

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 14/12/2025.



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, EVOLUÇÃO E BIODIVERSIDADE

**EFEITOS DIRETOS E INDIRETOS DE MUDANÇAS AMBIENTAIS SOBRE A
ESTRUTURA E ESTABILIDADE DE REDES TRÓFICAS**

GEDIMAR PEREIRA BARBOSA

**Rio Claro – SP
2024**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, EVOLUÇÃO E BIODIVERSIDADE

**EFEITOS DIRETOS E INDIRETOS DE MUDANÇAS AMBIENTAIS SOBRE A
ESTRUTURA E ESTABILIDADE DE REDES TRÓFICAS**

GEDIMAR PEREIRA BARBOSA

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ecologia, Evolução e Biodiversidade.

Orientador: Dr. Tadeu de Siqueira Barros

**Rio Claro – SP
2024**

B238e	Barbosa, Gedimar Pereira Efeitos diretos e indiretos de mudanças ambientais sobre a estrutura e estabilidade de redes tróficas / Gedimar Pereira Barbosa. -- Rio Claro, 2024 102 f. : il., tabs., fotos, mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro Orientador: Tadeu de Siqueira Barros 1. redes ecológicas. 2. metacomunidades. 3. mudanças climáticas. 4. uso do solo. 5. modelagem por equações estruturais. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EFEITOS DIRETOS E INDIRETOS DE MUDANÇAS AMBIENTAIS SOBRE A
ESTRUTURA E ESTABILIDADE DE REDES TRÓFICAS

AUTOR: GEDIMAR PEREIRA BARBOSA

ORIENTADOR: TADEU DE SIQUEIRA BARROS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ecologia, Evolução e Biodiversidade, área: Biodiversidade pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. TADEU DE SIQUEIRA BARROS (Participação Virtual)
Departamento de Biodiversidade / Unesp - IB Rio Claro

Documento assinado digitalmente
 **TADEU DE SIQUEIRA BARROS**
Data: 19/01/2024 16:45:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. EUGENIA ZANDONÀ (Participação Virtual)
Departamento de Ecologia / Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Prof. Dr. RAUL COSTA PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Animal / Universidade Estadual de Campinas

Rio Claro, 14 de dezembro de 2023

Dedico esta tese aos meus pais, um operário e uma cortadora de cana que, privados da própria educação, lutaram pelos estudos do menino bagunceiro.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Tadeu Siqueira, pela paciência, empenho e dedicação com a qual conduziu minha orientação. Obrigado pela imensurável sabedoria que você compartilhou comigo ao longo desses anos, pelos conselhos, conversas e horas dedicadas ao meu desenvolvimento como cientista. Obrigado por confiar em mim, e por me apoiar nos momentos difíceis. Saiba que, para além de todo aprendizado profissional, eu levo comigo a sua capacidade de acreditar no potencial das pessoas e enxergá-las como únicas.

Aos colegas incríveis que eu fiz durante o período de doutorado, Neliton, Ana Carolina, Cristina, Gabriel e Alison, cujos momentos de conversa, risadas e reflexões me ajudaram a transitar pelos momentos difíceis da pós-graduação.

Ao professor Victor Saito (UFSCar), pela parceria ao longo do doutorado, incluindo a possibilidade de experimento que resultou em um dos capítulos desta tese. Agradeço também, pelas conversas e conselhos, tão valiosos para o desenvolvimento desta tese e da minha formação profissional.

Aos professores Gilmar Perbiche Neves e Hugo Sarmento (UFSCar), por abrirem seus laboratórios e compartilharem conhecimentos valiosos, que contribuíram para os capítulos aqui apresentados.

Aos professores Alexandre Colatto (UFScar) e Márcia Pechula (UNESP) que, por meio de conversas sobre ciência, me ajudaram a refletir sobre a minha atuação e contribuíram para minha formação quanto cientista.

Aos professores Mathias Pires (UNICAMP) e Miriam Albrecht (UFRJ), que durante meu exame de qualificação teceram conselhos e considerações relevantes para o desenvolvimento desta tese.

Aos professores Eugenia Zandonà (UERJ) e Raul Costa Pereira (UNICAMP), que teceram comentários valiosos sobre a versão final desta tese e sobre a minha atuação como cientista.

