (Camadas mistas ou contínuas de 2-3 metros de profundidades).
S1	Ambientes mistos turvos. Este grupo inclui apenas cianoprocariontes adaptados à sombra.
S2	Águas quentes, rasas e frequentemente altamente alcalinas.
T	Águas com camadas contínuas e misturadas, restrição limitante da luz nas camadas e, portanto, ambientes mistos ópticamente profundos.
TB	Ambientes altamente lóticos (rios e riachos).
TC	Águas paradas eutrofizadas ou rios de fluxo lento com macrófitas emergentes.
W1	Ambientes com águas temporárias, águas ricas em matéria orgânica principalmente proveniente de criação de animais ou esgotos.
W2	Águas meso-eutróficas, incluindo ambientes temporários, e lagos rasos.
W0	Ambientes de rios e lagoas com teor extremamente alto de matéria orgânica, imprópria para a maioria da biota aquática.
WS	Ambiente com águas ricas em matéria orgânica proveniente da decomposição de material vegetal (ambientes húmicos), mas não ácidas.
X3	Ambientes rasos e bem misturados oligotróficos.

É importante destacar que, devido ao tamanho da malha utilizada nas coletas, táxons menores podem passar por ela, excluindo assim algumas espécies do nanoplâncton e representando apenas espécies maiores da comunidade fitoplanctônica. Ao longo do texto, referimos à nossa comunidade planctônica e microplanctônica como fitoplanctônica para facilitar o entendimento. O objetivo deste trabalho é comparar as mudanças das comunidades, sendo assim todas as coletas foram padronizadas entre si para garantir a comparabilidade dos resultados. A não padronização das coletas enviesaria os resultados, tornando-os inutilizáveis para fins comparativos. Embora nossas coletas possam excluir espécies com tamanho menor da comunidade devido às limitações no esforço de amostragem, todas elas são comparáveis por seguir uma mesma padronização. Tendo isso em mente, no período de março/abril de 2018, realizamos uma amostragem de um litro de água

não filtrada em cada ponto de coleta usando uma garrafa plástica escura. A maioria dos táxons encontrados nessa amostragem também foi observada nas amostragens realizadas usando redes. Portanto, a técnica de amostragem, filtrando 200L de água em uma rede de 20  $\mu\text{m}$ , representa adequadamente a comunidade fitoplanctônica do rio Guaraguaçu. Além disso, não foram encontradas mudanças significativas na composição das comunidades entre as duas amostragens (veja também SAMPAIO; FERREIRA; LUDWIG; PADIAL, 2023).

### 2.3 COLETA DAS MACRÓFITAS E VARÁVEIS AMBIENTAIS

As macrófitas foram coletadas em 16 pontos do rio, de forma análoga à coleta do fitoplâncton. As espécies foram identificadas até o nível mais baixo possível. A abundância das espécies identificadas foi estimada utilizando a classificação de Braun-Blanquet dentro de uma extensão de 50 metros que abrangia a ocupação das macrófitas. Para cada espécie, foram medidas as seguintes características funcionais: comprimento da raiz (cm), comprimento da folha (cm), largura (cm), área foliar ( $\text{cm}^2$ ), comprimento do pecíolo (cm), largura do caule (cm) e grau de herbivoria, considerando a porcentagem de área foliar afetada. A forma de vida das espécies foi classificada como emergente, flutuante enraizada, flutuante livre, submersa enraizada, submersa livre, anfíbia ou epífita. Esses dados foram ordenados e resumidos em uma matriz ambiental, juntamente com outras variáveis, como salinidade, extensão do trecho do rio, número de estruturas humanas, condutividade, turbidez e temperatura.

### 2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a análise da estrutura interna da comunidade, empregamos o modelo de regressão multivariada conhecido como JSDMs (“Joint Species Distribution Models”). Esse modelo detalha as influências ambientais das espécies, sua autocorrelação espacial e a covariância entre elas. Neste estudo em particular, utilizamos a estrutura vegetal das macrófitas, ou seja, suas características funcionais e estruturais resumidas em fatores de influência ambiental, para analisar a

comunidade fitoplanctônica. Segundo Ovaskainen & Abrego (2020). Uma das principais diferenças em relação aos modelos SDMs (“species distribution models”) é que o modelo JSDBMs fornece ajustes individuais para cada espécie, considerando suas respostas isoladas representando assim a estrutura interna da comunidade. Essa representação é resumida em um gráfico ternário, no qual cada ponto corresponde a uma espécie e possui valores específicos para cada um dos três componentes mencionados (ambiente, autocorrelação espacial e co-distribuição). Dessa forma, é possível avaliar a contribuição para cada espécie em relação a esses componentes. Já os SDMs assumem que as espécies compartilham respostas semelhantes às variações ambientais evidenciando a estrutura externa da comunidade. Os grupos funcionais e a classificação por setores foram incluídos no modelo para revelar padrões em sua estruturação da comunidade dentro de suas correlações, considerando as espécies do fitoplâncton em cada ano e período.

### **3 RESULTADOS**

No verão de 2017, a maioria das espécies de algas estava distribuída na porção inferior esquerda, o que indica que elas apresentam maior resposta às variáveis ambientais que resumem a estrutura vegetal das macrófitas (Figura 2). No entanto, no inverno deste ano, as espécies assumiram outra configuração, com a maioria delas apresentando valores maiores para a autocorrelação espacial e outras espécies em co-distribuição. Houve um aumento no número de grupos funcionais entre os dois períodos: 14 grupos funcionais foram registrados no verão e 19 no inverno. Os grupos funcionais H1e e W0 estavam presentes no verão, mas não foram registrados no inverno (veja descrição dos grupos funcionais na tabela 1). Por outro lado, os grupos A, C, D, E, L0, WS e X3 surgiram durante o inverno.

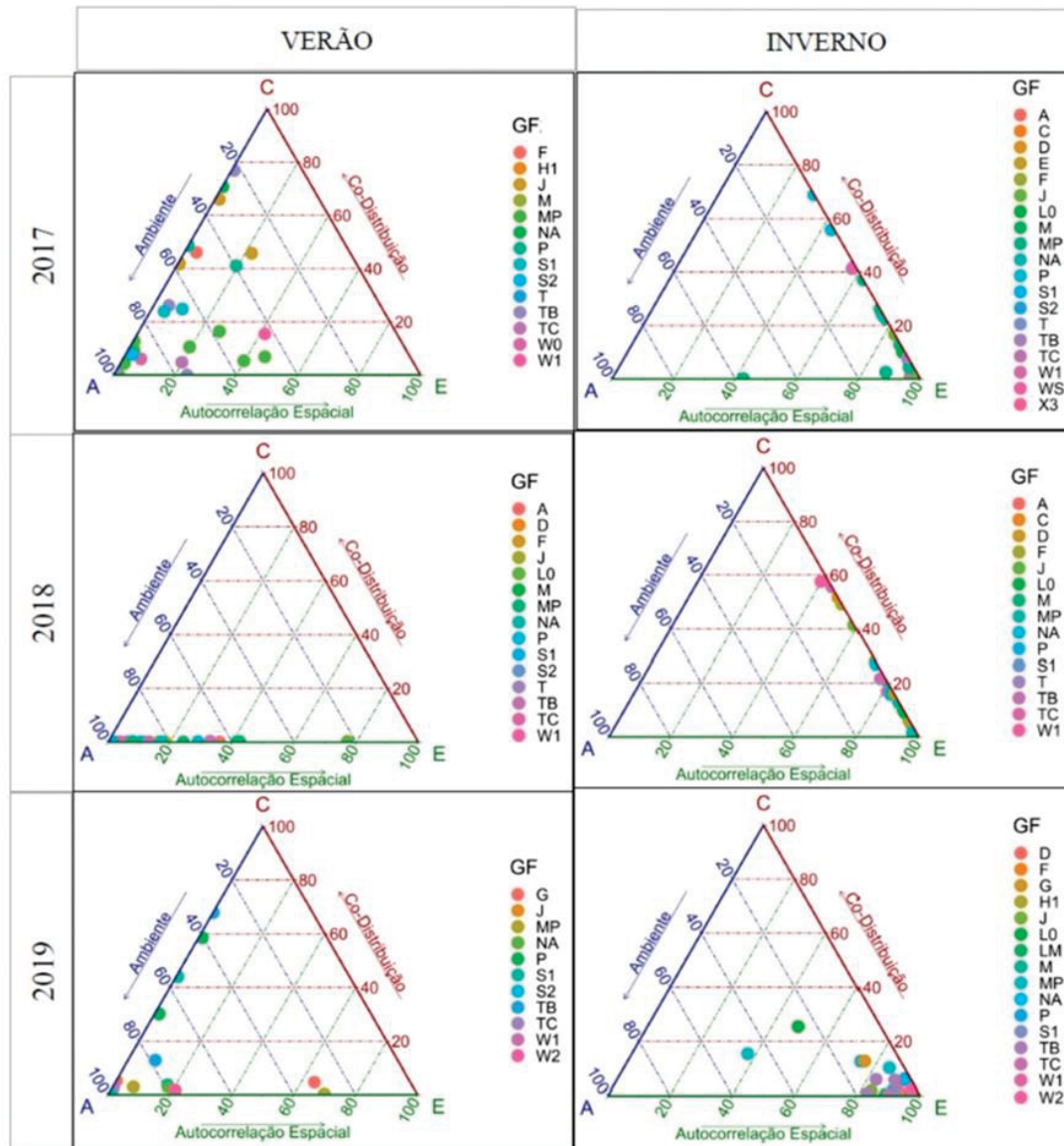


FIGURA 2 – Gráficos ternários descrevendo os três componentes da estrutura interna da metacomunidade e a distribuição dos grupos funcionais do fitoplâncton em cada período do ano para cada ano de amostragem. As cores dos grupos funcionais correspondem a seu gráfico específico (veja os grupos funcionais na Tabela 1). Cada ponto representa uma espécie diferente na metacomunidade. A localização do ponto indica a importância da variação atribuída a cada fator: ambiental (inferior esquerdo), autocorrelação espacial (inferior direito) e co-distribuição (superior).

Ao analisarmos a estrutura interna da metacomunidade para o ano de 2018, observamos que as espécies apresentaram mudanças das respostas de fatores ambientais para autocorrelação espacial entre os períodos. No verão, as espécies continuaram a apresentar maior resposta ao ambiente, enquanto no inverno, a autocorrelação espacial e a co-distribuição obtiveram maiores valores de explicação para a estrutura da comunidade. Os grupos funcionais foram bastante similares entre o verão e o inverno de 2018, e foram identificados 15 grupos em cada período.

A diferença entre eles foi o surgimento do grupo funcional S1 no verão, enquanto o grupo funcional C esteve presente somente no inverno.

Assim como nos anos anteriores, em 2019, a estrutura interna da comunidade fitoplanctônica no período de verão mostrou uma forte relação com o ambiente. No período de inverno, as espécies foram distribuídas de forma que a contribuição da autocorrelação espacial e co-distribuição foram determinantes para a estrutura interna da comunidade. Dentre os grupos funcionais, houve uma grande diferença entre os períodos. No verão, foram identificados apenas 11 grupos funcionais, enquanto no inverno foram registrados 16 grupos funcionais. Apenas um grupo funcional, S1, esteve presente no verão e não foi identificado no inverno. Já no inverno, foram identificados os grupos D, F, H1, L0, LM e M em relação ao período anterior.

### 3.1 CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS ESPÉCIES CONSIDERANDO OS GRUPOS FUNCIONAIS

Analisando as correlações entre os setores do rio Guaraguaçu e grupos funcionais, observou-se que apenas o ano de 2017, tanto inverno como o verão e o verão de 2019 apresentaram interações fortes, tanto positivas quanto negativas. Não foram registradas interações não neutras para o ano de 2018 nos dois períodos e para o inverno de 2019. Em relação aos grupos funcionais observados durante o verão de 2017, os grupos F, H1 e J apresentaram maiores interações positivas entre si. No mesmo ano, os grupos MP e TB apresentaram interações positivas apenas para algumas espécies específicas, sendo *Stenopterobia curvula* (W.Smith) Krammer 1987 do grupo TB e *Navicula* sp. Bory, 1822 do grupo MP (Figura 3). Durante o período de inverno, houve um aumento no número de espécies, principalmente nos representantes do grupo MP, houveram muitas interações positivas entre os grupos e também entre as espécies dentro do mesmo grupo (Figura 4).

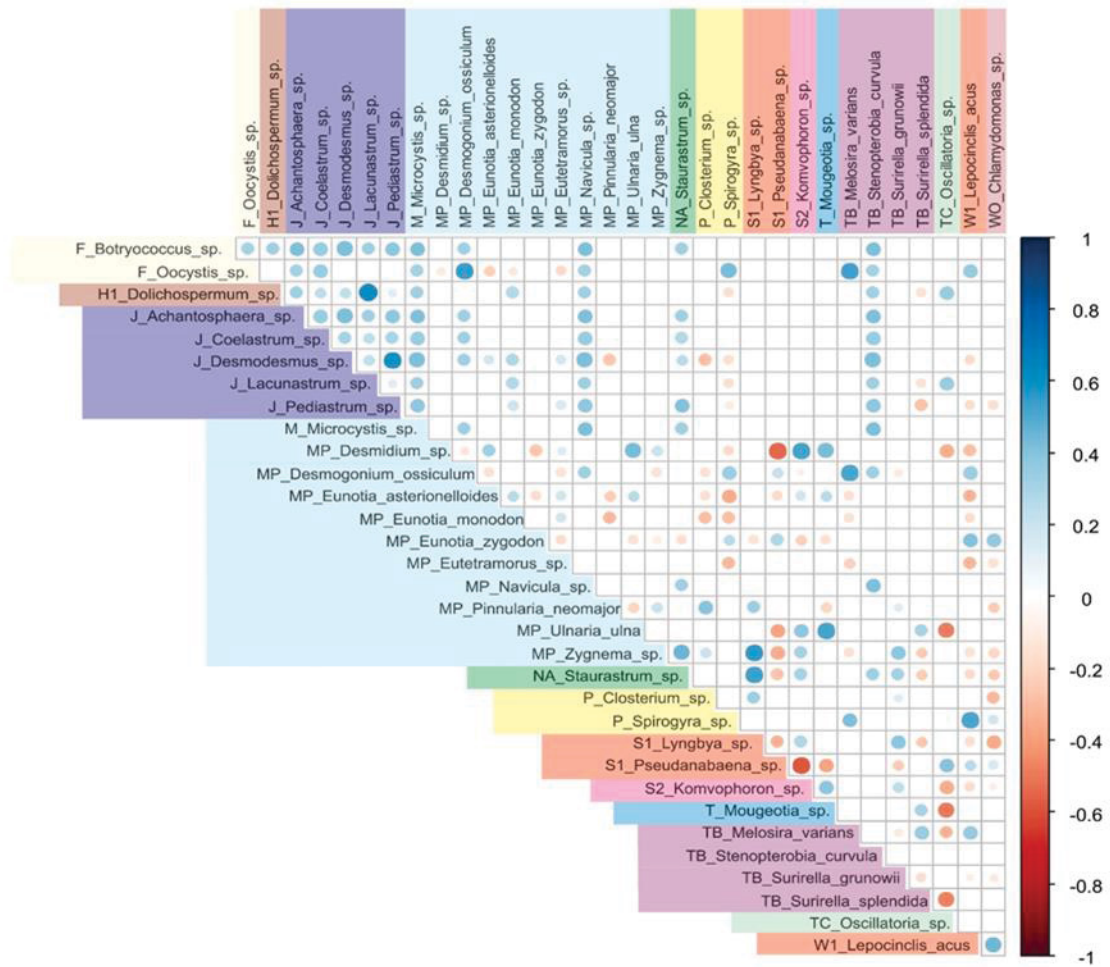


FIGURA 3 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplânctônica durante o verão de 2017. As cores representam os grupos funcionais, e a identidade desses estão destacados com letras maiúsculas antes do nome das espécies. A barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas. Veja a tabela completa das espécies em Material Suplementar, e a tabela dos grupos funcionais em Métodos).