A todas as pessoas que dedicaram seu tempo e esforço, inclusive de forma voluntária, aos perrengues e alegrias dos experimentos: Jorge, Camila, Helen, Aline, Ana, Ana Laura e Fabiana.

Aos servidores do Departamento de Biodiversidade e do Jacarezário, em especial Cristina, Carlinhos e Ailton pelo apoio durante o desenvolvimento dos trabalhos.

Aos servidores da STPG, em especial Ivana e Felipe, que tanto me socorreram em relação às burocracias da pós-graduação.

Aos discentes de graduação que eu tive o prazer de conhecer durante os períodos como docente bolsista. Saibam que a confiança e a contribuição de vocês foi fundamental para a minha carreira.

A Leticia, pela sua competência, profissionalismo e conselhos valiosos que me ajudaram durante o doutorado.

Aos meus pais, Ademar e Maria, aos meus irmãos (de sangue e de afeto), Gismar, Gislene, Márcio e Gisele, e aos meus pequenos Laura, Alice, Pedro, Amora e Ana, pelo apoio incondicional, pelo carinho e por acreditarem em mim. Tem um pedacinho de cada um de vocês em tudo o que eu sou e faço.

A minha humana favorita, Marina, e à nossa família de peninhas, Sol, Bob, Morgana, Lady (*in memoriam*), Manga, Nenê e Paçoca. Obrigado pela paciência e pelo amor, sempre! Dividir esse espaço e tempo com vocês foi a melhor coisa que já me aconteceu.

Por fim, agradeço a todos os cientistas, mulheres e homens, que dedicam suas vidas a explorar a complexidade da natureza. A produção científica de vocês foi o farol que me guiou até aqui.

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

Processo nº 2019/06291-3, Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP).

“Passou vários dias feito um enfeitiçado, repetindo para si mesmo em voz baixa uma fieira de assombrosas conjecturas, sem dar crédito ao próprio entendimento. Finalmente, numa terça-feira de dezembro, na hora do almoço, soltou de um golpe só toda a carga de seu tormento. As crianças haveriam de se recordar pelo resto de sua vida a augusta solenidade com que seu pai sentou-se à cabeceira da mesa, tremendo de febre, devastado pela prolongada vigília e pela ferida aberta de sua imaginação, e revelou a elas sua descoberta:
— A terra é redonda feito uma laranja.”

Gabriel García Márquez

Resumo

Em um cenário crescente de mudanças ambientais intensas e imprevisíveis, rastrear como a biodiversidade é afetada se torna uma tarefa cada vez mais difícil e necessária. No entanto, a maioria dos estudos ainda aborda os efeitos de mudanças ambientais sobre aspectos predominantemente taxonômicos, desconsiderando a influência que essas mudanças podem ter na forma como as espécies interagem na natureza. Deste modo, esta tese se propõe a avaliar as relações entre mudanças ambientais e redes tróficas em ecossistemas aquáticos, considerando os caminhos diretos e indiretos pelos quais as mudanças ambientais influenciam a biodiversidade em diferentes escalas. No primeiro capítulo, eu abordei como redes tróficas em lagos e riachos respondem a mudanças climáticas e de uso do solo, considerando diferenças intrínsecas entre esses ecossistemas. Juntando dados disponíveis na literatura, informações geográficas e modelagem por equações estruturais, eu mostrei que a estrutura de redes tróficas é direta e indiretamente influenciada pela intensidade de uso do solo, e por aumentos históricos na temperatura e precipitação. Além disso, mudanças climáticas afetam a estrutura das redes por meio de efeitos negativos na proporção de predadores de topo. Porém, o tipo de ecossistema atua como um importante mediador do tamanho dos efeitos. No segundo capítulo, por meio de uma abordagem experimental com metacomunidades planctônicas, explorei o papel de agroquímicos na estabilidade de produtores e consumidores, ao longo de diferentes escalas (local e regional) e níveis de organização (populações, comunidades e metacomunidades). Novamente, por meio de modelagem por equações estruturais, eu mostrei que a intensificação no uso de agroquímicos altera a forma como a variação temporal se propaga da escala local para a regional, em ecossistemas de água doce. Porém, os resultados dependem da posição trófica dos organismos, do