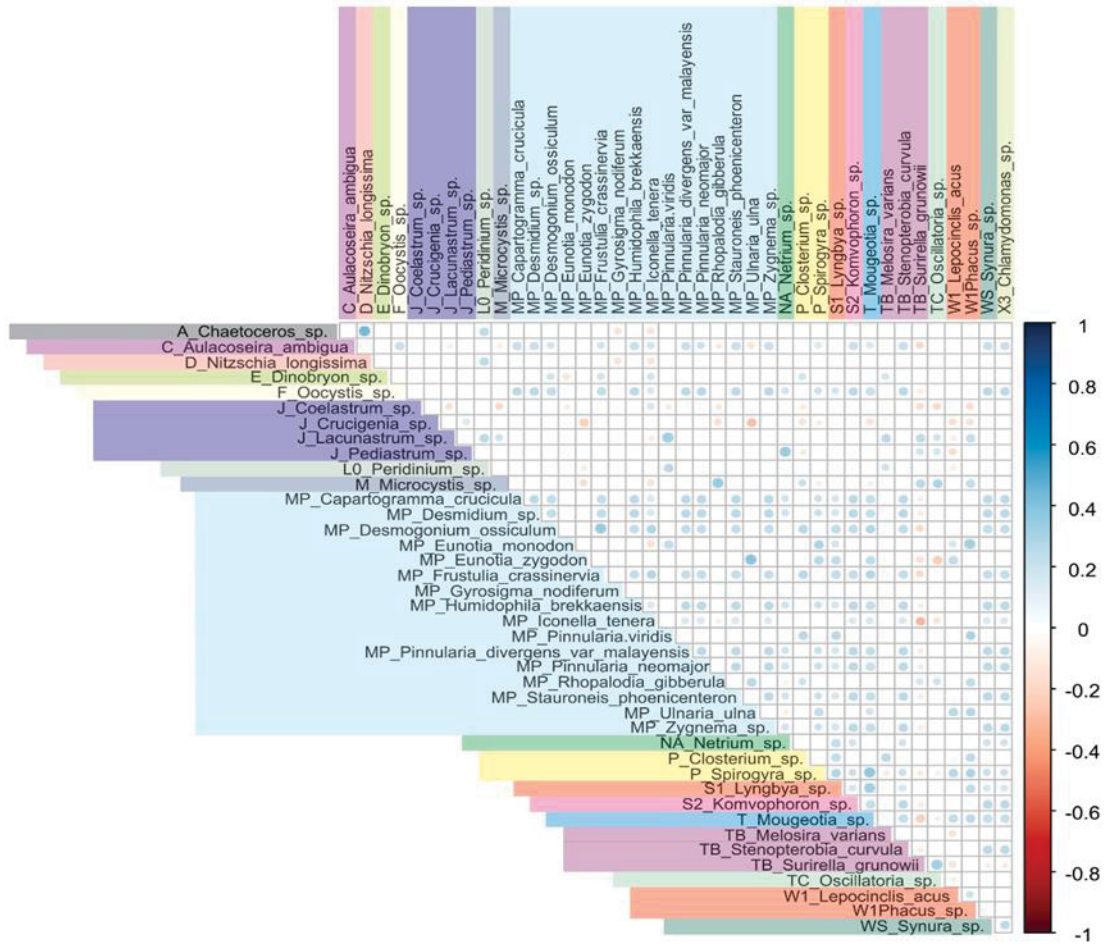


FIGURA 4 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o inverno de 2017. As cores representam os grupos funcionais, e a identidade desses estão destacados com letras maiúsculas antes do nome das espécies. A barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas. Veja a tabela completa das espécies em Material Suplementar, e a tabela dos grupos funcionais em Métodos).

Para os grupos funcionais do verão de 2019, as correlações ocorreram principalmente entre os grupos S1, S2, TB e MP. Os representantes do grupo MP foram *Eunotia zygodon* Ehrenberg 1843 e *Frustulia saxonica* Rabenhorst. Essas duas espécies tiveram fortes relações positivas com as espécies *Lyngbya* sp. C.Agardh ex Gomont, 1892 *Lyngba.sp* do grupo S1 e *Surirella splendida* (Ehrenberg) Ehrenberg 1834, representante do grupo funcional TB. Apesar de terem sido encontradas poucas espécies e grupos funcionais nesse período em comparação com outros anos, as relações foram bastante fortes (Figura 5).

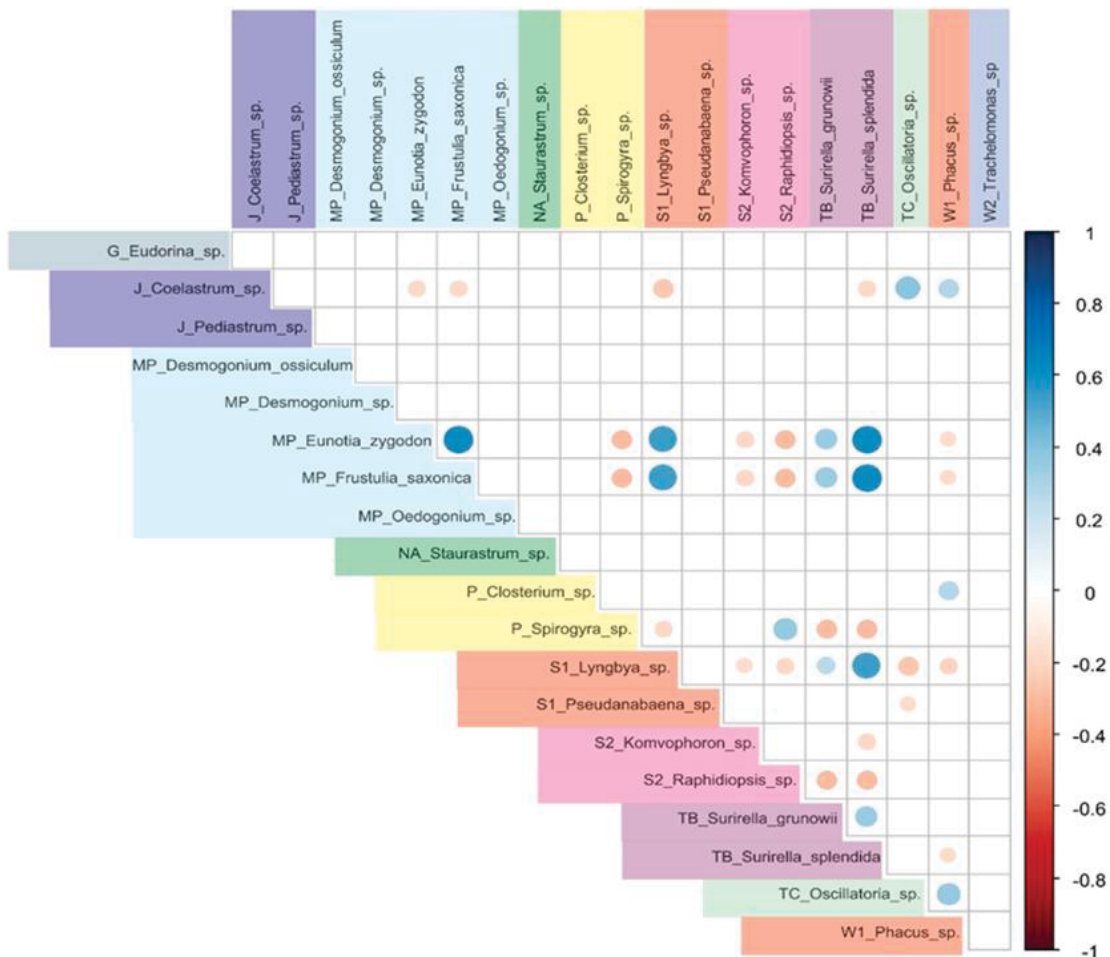


FIGURA 5 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplânctônica durante o verão de 2019. As cores representam os grupos funcionais, e a identidade desses estão destacados com letras maiúsculas antes do nome das espécies. A barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas. Veja a tabela completa das espécies em Material Suplementar, e a tabela dos grupos funcionais em Métodos).

### 3.2 CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS ESPÉCIES DE ALGAS PARA OS SETORES DO RIO GUARAGUAÇU

Para observar as interações entre as espécies fitoplanctônicas de acordo com sua presença nos setores do rio Guaraguaçu, elas foram organizadas em função de sua ocorrência em cada setor, e sumarizadas nas Figuras 6, 7 e 8. Os agrupamentos representam as espécies presentes nos setores, portanto algumas espécies podem estar presentes em mais de um setor ou serem exclusivas de um único setor, conforme indicado pelos agrupamentos. No período de verão de 2017, as espécies do agrupamento B, ou seja, aquelas exclusivas do segundo setor apresentaram uma maior correlação positiva entre si, assim como os agrupamentos D, F e G, os quais compartilham espécies presentes no segundo setor (Figura 6).

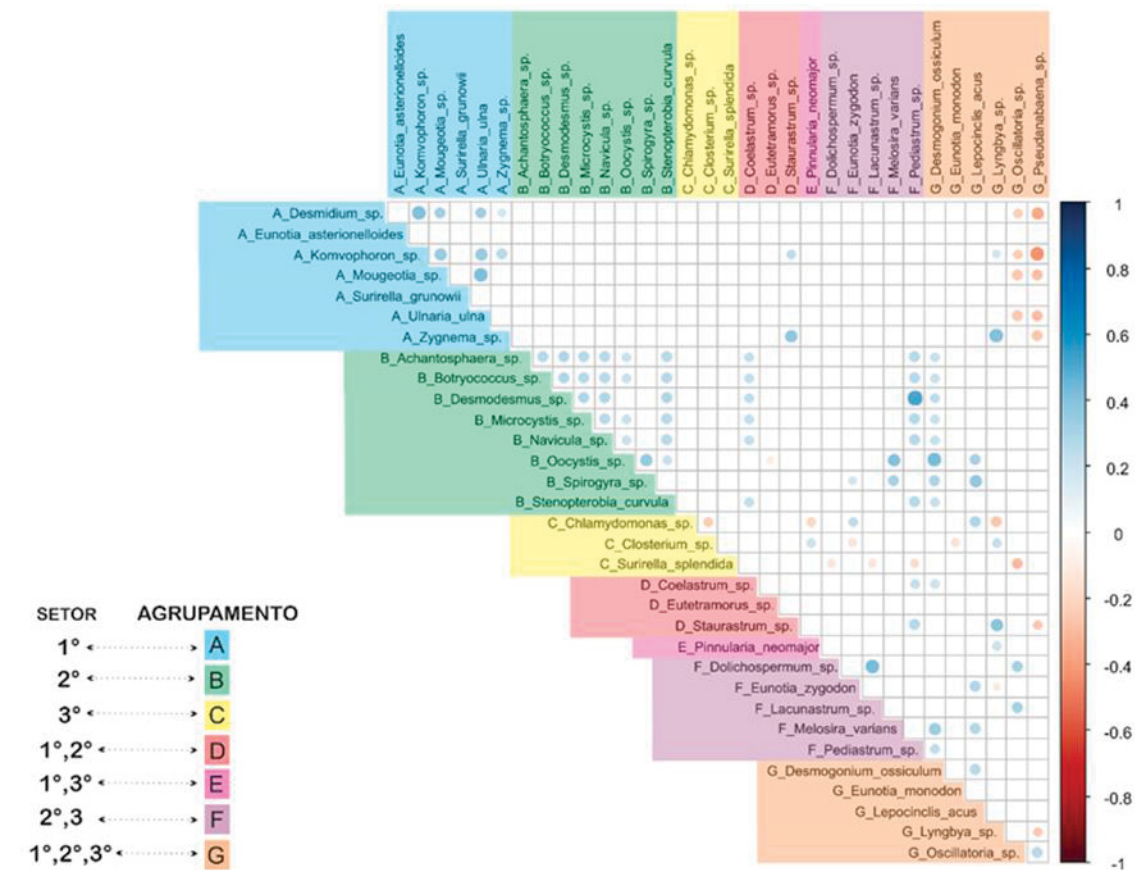


FIGURA 6 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o verão de 2017. As cores representam os agrupamentos que indicam a presença de cada espécie nos respectivos setores em que elas foram identificadas, enquanto a barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas.

No período de inverno, foi evidente um maior número de correlações positivas entre as espécies do agrupamento A. Além disso, assim como no período anterior, os agrupamentos que compartilham espécies com o agrupamento A exclusivas do primeiro setor, também apresentaram correlações positivas (Figura 7). Dessa forma, os agrupamentos D, E e G apresentam essa relação com maiores relações positivas entre si. Em períodos anteriores, encontramos principalmente correlações positivas para as espécies no agrupamento A. No entanto, no verão de 2019, além das correlações positivas entre as espécies exclusivas do primeiro setor, foi possível observar fortes correlações negativas entre outras espécies, como mostrado na (Figura 8).

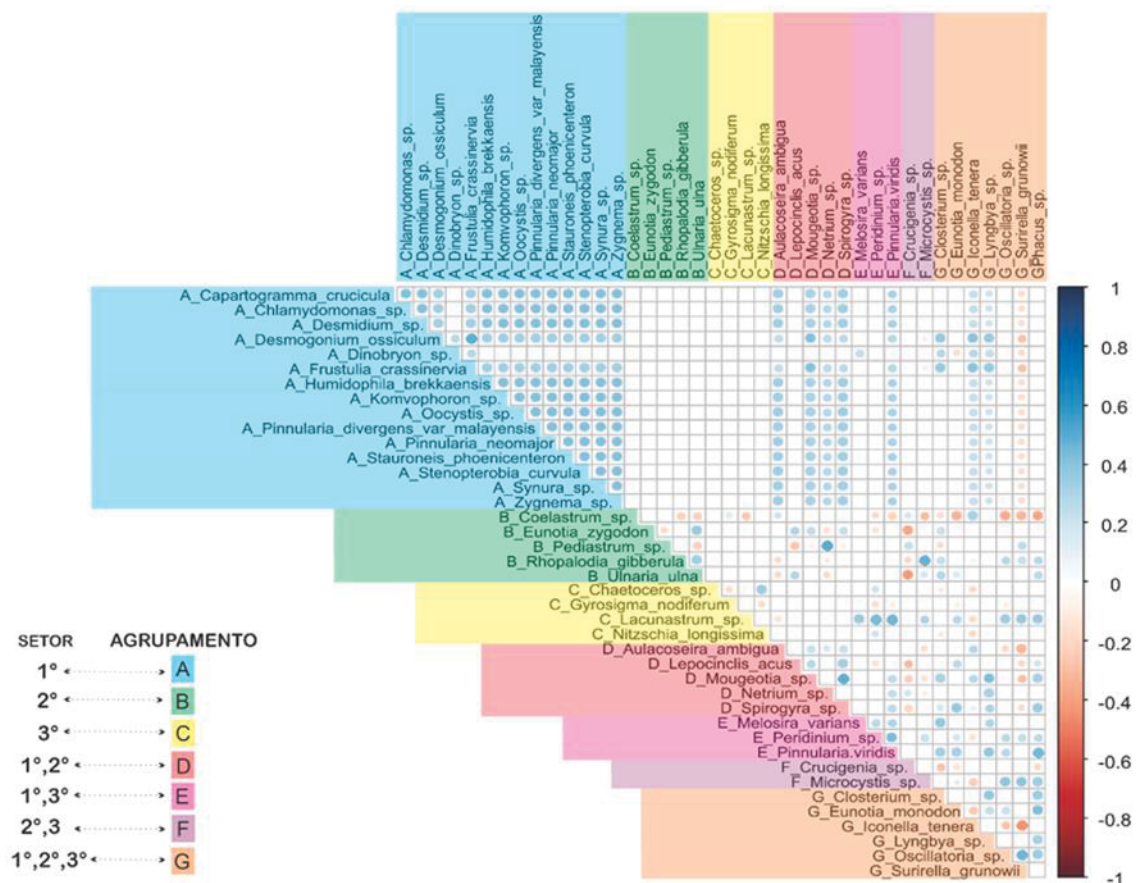


FIGURA 7 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o inverno de 2017. As cores representam os agrupamentos que indicam a presença de cada espécie nos respectivos setores em que elas foram identificadas, enquanto a barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas.

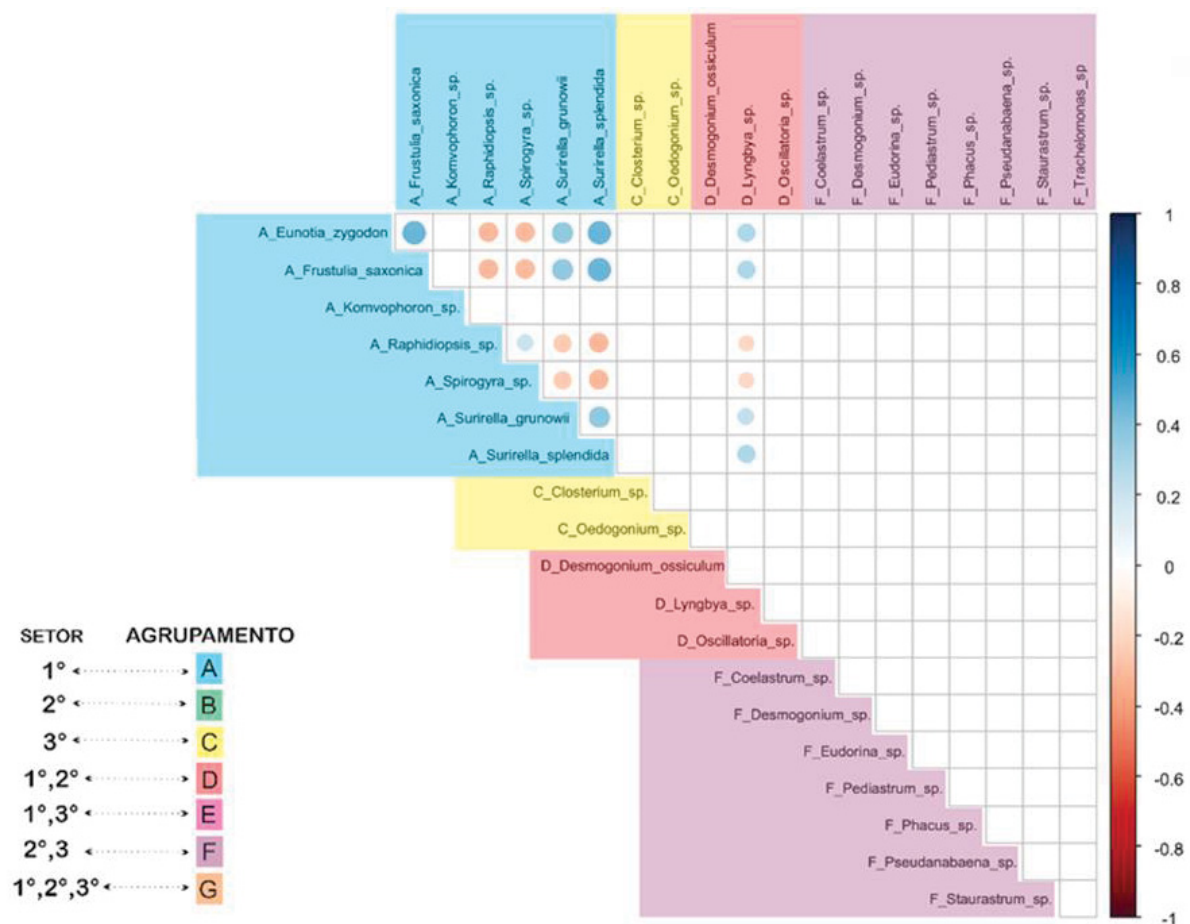


FIGURA 8 – Matriz de correlação das espécies da comunidade fitoplanctônica durante o verão de 2019. As cores representam os agrupamentos que indicam a presença de cada espécie nos respectivos setores em que elas foram identificadas, enquanto a barra vertical indica a força da interação: azul para interações positivas e vermelho para interações negativas.