nível de organização e do tipo de agroquímico considerado. Em suma, os resultados do dois capítulos indicam que as relações entre mudanças ambientais e redes tróficas são complexas e demandam uma análise detalhada dos caminhos (diretos e indiretos) pelos quais elas ocorrem. Diferentes variáveis, como a proporção de predadores, tipo de ecossistema e a sincronia das populações, mediam as respostas observadas na estrutura das redes tróficas e na estabilidade de produtores e consumidores. Dessa forma, além de reforçar a necessidade de se considerar as interações entre as espécies, esta tese sugere que, para avançarmos nosso entendimento sobre como mudanças ambientais influenciam a biodiversidade, se faz necessário investigar a intrincada teia de relações indiretas que ligam predadores ambientais a respostas da biodiversidade.

Palavras-chave: redes ecológicas; metacomunidades; mudanças climáticas; uso do solo; modelagem por equações estruturais.

Abstract

In a growing scenario of intense and unpredictable environmental changes, monitoring how biodiversity is affected becomes an increasingly difficult and necessary task. However, most studies still consider the effects of environmental changes on purely taxonomic aspects, disregarding the influence that these changes might have on how species interact in nature. Thus, this thesis aims to investigate the relationships between environmental changes and food webs in aquatic ecosystems, considering the direct and indirect paths in which environmental changes influence biodiversity at different scales. In the first chapter, I addressed how food webs in lakes and streams respond to climate and land use changes, considering intrinsic differences between these ecosystems. Combining available data, geographic information and structural equation modeling, I showed that food web structure is directly and indirectly influenced by land use intensity, and by historical increases in temperature and precipitation. In addition, effects of climate change on the structure of food webs occurred through negative relationships with the proportion of top predators. However, ecosystem type is an important mediator of effect size. In the second chapter, I explored the role of agrochemicals in the stability of producers and consumers, across different scales (local and regional) and levels of organization (populations, communities and metacommunities), using an experimental approach with planktonic metacommunities. Through structural equation modeling, I showed that agrochemical intensification influences how temporal variability propagates from local to regional scales in freshwater ecosystems. However, the results depend on organism trophic position, level of organization and type of agrochemical considered. Overall, the results of the two chapters indicate that the relationships between environmental changes and food webs are complex and require a detailed analysis of the paths (direct and indirect)

through which they occur. Different variables, such as the fraction of top predators, ecosystem type and population synchrony, mediate the responses of food web structure and the stability of producers and consumers. Thus, besides the need to consider species interactions, this thesis suggests that, to advance our understanding of how environmental changes influence biodiversity, it is necessary to investigate the intricate web of indirect relationships that link environmental predictors to overall biodiversity responses.

Keywords: ecological networks; metacommunities; climate change; land use; structural equation modeling.

Sumário

Apresentação	12
1. Introdução geral.....	17
1.1. Um novo olhar para um problema atemporal	17
1.2. Redes ecológicas e mudanças ambientais	18
1.3. Os ecossistemas de água doce	21
1.4. Como esta tese aborda o tema	23
1.5. Referências bibliográficas	24
2. Direct and indirect relationships of climate and land use change with food webs in lakes and streams	28
2.1. Introduction	29
2.2. Methods	33
2.2.1. Food web data	34
2.2.2. Environmental variables	35
2.2.3. Food web variables.....	36
2.2.4. Data analysis	37
2.3. Results	40
2.4. Discussion.....	44
2.5. References.....	48
2.6. Data availability	52
2.7. Appendix 1: Data Sources.....	53
2.8. Supporting information	55
2.8.1. Food web data	55
2.8.2. Land use intensity data for large waterbodies	58
2.8.3. Climate data.....	58
2.8.4. Model description.....	63
2.8.5. Sensitivity analysis.....	64
2.8.6. Supporting information references.....	69
3. Agrochemical intensification induces contrasting responses on temporal variability of planktonic producers and consumers across scales	71
3.1. Introduction	72
3.2. Methods	77
3.2.1. Experimental design and sampling	77
3.2.2. Predictor and response variables	80
3.2.3. Data analysis	81

3.3.	Results	82
3.4.	Discussion.....	87
3.5.	References	91
3.6.	Supporting information	95
3.6.1.	Details on experimental methods.....	95
3.6.2.	Model description.....	97
3.6.3.	Supplementary results	99
3.6.4.	Supporting information references.....	99
4.	Considerações finais.....	100