## DISCUSSÃO

Nossos resultados revelam que a principal diferença entre as regiões segmentadas em setores do rio reside nas respostas das espécies de fitoplâncton nessas áreas, resultando em estruturas distintas e uma organização de grupos funcionais específica para cada região. É notável a influência da estrutura vegetal de macrófitas na resposta da metacomunidade fitoplanctônica. Embora esses organismos estejam no mesmo nível trófico que o fitoplâncton, eles estabelecem interações fortes que modificam suas respostas estruturais e funcionais. Os padrões são especialmente evidentes durante o verão, afetando tanto a estrutura interna da comunidade fitoplanctônica, as correlações entre diferentes regiões e os grupos funcionais presentes. Assim, podemos inferir que a dinâmica das metacomunidades está possivelmente relacionada às mudanças ambientais sazonais, como o aumento da densidade populacional, das temperaturas e da precipitação. Também evidenciamos que os impactos humanos coincidem com uma simplificação das

comunidades de fitoplâncton, com a redução de certos grupos durante os períodos de verão. A aplicação de novas abordagens, com modelos como o (JSDMs), tem permitido obter resultados interessantes, além de facilitar a integração de múltiplos organismos, fornecendo uma visão abrangente das dinâmicas das metacomunidades ao longo do espaço e do tempo.

### 3.3 ESTRUTURA INTERNA DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

O principal padrão encontrado é que a estrutura interna da metacomunidade de microalgas do rio Guaraguaçu depende do período do ano amostrado. Durante os verões, ocorrem um aumento na precipitação, aumento das temperaturas e maior atividade humana, resultando em um aumento no aporte de matéria orgânica para o rio Guaraguaçu. Essas mudanças nas condições ambientais entre os períodos de verão e inverno, estruturam de forma distinta o arranjo vegetal das macrófitas, conseqüentemente a estrutura interna da metacomunidade do fitoplâncton (GALVANESE; COSTA; ARAÚJO; FALKIEVICZ *et al.*, 2022).

Um estudo experimental realizado por Jasser (1995) demonstrou que certas espécies de macrófitas induzem mudanças na estrutura e dominância da comunidade fitoplanctônica, em comparação com comunidades que se desenvolvem em ambientes ausentes de macrófitas. É possível que ocorra um fenômeno similar na estrutura das comunidades analisadas em nosso estudo, uma vez que a mudança nas condições ambientais, ou seja, a alteração na estrutura vegetal das macrófitas, modificam a estrutura interna da comunidade fitoplanctônica, que passam a ser mais influenciadas pelas condições ambientais, no período do verão, ou por co-distribuição e autocorrelação espacial no período do inverno.

A mudança nos padrões de contribuição ambiental para a correlação espacial indica uma conformação dinâmica entre nichos mais estreitos, caracterizados por fortes pressões ambientais, e um nicho mais amplo, caracterizado por efeitos de autocorrelação espacial mais fortes entre as espécies (OVASKAINEN; ABREGO, 2020). As espécies que mostram estruturação por co-distribuição podem estar diretamente relacionadas às suas interações, mas essa afirmação ainda deve ser

usada com cautela, considerando os fatores ambientais intrínsecos de cada espécie (LEIBOLD; MIKKELSON, 2002).

Para o fitoplâncton, as condições locais são determinantes para a identidade das espécies, enquanto as mudanças temporais na organização da comunidade estão relacionadas a fatores climáticos, como a sazonalidade (SAMPAIO; FERREIRA; LUDWIG; PADIAL, 2023). Nesse estudo, sugerimos que a estrutura vegetal das comunidades de macrófitas está relacionada à estrutura interna da metacomunidade de fitoplâncton, gerando padrões de estruturação de sua comunidade e simplificando a composição de seus grupos funcionais em relação a diferentes períodos do ano.

#### 3.4 CORRELAÇÃO DAS ESPÉCIES POR GRUPO FUNCIONAL

A relação entre os grupos funcionais em cada período pode ser explicada pelas características biológicas das espécies que compõem o grupo. No verão de 2017, são comumente encontrados os grupos H1 e J característicos de ambientes menos profundos (veja Tabela 1 em métodos). No inverno do mesmo ano, o grupo com maiores interações positivas foi o grupo MP, onde esse grupo apresenta características de ambientes turvos e com maior turbulência. No verão de 2019, destaca-se o grupo funcional S2, que possui um modelo de habitat no qual as águas são mais quentes e apresentam um pH mais básico (DA SILVA; PELICICE; RODRIGUES, 2020; ABONYI; LEITAO; LANÇON; PADISÁK, 2012; PADISÁK; CROSSETTI; NASELLI-FLORES, 2009). De maneira geral, o grupo funcional que apresentou o maior número de espécies representativas foi o grupo funcional MP, conforme descrito por Padisák et al (2009). Esse grupo está frequentemente associado a ambientes rasos e agitados e é composto principalmente por organismos meroplânctônicos, como diatomáceas, que podem ter sido transportados pelas correntes. Todas as amostras foram coletadas em um rio com fluxo hídrico constante, o que resultou em uma presença comum desses indivíduos em todas as amostras.

Um estudo conduzido por Latinopoulos et al (2020) relacionou grupos funcionais do fitoplâncton com fatores ambientais em diferentes períodos do ano,

demonstrando que grupos dominados por cianobactérias, clorofíceas e diatomáceas são indicativos de águas quentes, turvas e ricas em nutrientes. Esses grupos são os principais representantes do grupo funcional MP. Tran et al (2023) ressalta que as mudanças nas condições ambientais em lagos, onde grupos funcionais dominantes estão presentes, podem ocasionar um aumento exacerbado de representantes desse mesmo grupo desencadeando processos de eutrofização em reservatórios.

Apesar da diversidade de táxons encontrados neste estudo, as alterações antrópicas no Rio Guaraguaçu, conforme descritas por Galvanese et al (2022), provavelmente foram a principal causa da redução dos grupos funcionais durante o período do verão em comparação ao inverno, destacando a permanência e abundância do grupo funcional MP. Isso indica uma simplificação da comunidade em resposta às alterações ambientais, em contraste com os padrões observados durante o inverno. A mudança nos grupos funcionais indica que o fitoplâncton é sensível às mudanças ambientais e que ele pode ser um bom indicador para identificar diferentes gradientes ambientais aquáticos (SELMECZY; TAPOLCZAI; PADISÁK, 2023; DA SILVA; PELICICE; RODRIGUES, 2020).

### 3.5 CORRELAÇÃO DAS ESPÉCIES POR DIFERENTES REGIÕES DO RIO

O rio Guaraguaçu apresenta diferenças perceptíveis ao longo de sua extensão, formando um gradiente ambiental significativo (GALVANESE; COSTA; ARAÚJO; FALKIEVICZ *et al.*, 2022). Essas variações possibilitam o estudo do rio em diferentes segmentos, e a setorização é importante para entender como os organismos respondem a diferentes condições ambientais. As diferenças ambientais podem abranger qualidade da água, composição química, disponibilidade de nutrientes, temperatura, fluxo de água e outros fatores relevantes. A setorização auxilia na compreensão de cada segmento do rio e a comparação das respostas dos organismos a diferentes ambientes (SATO; COSTA; PADIAL, 2021; SINGO; DE ARAÚJO-RAMOS; DA ROCHA, 2020; PUPO; DISARÓ, 2006).

Um exemplo da variação das características ambientais em diferentes trechos do rio Guaraguaçu e de como outros organismos respondem a essas mudanças, foi explorado por Bora (2019). Esse estudo investigou especificamente o

desenvolvimento de uma espécie de gramínea invasora em condições de alta salinidade. A presença desse gradiente salino nesse trecho do rio que compreende os cinco pontos mais a jusante (veja Figura 1), se destaca como um fator determinante na seleção e sobrevivência dessa espécie de macrófita invasora.

Da mesma forma, foi observado que os cinco pontos da região mais a montante e os seis pontos intermediários do rio Guaraguaçu apresentam diferenças significativas devido à influência de atividades humanas que são mais intensivas na porção intermediária. Já nos primeiros pontos localizados a montante do rio, exibe um menor fluxo hidrológico e menor impacto antrópico (consequentemente menos degradado). Além disso, é evidente o gradiente ambiental e como ele também é influenciado pela sazonalidade e principalmente pelas ações antrópicas, que são prejudiciais ao ambiente e à sua conservação (FARIA; FREHSE; OCCHI; CARVALHO *et al.*, 2021; REIS; FRANÇA; MOTYL; CORDEIRO *et al.*, 2015; SAMPAIO; FERREIRA; LUDWIG; PADIAL, 2023).

Ao analisar a distribuição das relações na comunidade fitoplanctônica, levando em consideração a divisão em setores do rio Guaraguaçu, é possível notar que as espécies exclusivas do primeiro setor, bem como aquelas presentes tanto no primeiro setor quanto nos demais setores, apresentam interações positivas mais frequentes. Essa diferença nas relações pode ser atribuída às características ambientais distintas de cada região. Por outro lado, as espécies que estão presentes em diferentes locais podem enfrentar desafios adicionais devido às variações ambientais, o que pode resultar em interações menos frequentes ou menos positivas.

#### **4 CONCLUSÕES**

É possível observar que a estrutura interna da comunidade do fitoplâncton está correlacionada com o arranjo vegetal das macrófitas, uma vez que ela é influenciada pelo ambiente, conforme evidenciado pelos modelos. O estudo das relações entre agrupamentos forneceu uma visão abrangente das correlações entre as espécies que compõem as comunidades fitoplanctônicas ao longo do rio

Guaraguaçu, considerando tanto os grupos funcionais quanto a classificação dos segmentos do rio analisados neste estudo. Além disso, nossos resultados sugeriram claramente que a estrutura das metacomunidades são dependentes da estação do ano nesse rio subtropical de maré.

Durante o verão, foram observadas alterações significativas na estrutura da comunidade fitoplanctônica, as quais se acredita estarem relacionadas a mudanças climáticas, como o aumento da temperatura, redução da precipitação e maior aporte de nutrientes devido ao aumento da densidade populacional nesse período. É importante destacar que o aumento na densidade populacional resulta em um aumento no despejo de esgoto doméstico no rio, assim como na atividade pesqueira. Tais atividades contribuem para acentuar o gradiente ambiental na porção intermediária, tornando as comunidades fitoplanctônicas mais dependentes das condições ambientais específicas observadas durante esse período. Essas características já foram destacadas em trabalhos anteriores (SAMPAIO; FERREIRA; LUDWIG; PADIAL, 2023; ARAÚJO; FALKIEVICZ *et al.*, 2022; SATO; COSTA; PADIAL, 2021; OCCHI; CARVALHO *et al.*, 2021; SINGO; DE ARAÚJO-RAMOS; DA ROCHA, 2020; FARIA; FREHSE; GALVANESE; COSTA; REIS; FRANÇA; MOTYL; CORDEIRO *et al.*, 2015). Em contraste, durante o período do inverno, as comunidades assumiram novos padrões devido a diminuição na contribuição ambiental. Essas mudanças resultaram em maiores contribuições entre co-distribuição e autocorrelação espacial das espécies, modificando a estrutura interna da comunidade fitoplanctônica.

Durante o verão, houve uma diminuição na diversidade de grupos funcionais, o que pode ser interpretado como uma simplificação da comunidade no período que é marcado pelo maior impacto das atividades antrópicas. Ao analisar os setores do rio, observou-se que as espécies exclusivas de um determinado setor ou aquelas que compartilham espécies com ele apresentam maiores correlações positivas. Esses resultados estão de acordo com o que foi afirmado por Heino (2013), que as metacomunidades são influenciadas não apenas pelas condições ambientais em que as espécies vivem, mas também pelas interações bióticas locais e pelos efeitos da dispersão das espécies. Nossos resultados mostram que grupos com o mesmo nível trófico, como as macrófitas e o fitoplâncton, compartilham relações e podem estar relacionados à estrutura interna das metacomunidades. Isso ressalta a relação

das interações bióticas e de sua organização e no funcionamento das comunidades aquáticas.

Por fim, os resultados ressaltam a importância do monitoramento de longo prazo para estabelecer relações entre diferentes comunidades dentro de um gradiente ambiental e durante o tempo, fornecendo ferramentas valiosas para trabalhos de conservação. Monitoramentos de longo prazo permitem uma compreensão das mudanças na estrutura das comunidades fitoplanctônicas, bem como das influências do ambiente e das interações entre as espécies, além de uma visão mais abrangente das mudanças e dos processos que ocorrem nas comunidades. Isso permite identificar tendências, padrões sazonais e respostas a longo prazo em um mundo em constante transformação devido à atividades antrópicas. Nesse sentido, reforçamos a importância de monitoramentos ecológicos, o desenvolvimento de políticas de conservação eficazes e tomada de decisões voltadas para a preservação dos ecossistemas fluviais. Adicionalmente, destacamos a importância da utilização de novas ferramentas de análise de comunidades biológicas e da integração de múltiplos organismos. Abordagens como a utilizada no presente estudo nos proporciona uma visão integrativa das dinâmicas das metacomunidades, o que é fundamental para garantir a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos essenciais. Além disso, a integração de múltiplos organismos, amplia a compreensão das conexões e dos processos que influenciam as metacomunidades. Tal abordagem integrativa é crucial para obter uma visão mais completa e precisa das dinâmicas das comunidades ao longo do tempo e em diferentes ambientes. Por fim, os processos e relações complexas que podem influenciar a estabilidade e a resiliência dos ecossistemas fluviais podem ser desvendados.

## REFERÊNCIAS

ABONYI, A.; LEITAO, M.; LANÇON, A. M.; PADISÁK, J. Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France). **Phytoplankton responses to human impacts at different scales**, p. 233-249, 2012.

AHMED, A.; MADHUSOODHANAN, R.; YAMAMOTO, T.; FERNANDES, L. *et al.* Analysis of phytoplankton variations and community structure in Kuwait Bay, Northwestern Arabian Gulf. **Journal of Sea Research**, 180, p. 102163, 2022.

AMORIM, C. A.; MOURA, A. D. N. Habitat templates of phytoplankton functional groups in tropical reservoirs as a tool to understand environmental changes. **Hydrobiologia**, 849, n. 5, p. 1095-1113, 2022

BICUDO, D. Considerações sobre metodologias de contagem de algas do perifiton. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 3, n. 1, p. 459-475, 1990.

BORA, L. S. Diferentes populações de uma Poaceae invasora respondem de maneira distinta ao aumento da salinidade. 2019. -, Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Biologia. Programa de Pós ....

BORICS, G.; TÓTHMÉRÉSZ, B.; VÁRBÍRÓ, G.; GRIGORSZKY, I. *et al.* Functional phytoplankton distribution in hypertrophic systems across water body size. **Hydrobiologia**, 764, p. 81-90, 2016.

BORREGAARD, M. K.; RAHBK, C. Causality of the relationship between geographic distribution and species abundance. **The Quarterly review of biology**, 85, n. 1, p. 3-25, 2010.

BYERS, J. E.; CUDDINGTON, K.; JONES, C. G.; TALLEY, T. S. *et al.* Using ecosystem engineers to restore ecological systems. **Trends in ecology & evolution**, 21, n. 9, p. 493-500, 2006.

CADOTTE, M. W.; TUCKER, C. M. Should environmental filtering be abandoned? **Trends in ecology & evolution**, 32, n. 6, p. 429-437, 2017.

CASTILLO-ESCRIVÀ, A.; MESQUITA-JOANES, F.; RUEDA, J. Effects of the temporal scale of observation on the analysis of aquatic invertebrate metacommunities. **Frontiers in Ecology and Evolution**, 8, p. 561838, 2020.

DA SILVA ARAÚJO, E.; VITULE, J. R. S.; PADIAL, A. A. A checklist of aquatic macrophytes of the Guaraguaçu River basin reveals a target for conservation in the Atlantic Rainforest. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, 43, p. e50542-e50542, 2021.

DA SILVA, I. G.; PELICICE, F. M.; RODRIGUES, L. C. Loss of phytoplankton functional and taxonomic diversity induced by river regulation in a large tropical river. **Hydrobiologia**, 847, p. 3471-3485, 2020.

DALLAS, T. metacom: an R package for the analysis of metacommunity structure. **Ecography**, 37, n. 4, p. 402-405, 2014.

DE ALMEIDA CAMPELO, M. J. STRUCTURE COMMUNITY OF AQUATIC MACROPHYTES IN SPRINGS OF THE SEMIARID, NORTHEAST BRAZIL. **International Journal**, 4, n. 1, p. 2305-1493, 2013.

DÍAZ, S.; CABIDO, M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. **Trends in ecology & evolution**, 16, n. 11, p. 646-655, 2001.