Apresentação

Aqueles que, de livre e espontânea vontade, optam pela leitura de uma tese, têm uma ideia formada sobre o que encontrarão antes mesmo de ler a primeira linha. Sabem que uma tese é cheia de referências sobre um tema, descrições detalhadas de métodos e processos, dados, imagens e tabelas, que são convertidas em explicações elaboradas e confrontadas com a imensidão (ou, nem tanto!) do que se conhece até o momento. E, tudo isso, geralmente serve a um único objetivo: o avanço do conhecimento sobre um fenômeno complexo e inquietante na vida dos seres humanos. Ainda que, no despertar desse processo, o ser humano em questão seja apenas o solitário autor, que dedica parte da sua existência a acalmar as dúvidas que rondam sua cabeça e que, às vezes, não o deixam dormir. Sim! Eu tenho certeza de que você, que já fez um trabalho científico e está lendo isso, consegue se lembrar de pelo menos um momento em que não tenha conseguido dormir, tentando encontrar sentido nos fragmentos mirabolantes de ideias (dados, dados e mais dados!) que o atazanaram durante o dia. E que, esse sentido tão buscado, veio só meses depois, enquanto seu arroz para o almoço de domingo queimava no fogão. Meu ponto é: o que lemos nas longas páginas brancas, em tamanho 12, espaço duplo, é uma fração muito pequena do que a tese realmente significa para quem a escreveu. E, embora as teses escritas por pessoas (em uma era de *chatGPT*, é bom deixar isso claro) sejam parecidas em sua apresentação, elas são carregadas das mais diversas histórias possíveis. Histórias que são escondidas pelo manto das formalidades e, se você tiver sorte, descobertas científicas mais interessantes ao público. Assim, eu quero usar este espaço para falar sobre como se deu esta tese, principalmente de dois momentos de sua história que, para o bem ou mal, moldaram o que eu apresento

aqui hoje. Prometo não me alongar demais, mas eu não o julgarei, caso você decida avançar para a página 17.

Fazer uma tese é algo trabalhoso e, se você for uma pessoa ansiosa, como este autor que vos fala, aprenderá da pior forma que escrever uma tese requer muita paciência. Transformar desejos e ideias, por vezes desconexas, em um projeto exequível, dentro das condições e prazos estipulados, requer tempo. O projeto que deu origem a esta tese levou quase um ano para ficar pronto, e foi resultado de muito diálogo, estudos e reflexões. E com a valiosa ajuda do meu orientador, chegamos a um projeto que tinha, em sua essência, tudo o que eu acreditava que um projeto de doutorado em Ecologia podia conter para ser legal. Divididos em três capítulos bem robustos, o projeto original desta tese envolvia síntese de dados, dois experimentos bacanas, simulações computacionais, colaborações e intercâmbio. Abordava a ecologia de metacomunidades (ou meta-redes), com ênfase no papel de processos (e.g., dispersão), e em como as mudanças ambientais “bagunçavam” a estrutura das redes de interações em diferentes escalas. Enfim, eu estava bastante feliz com a proposta! Uma professora me disse uma vez, que tem um motivo para os cientistas organizarem as coisas em “projetos”. O projeto caracteriza uma intenção, um desejo, de se realizar algo no futuro. É algo delineado e estruturado, mas que ainda precisa ser realizado. Repare: é a premissa no presente sobre algo que se encontra no futuro. Como você vai concluir, se ler esta tese até o fim, eu consegui entregar apenas dois dos três capítulos, e eles ficaram um pouco diferentes do que foi projetado (embora eu tenha um orgulho enorme de cada linha aqui escrita).

Eu acho que você, que se disponibilizou a ler esta tese e ainda não desistiu desta apresentação, consegue imaginar qual foi o primeiro momento em que meu “projeto dos sonhos” encontrou seu maior obstáculo. Eu vou resumir: os últimos anos

foram bem doidos! Eu iniciei o doutorado no segundo semestre de 2019, e passei quase metade dele longe das atividades presenciais. A pandemia de Covid-19 mudou a nossa forma de viver, nos isolou dentro de casa e, pior de tudo, levou consigo a vida de muitas pessoas (para ser exato, 706.531 pessoas morreram no Brasil, até o momento em que escrevo este texto). As universidades, assim como outros locais de intensa aglomeração de pessoas, foram fechadas, o ensino se tornou remoto (distante), e a pesquisa foi abalada pela impossibilidade de estarmos nos laboratórios. Aquele laboratório, onde a gente discutia ideias e fazia um monte de coisa legal, indispensável para o nosso trabalho. Logo, a única coisa ainda funcionando (e a mil por hora!) eram as nossas cabeças, num *loop* infinito de acordar, ligar a câmera, desligar a câmera, comer, ligar a câmera, “*Fulano, você está falando com o microfone desligado!*”. Enfim, minhas amostras coletadas no primeiro experimento (em 2019) ficaram guardadas, e todas as atividades foram adiadas para, como gostávamos de dizer na época, “quando as coisas voltassem a normalidade”. A “normalidade” para a minha tese, viria apenas em janeiro de 2022, com a realização de um experimento previsto para ocorrer no primeiro semestre de 2020. Este experimento (de 2022), infelizmente, não chegou a ser incorporado a esta tese.

Assim como os outros alunos de pós-graduação, durante a pandemia, eu me coloquei na tarefa de encontrar algo que fosse plausível e pudesse ser feito para minimizar os impactos do isolamento no meu doutorado. Foi nessa busca que meu capítulo 1 nasceu, nas entranhas do trabalho remoto, e depois de muito diálogo com meu orientador. Neste capítulo, abordo como mudanças climáticas e de uso do solo influenciam indiretamente a estrutura de redes tróficas em ecossistemas aquáticos. Do isolamento, na kitnet 32, rua das Hortênsias, 183, cruzei dados multicontinentais disponíveis na literatura, processamento de informações geográficas e modelagem

por equações estruturais, para mostrar que as relações entre o clima, a conversão de áreas naturais em antrópicas e as redes tróficas nem sempre é direta (*spoiler!*). Ou seja, variáveis como a proporção de predadores mediam a forma como as redes estruturam-se frente a estas mudanças. Ainda, mostramos que as respostas dependem do tipo de ecossistema de água doce estudado, divergindo entre lagos e riachos. Ufa! O resultado de tudo isso foi um manuscrito muito legal que, depois de algumas submissões, rejeições, e reformatações, publicamos esse ano na revista *Global Ecology and Biogeography*.

No início de 2022, ainda sob a influência do Covid-19 e com as faces cobertas pelas máscaras, finalmente retornamos ao laboratório e às atividades presenciais. Eu estava otimista, mas é aqui que entra o segundo momento na história desta tese, e que influenciou profundamente o seu desenvolvimento. Seguindo um movimento crescente na população, o período de isolamento foi muito nocivo para a minha saúde mental. Felizmente, logo que identifiquei os sintomas, busquei ajuda profissional e consegui aliviar bastante a influência disso no trabalho. Porém, foi só na volta ao presencial, que eu realmente tomei consciência do quanto o período de pandemia havia deixado marcas, e o quanto isso havia influenciado e ainda influenciaria a ciência que eu estava tentando produzir. Eu pensei bastante sobre incluir esse trecho aqui, principalmente porque a saúde mental de pós-graduandos ainda é muito ignorada dentro das universidades, mesmo com todas as estatísticas que informam um aumento crônico nos casos de ansiedade e depressão. Mas, além de encarar isso como algo relevante, e que está silenciosamente moldando toda uma geração de pesquisadores, eu não queria que o meu caso fosse apenas mais um para a estatística. Então, se você chegou até esta tese, leu essas linhas e se encontra em uma situação parecida, tenha certeza de que sim, é possível melhorar. E, aqui, eu deixo novamente

um agradecimento especial ao meu orientador, Tadeu, pela compreensão e paciência, ainda que eu nunca tenha discutido isso abertamente com ninguém no trabalho.