DÍAZ, S.; LAVOREL, S.; MCINTYRE, S.; FALCZUK, V. *et al.* Plant trait responses to grazing—a global synthesis. **Global change biology**, 13, n. 2, p. 313-341, 2007.

ESTIFANOS, G. B.; GEBRE-MESKEL, D. K.; HAILU, T. F. Water quality parameters affect dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Hawassa, Ethiopia. **Limnologia**, 94, p. 125968, 2022.

FARIA, L.; FREHSE, F. D. A.; OCCHI, T. V. T.; CARVALHO, B. M. D. *et al.* Occurrence of non-native species in a subtropical coastal River, in Southern Brazil. **Acta Limnologia Brasiliensia**, 33, 2021.

FRANÇA, F.; MELO, E. D.; OLIVEIRA, I. B. D.; REIS, A. T. C. C. *et al.* Plantas vasculares das áreas alagadas dos Marimbus, Chapada Diamantina, BA, Brasil. **Hoehnea**, 37, p. 719-730, 2010.

GALVANESE, E. F.; COSTA, A. P. L.; ARAÚJO, E. S.; FALKIEVICZ, B. C. *et al.* Community stability and seasonal biotic homogenisation emphasize the effect of the invasive tropical tanner grass on macrophytes from a highly dynamic neotropical tidal river. **Aquatic sciences**, 84, n. 2, p. 1-16, 2022.

HEINO, J. The importance of metacommunity ecology for environmental assessment research in the freshwater realm. **Biological Reviews**, 88, n. 1, p. 166-178, 2013.

HEINO, J.; MELO, A. S.; SIQUEIRA, T.; SOININEN, J. *et al.* Metacommunity organisation, spatial extent and dispersal in aquatic systems: patterns, processes and prospects. **Freshwater Biology**, 60, n. 5, p. 845-869, 2015.

HENRIQUES-SILVA, R.; LINDO, Z.; PERES-NETO, P. R. A community of metacommunities: exploring patterns in species distributions across large geographical areas. **Ecology**, 94, n. 3, p. 627-639, 2013.

HUFFAKER, C. Experimental studies on predation: dispersion factors and predator-prey oscillations. **Hilgardia**, 27, n. 14, p. 343-383, 1958.

- HUISMAN, J.; WEISSING, F. J. Competition for nutrients and light in a mixed water column: a theoretical analysis. **The American Naturalist**, 146, n. 4, p. 536-564, 1995.
- IRIGOIEN, X.; HUISMAN, J.; HARRIS, R. P. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. **Nature**, 429, n. 6994, p. 863-867, 2004.
- JASSER, I. The influence of macrophytes on a phytoplankton community in experimental conditions. **Hydrobiologia**, 306, p. 21-32, 1995.
- JUPP, B.; SPENCE, D. Limitations on macrophytes in a eutrophic lake, Loch Leven: I. Effects of phytoplankton. **The Journal of Ecology**, p. 175-186, 1977.
- KOEHL, M. A. Ecological biomechanics of marine macrophytes. **Journal of Experimental Botany**, 73, n. 4, p. 1104-1121, 2022.
- KRUK, C.; DEVERCELLI, M.; HUSZAR, V. L.; HERNANDEZ, E. *et al.* Classification of Reynolds phytoplankton functional groups using individual traits and machine learning techniques. **Freshwater Biology**, 62, n. 10, p. 1681-1692, 2017.
- LATINOPOULOS, D.; NTISLIDOU, C.; KAGALOU, I. Relationships of environmental conditions and phytoplankton functional groups in a new re-constructed shallow lentic system in draught conditions. **Ecohydrology & Hydrobiology**, 20, n. 3, p. 369-381, 2020.
- LEIBOLD, M. A.; HOLYOAK, M.; MOUQUET, N.; AMARASEKARE, P. *et al.* The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology. **Ecology letters**, 7, n. 7, p. 601-613, 2004.
- LEIBOLD, M. A.; MIKKELSON, G. M. Coherence, species turnover, and boundary clumping: elements of meta-community structure. **Oikos**, 97, n. 2, p. 237-250, 2002.
- LEIBOLD, M. A.; RUDOLPH, F. J.; BLANCHET, F. G.; DE MEESTER, L. *et al.* The internal structure of metacommunities. **Oikos**, 2022, n. 1, 2022.
- LI, Z.; TONKIN, J. D.; MENG, X.; LIU, Z. *et al.* Seasonal variation in the metacommunity structure of benthic macroinvertebrates in a large river-connected floodplain lake. **Ecological Indicators**, 136, p. 108662, 2022.
- MABERLY, S. C.; CHAO, A.; FINLAY, B. J. Seasonal patterns of phytoplankton taxon richness in lakes: Effects of temperature, turnover and abundance. **Protist**, 173, n. 6, p. 125925, 2022.
- MOUILLOT, D.; GRAHAM, N. A.; VILLÉGER, S.; MASON, N. W. *et al.* A functional approach reveals community responses to disturbances. **Trends in ecology & evolution**, 28, n. 3, p. 167-177, 2013.
- NAIMI, B.; ARAÚJO, M. B. sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. **Ecography**, 39, n. 4, p. 368-375, 2016.

NASELLI-FLORES, L.; BARONE, R. Phytoplankton dynamics and structure: a comparative analysis in natural and man-made water bodies of different trophic state. **Hydrobiologia**, 438, p. 65-74, 2000.

OVASKAINEN, O.; ABREGO, N. **Joint species distribution modelling: with applications in R**. Cambridge University Press, 2020. 1108674151.

PADIAL, A. A.; CESCHIN, F.; DECLERCK, S. A.; DE MEESTER, L. *et al.* Dispersal ability determines the role of environmental, spatial and temporal drivers of metacommunity structure. **PloS one**, 9, n. 10, p. e111227, 2014.

PADISÁK, J.; CROSSETTI, L. O.; NASELLI-FLORES, L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. **Hydrobiologia**, 621, n. 1, p. 1-19, 2009.

PUPO, D. V.; DISARÓ, S. T. Characterization of Guaraguaçu River (Paraná, Brazil) based on the distribution of foraminiferal and thecamoebian assemblages and sedimentological analysis. **Anuário do Instituto de Geociências**, 29, n. 1, p. 434-435, 2006.

REIS, C. S. D.; FRANÇA, H. T. D. S.; MOTYL, T.; CORDEIRO, T. D. S. *et al.* Avaliação da atividade antrópica no rio Guaraguaçu (Pontal do Paraná, Paraná). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 20, p. 389-394, 2015.

REYNOLDS, C.; IRISH, A. Modelling phytoplankton dynamics in lakes and reservoirs: the problem of in-situ growth rates. **Hydrobiologia**, 349, p. 5-17, 1997.

ROSS, J. Práticas de ecologia. Barcelona: **Editorial Omega**. 1979.

SAMPAIO, M. F.; FERREIRA, P. C.; LUDWIG, T. A. V.; PADIAL, A. A. Temporal stability in beta diversity does not guarantee surrogacy or compositional stability in a micro-phytoplankton metacommunity. **Limnetica**, 42, n. 1, p. 000-000, 2023.

SATO, R. Y.; COSTA, A. P. L.; PADIAL, A. A. The invasive tropical tanner grass decreases diversity of the native aquatic macrophyte community at two scales in a subtropical tidal river. **Acta Botanica Brasilica**, 35, p. 140-150, 2021.

SELMECZY, G. B.; TAPOLCZAI, K.; PADISÁK, J. Catchment land use drivers are weak predictors of lakes' phytoplankton assemblage structure at functional group level. **Hydrobiologia**, 850, n. 9, p. 2075-2088, 2023.

SINGO, J. M.; DE ARAÚJO-RAMOS, A. T.; DA ROCHA, J. R. C. Physical-chemical characterization of Peri river, Pontal do Paraná, PR, Brazil. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 7, n. 5, 2020.

SRIVASTAVA, V.; LAFOND, V.; GRIESS, V. C. Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. **CABI Reviews**, n. 2019, p. 1-13, 2019.

TILMAN, D. Functional diversity. **Encyclopedia of biodiversity**, 3, n. 1, p. 109-120, 2001.

TRAN, T. H. Y.; LE, T. T.; PHAN, D. D.; TRAN, T. T. *et al.* SEASONAL VARIATION OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS IN TUYEN LAM RESERVOIR, CENTRAL HIGHLANDS, VIETNAM. **Dalat University Journal of Science**, p. 25-35, 2023.

TREMARIN, P. I.; LUDWIG, T. A. V.; MOREIRA FILHO, H. Thalassiosirales (Diatomeae) do rio Guaraguaçu, Bacia Litorânea, PR, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, 22, p. 1101-1113, 2008.

URBAN, M. C.; LEIBOLD, M. A.; AMARASEKARE, P.; DE MEESTER, L. *et al.* The evolutionary ecology of metacommunities. **Trends in ecology & evolution**, 23, n. 6, p. 311-317, 2008.