Considerando, então, as condições impostas, eu direcionei meu último ano de doutorado a outras atividades acadêmicas, e decidi redigir mais um manuscrito apenas, que é apresentado aqui como capítulo 2. Este capítulo contou com um amplo experimento realizado em 2019, onde metacomunidades planctônicas foram estabelecidas em mesocosmos, para simular efeitos regionais de atividades agrícolas, em especial o uso de agroquímicos, em ecossistemas aquáticos. Nele, eu abordo como a variação temporal se propaga ao longo dos níveis de organização ecológica, em redes tróficas formadas por produtores e consumidores, sob o efeito de um inseticida (fipronil) e um fertilizante (vinhaça). De forma geral, eu mostro os caminhos indiretos pelos quais estes agroquímicos podem influenciar a variabilidade temporal na abundância de metacomunidades multitróficas, indicando de que forma as respostas de produtores e consumidores diferem entre si.

Concluindo esta apresentação, eu gostaria apenas de dizer que esta tese aborda a complexidade das relações entre mudanças ambientais e redes tróficas. É um tema bastante explorado na ecologia, mas que ainda carece de estudos detalhados, principalmente em face de mudanças ambientais cada vez mais intensas e imprevisíveis. Gostaria de dizer também, que esta tese tem uma história própria, e que se mistura com a minha história. Por fim, eu sou grato por poder apresentá-la, assim como sou grato a todos aqueles que contribuíram para que ela existisse.

1. Introdução geral

1.1. Um novo olhar para um problema atemporal

Entender como mudanças ambientais moldam a biodiversidade é um dos objetivos que transpassa gerações na pesquisa em ecologia de comunidades. Dada a importância e a complexidade desse assunto, cientistas têm se esforçado para desvendar o papel de mudanças ambientais na estrutura de diferentes grupos biológicos (Dornelas *et al.* 2014; Flynn *et al.* 2009; Newbold *et al.* 2020), ecossistemas (Hautier *et al.* 2020; Jackson *et al.* 2016; Magurran *et al.* 2015), e escalas espaciais e temporais diversas (Dornelas *et al.* 2014; Petsch *et al.* 2021; Siqueira *et al.* 2015a). Evidências sugerem alterações substanciais nas comunidades, que transitam entre a perda de diversidade, medida de diferentes formas (Flynn *et al.* 2009; Schürings *et al.* 2022), e modificações na composição temporal e espacial das comunidades (Dornelas *et al.* 2014; Leão *et al.* 2020; Siqueira *et al.* 2015a), com fortes indícios de homogeneização biótica (Jia *et al.* 2020; Olden 2006; Peoples *et al.* 2020). No entanto, a maioria dos estudos ainda é centrada apenas em descritores relacionados às espécies (e.g., utilizando riqueza de espécies como variável resposta; Siqueira *et al.* 2015b), e que talvez não revelem respostas consistentes sobre como mudanças ambientais afetam a biodiversidade. Por exemplo, apesar de intensas mudanças ambientais nos ecossistemas aquáticos e terrestres ao longo dos anos, a diversidade alfa de espécies parece não se alterar sistematicamente em series temporais longas (Dornelas *et al.* 2014). Em contrapartida, valores de diversidade beta em metacomunidades expostas a mudanças ambientais, como uso do solo, variam consideravelmente entre diferentes regiões e táxons (Leão *et al.* 2020; Petsch *et al.* 2021; Schneck *et al.* 2022). Dessa forma, grande atenção têm sido dada para meios alternativos de se medir os efeitos de mudanças ambientais sobre a biodiversidade, e

um exemplo significativo é o entendimento do papel que as interações entre as espécies (e.g. tróficas e mutualísticas) têm na manutenção das comunidades (Poisot *et al.* 2016) e, possivelmente, na regulação de como elas respondem a mudanças ambientais (Tylianakis & Morris 2017).

1.2. Redes ecológicas e mudanças ambientais

De forma geral, redes ecológicas descrevem sistemas complexos onde unidades (e.g., indivíduos e espécies), conectam-se entre si por links que denotam as interações entre elas. Redes ecológicas fornecem informações valiosas sobre a estrutura dos ecossistemas, e são comumente utilizadas para representar interações como presa-predador (tróficas), animal-planta (mutualísticas e de herbivoria) e parasita-hospedeiro (parasitárias) (Guimarães 2020). No nível de comunidades, redes são utilizadas para investigar os mecanismos que regulam as interações entre espécies (Allesina *et al.* 2008; Brose *et al.* 2019), propriedades emergentes em sua estrutura (ou arquitetura) (Bascompte 2009; Dunne *et al.* 2002b), e de que forma essa estrutura pode ser associada a fatores ambientais (Thompson & Gonzalez 2017; Tylianakis & Morris 2017). Ao longo dos anos, uma série de métodos e métricas foram desenvolvidas para se quantificar a estrutura e complexidade de redes ecológicas (Delmas *et al.* 2019; Guimarães 2020). Destacam-se métricas bastante utilizadas, como riqueza (número de espécies), tamanho da rede (número de links), densidade de links (número médio de links por espécie), conectância (proporção de interações observadas em relação ao número máximo possível), nível de aninhamento (interações estabelecidas por especialistas formam um subconjunto daquelas realizadas por generalistas), modularidade (formação e compartimentos dentro da rede), e centralidade (mede o quão “influente” – e.g., mais conectada – as espécies são dentro da rede) (Delmas *et al.* 2019).

Estudos sobre alterações na estrutura de redes ecológicas são populares também, devido a relação entre estrutura, complexidade e estabilidade dos ecossistemas (Dunne *et al.* 2002b; Landi *et al.* 2018; Thebault & Fontaine 2010). A relação entre complexidade e estabilidade é um debate antigo na ecologia (Landi *et al.* 2018), e o principal argumento a favor dessa tese foi, de certa forma, proposto por MacArthur (1955), que sugeriu que a estabilidade aumenta com o número de espécies e interações entre elas (e.g., maior conectância). Mais tarde, Robert Paine (1966) complementou esse argumento, mostrando que a diversidade de espécies, e consequentemente a estabilidade em uma rede trófica, está ligada com o número de predadores na rede. Estas ideias iniciais foram desafiadas por Robert May (1972), que demonstrou matematicamente que sistemas mais diversos tendem a apresentar comportamento mais instável, conforme o número de espécies aumenta. O trabalho de Robert May (1972) foi bastante criticado, principalmente pelo argumento de que as comunidades aleatórias utilizadas por ele não simulavam ecossistemas reais, ignorando, por exemplo, diferenças observadas entre níveis tróficos (Landi *et al.* 2018). Além disso, estudos posteriores sobre a arquitetura de redes tróficas indicaram que a estrutura dos ecossistemas não é aleatória (Dunne *et al.* 2002b, a), reforçando a ideia de que mais realismo ecológico era preciso para o entendimento da relação entre complexidade e estabilidade (Landi *et al.* 2018). Assim, outras variáveis, além da diversidade, passaram a ser consideradas, como por exemplo, a força das interações presa – predador, que podem levar ao aumento da estabilidade em redes pequenas, mas apresenta um efeito inverso em redes maiores (Gross *et al.* 2009).

Mudanças ambientais, como as causadas por intervenções humanas, podem influenciar a estrutura das redes ecológicas por meio de três mecanismos principais: modificações na composição das espécies, na probabilidade ou frequência de

interações, e em processos evolutivos (Tylianakis & Morris 2017). Modificações na composição de espécies são resultados diretos de dinâmicas de invasões e extinções (Wardle *et al.* 2011), o que faz com que as interações variem devido à separação ou sobreposição de espécies no espaço (Poisot *et al.* 2015; Tylianakis & Morris 2017). Em contrapartida, mudanças na frequência de interações dependem da probabilidade de encontro das espécies no espaço (Tylianakis & Morris 2017). Por exemplo, o consumo de presas é fortemente afetado por flutuações ambientais (Penn *et al.* 2017), principalmente devido à sensibilidade de predadores a distúrbios, inclusive espécies generalistas (Wimp *et al.* 2019). Esse efeito na população de predadores pode alterar a razão presa – predador (Ryall & Fahrig 2005), o que levaria a redução na probabilidade de encontro entre as espécies. Por fim, mudanças ambientais causadas por intervenções humanas influenciam características intrínsecas da história de vida das espécies, alterando traços fundamentais para que as interações ocorram (e.g., tamanho corporal e fenologia; Brose *et al.* 2019; Loeuille 2019). Tais mudanças também podem resultar em perdas ou ganhos de interações, mesmo que a co-ocorrência e abundância favoreçam a associação entre as espécies (Tylianakis & Morris 2017).