UTERMÖHL, H. Zur vervollkommnung der quantitativen phytoplankton-methodik: Mit 1 Tabelle und 15 abbildungen im Text und auf 1 Tafel. **Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Mitteilungen**, 9, n. 1, p. 1-38, 1958.

VITULE, J. Distribuição, abundância e estrutura populacional de peixes introduzidos no Rio Guaraguaçu, Paranaguá, Paraná, Brasil. 2008. -, PhD Thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VITULE, J. R.; UMBRIA, S.; ARANHA, J. Introduction of the African catfish *Clarias gariepinus* (BURCHELL, 1822) into Southern Brazil. **Biological Invasions**, 8, p. 677-681, 2006.

WISZ, M. S.; POTTIER, J.; KISSLING, W. D.; PELLISSIER, L. *et al.* The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. **Biological reviews**, 88, n. 1, p. 15-30, 2013.

WU, Z.; WANG, F.; WANG, X.; LI, K. *et al.* Water quality assessment using phytoplankton functional groups in the middle-lower Changjiang River, China. **Limnologica**, p. 126056, 2023.

ZOHARY, T.; PADISÁK, J.; NASELLI-FLORES, L. Phytoplankton in the physical environment: beyond nutrients, at the end, there is some light. **Hydrobiologia**, 639, p. 261-269, 2010.

## MATERIAL SUPLEMENTAR

TABELA 2 – LISTA DE ESPÉCIES DAS COMUNIDADES DO FITOPLANCTÔNICAS DO RIO GUARAGUAÇU E SEUS GRUPOS FUNCIONAIS

CLASSE	ESPÉCIES	GF
Trebouxiophyceae	<i>Acanthosphaera</i> sp. Lemmermann, 1899	J
Cyanophyceae	<i>Anabaena</i> sp. Bory ex Bornet & Flahault, 1886, nom. cons.	H1
Chlorophyceae	<i>Ankistrodesmus</i> sp. Corda, 1838	F
Coscinodiscophyceae	<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grunow) Simonsen 1979	C
Trebouxiophyceae	<i>Botryococcus</i> sp. Kützing, 1849	F
Bacillariophyceae	<i>Capartogramma crucicula</i> (Grunow) R.Ross 1963	MP
Dinophyceae	<i>Ceratium furcoides</i> (Levander) Langhans 1925	LM
Mediophyceae	<i>Chaetoceros</i> sp. Ehrenberg, 1844	A
Cyanophyceae	<i>Chlamydomonas</i> sp. Ehrenberg, 1833, nom. et typ. cons.	X3
Zygnematophyceae	<i>Closterium</i> sp. Nitzsch ex Ralfs, 1848	P
Chlorophyceae	<i>Coelastrum</i> sp. Nägeli, 1849	J
Trebouxiophyceae	<i>Crucigenia</i> sp. Morren, 1830	J
Cyanophyceae	<i>Cyanosarcina</i> sp. Kováčik, 1988	TC
Zygnematophyceae	<i>Desmidium</i> sp. C.Agardh ex Ralfs, 1848	MP
Chlorophyceae	<i>Desmodesmus</i> sp. (R.Chodat) S.S.An, T.Friedl & E.Hegewald, 1999	J
Bacillariophyceae	<i>Desmogonium ossiculum</i> Metzeltin & Lange-Bertalot 2007	MP
Bacillariophyceae	<i>Desmogonium</i> sp. Ehrenberg, 1848	MP
Trebouxiophyceae	<i>Dictyosphaerium</i> sp. Nägeli, 1849	F
Chrysophyceae	<i>Dinobryon</i> sp. Ehrenberg, 1834	E
Cyanophyceae	<i>Dolichospermum</i> sp. (Ralfs ex Bornet & Flahault) P.Wacklin, L.Hoffmann & J.Komárek, 2009	H1
Chlorophyceae	<i>Eudorina</i> sp. Ehrenberg, 1832	G
Bacillariophyceae	<i>Eunotia asterionelloides</i> Hustedt 1952	MP
Bacillariophyceae	<i>Eunotia monodon</i> Ehrenberg 1843	MP
Bacillariophyceae	<i>Eunotia zygodon</i> Ehrenberg 1843	MP
Chlorophyceae	<i>Eutetramorus</i> sp. Walton, 1918	F
Bacillariophyceae	<i>Frustulia crassinervia</i> (Brébisson ex W.Smith) Lange-Bertalot & Krammer 1996	MP
Bacillariophyceae	<i>Frustulia saxonica</i> Rabenhorst 1853	MP
Bacillariophyceae	<i>Gyrosigma nodiferum</i> (Grunow) Reimer 1966	MP
Bacillariophyceae	<i>Humidophila brekkaensis</i> (J.B.Petersen) R.L.Lowe & al. 2014	MP
Bacillariophyceae	<i>Iconella tenera</i> (W.Gregory) Ruck & Nakov 2016	MP
Cyanophyceae	<i>Komvophoron</i> Anagnostidis & Komárek, 1988	S2
Chlorophyceae	<i>Lacunastrum</i> sp. H.A.McManus, 2011	J
Euglenophyceae	<i>Lepocinclis acus</i> (O.F.Müller) B.Marin & Melkonian 2003	W1
Cyanophyceae	<i>Lyngbya</i> sp. C.Agardh ex Gomont, 1892, nom. et typ. cons.	S1
Coscinodiscophyceae	<i>Melosira varians</i> C.Agardh 1827	TB
Cyanophyceae	<i>Merismopedia</i> sp. Meyen, 1839	LO
Cyanophyceae	<i>Microcystis</i> sp. Lemmermann, 1907, nom. et typ. cons.	M
Zygnematophyceae	<i>Mougeotia</i> sp. C.Agardh, 1824, nom. cons.	T
Bacillariophyceae	<i>Navicula</i> sp. Bory, 1822	MP
Zygnematophyceae	<i>Netrium</i> sp. (Nägeli) Itzigsohn & Rothe, 1856	NA
Bacillariophyceae	<i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson) Ralfs 1861	D
Chlorophyceae	<i>Oedogonium</i> sp. Link ex Hirn, 1900	MP
Trebouxiophyceae	<i>Oocystis</i> sp. Nägeli ex A.Braun, 1855	F
Cyanophyceae	<i>Oscillatoria</i> sp. Vaucher ex Gomont, 1892	TC
Chlorophyceae	<i>Pandorina</i> sp. Bory, 1826	G
Chlorophyceae	<i>Pediastrum</i> sp. Meyen, 1829	J
Dinophyceae	<i>Peridinium</i> sp. Ehrenberg, 1830	LO
Euglenophyceae	<i>Phacus</i> sp. Dujardin, 1841, nom. et typ. cons.	W1
Cyanophyceae	<i>Phormidium</i> sp. Kützing ex Gomont, 1892	TC
Bacillariophyceae	<i>Pinnularia divergens</i> var. <i>malayensis</i> Hustedt 1942	MP
Bacillariophyceae	<i>Pinnularia neomajor</i> Krammer 1992	MP
Bacillariophyceae	<i>Pinnularia viridis</i> (Nitzsch) Ehrenberg 1843	MP
Cyanophyceae	<i>Pseudanabaena</i> sp. Lauterborn, 1915	S1
Cyanophyceae	<i>Raphidiopsis</i> sp. F.E.Fritsch & M.F.Rich, 1929	S2
Bacillariophyceae	<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O.Müller 1895	MP
Zygnematophyceae	<i>Spirogyra</i> sp. Link, 1820, nom. cons.	P

<b>Zygnematophyceae</b>	<i>Staurastrum</i> sp. Meyen ex Ralfs, 1848	<b>NA</b>
<b>Bacillariophyceae</b>	<i>Stauroneis phoenicenteron</i> (Nitzsch) Ehrenberg 1843	<b>MP</b>
<b>Bacillariophyceae</b>	<i>Stenopterobia curvula</i> (W. Smith) Krammer 1987	<b>TB</b>
<b>Bacillariophyceae</b>	<i>Surirella grunowii</i> Kulikovskiy, Lange-Bertalot & Witkovski 2010	<b>TB</b>
<b>Bacillariophyceae</b>	<i>Surirella robusta</i> Ehrenberg 1841	<b>TB</b>
<b>Bacillariophyceae</b>	<i>Surirella splendida</i> (Ehrenberg) Ehrenberg 1834	<b>TB</b>
<b>Chrysophyceae</b>	<i>Synura</i> sp. Ehrenberg, 1834	<b>WS</b>
<b>Euglenophyceae</b>	<i>Trachelomonas</i> sp. Ehrenberg, 1834	<b>W2</b>
<b>Bacillariophyceae</b>	<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère 2001	<b>MP</b>
<b>Chlorophyceae</b>	<i>Westella</i> sp. De Wildeman, 1897	<b>F</b>
<b>Zygnematophyceae</b>	<i>Zygnema</i> sp. C. agardh, 1817, nom. Et typ. Cons.	<b>MP</b>