Independente do mecanismo associado à modificação, a escala analisada exerce grande influência na forma como as redes respondem às variações ambientais (Tylianakis & Morris 2017). Localmente, espera-se que mudanças ambientais influenciem a complexidade das redes por meio de alterações na abundância e na ocorrência de espécies (Sabatino *et al.* 2010), na taxa de consumo de presas por predadores (Penn *et al.* 2017) e na realização de potenciais interações (Laliberté & Tylianakis 2010). Na escala regional (e.g., metacomunidades), mudanças ambientais podem levar a modificações estruturais severas nas redes (Thompson & Gonzalez

2017), podendo acarretar num processo de homogeneização espacial das redes de interações (Laliberté & Tylianakis 2010). Porém, respostas das redes a mudanças ambientais no nível de metacomunidades (ou meta-redes) dependem de outros processos atuando em conjunto. Por exemplo, modelos preveem que, ainda que as comunidades sejam afetadas por processos exclusivamente locais, como a presença de distúrbio, resposta das redes ecológicas dependerão da capacidade de dispersão dos organismos entre as manchas (Galiana *et al.* 2018; Pillai *et al.* 2010; Thompson & Gonzalez 2017). Ou seja, quando a dispersão é alta, a estrutura local da rede de interação se mantém, graças a capacidade que alguns consumidores (e.g., predadores de topo) tem de se deslocar no espaço, explorando recursos em diferentes manchas e garantindo a coexistência regional (Pillai *et al.* 2010).

1.3. Os ecossistemas de água doce

Os ecossistemas de água doce figuram entre os ecossistemas mais afetados por mudanças antrópicas ao redor do mundo (Reid *et al.* 2019; Vörösmarty *et al.* 2010). O crescimento desordenado da população humana e o aumento do consumo isolam corpos d'água em paisagens urbanas e agrícolas, e afetam faces distintas de sua biodiversidade por meio da destruição de habitats, escassez de recursos e poluição (Foley 2005; Vörösmarty *et al.* 2010). No entanto, ainda que uma atenção crescente seja dada a forma como redes tróficas são afetadas por mudanças ambientais em ecossistemas dulcícolas (Chen *et al.* 2021; Ho *et al.* 2022; Jackson *et al.* 2020; O'Gorman *et al.* 2019), estudos ainda carecem de um entendimento detalhado sobre aspectos fundamentais. Por exemplo, de que forma diferenças intrínsecas entre lagos e riachos influenciam na resposta das redes tróficas a mudanças climáticas globais e de uso do solo. Ou ainda, como agrotóxicos utilizados de forma sistemática na

produção agrícola influenciam aspectos como a estabilidade de redes tróficas, em corpos d'água ao longo de paisagens agrícolas.

Mudanças climáticas e de uso do solo influenciam redes tróficas em ecossistemas dulcícolas por diferentes caminhos. Ao passo em que áreas de vegetação natural são convertidas em paisagens agrícolas, a complexidade das redes tróficas é reduzida por alterações na composição de espécies e interações (Jackson *et al.* 2020; Wilkinson *et al.* 2018), dominância de espécies generalistas (Schürings *et al.* 2022; Wilkinson *et al.* 2018), e efeitos em cascata (e.g., aumento de herbivoria em face da extinção de predadores de topo; Estes *et al.* 2011). Como resultado, redes tróficas em regiões com intenso uso do solo são simplificadas, com redução de níveis tróficos e de sua diversidade funcional (Chen *et al.* 2021; Jackson *et al.* 2020; Price *et al.* 2019). Mudanças climáticas, por sua vez, podem levar redes ao colapso por conta de limitações impostas ao fluxo de biomassa entre níveis tróficos (Ledger *et al.* 2013; Rosset *et al.* 2017), extinções de espécies sensíveis, como predadores de topo com alta demanda energética (Jackson *et al.* 2020; Wootton 2017), e alterações na conectividade hidrológica, que pode levar manchas ao isolamento geográfico (Palmer & Ruhi 2019).

Além da simplificação da paisagem, atividades agrícolas também influenciam redes tróficas por meio da contaminação por agroquímicos, utilizados de forma indiscriminada para aumento da produção agrícola (Hayasaka *et al.* 2012; Mello *et al.* 2019; Rumschlag *et al.* 2020). Evidências empíricas mostram que a contaminação de corpos d'água por inseticidas (e.g., fipronil) levam a modificações no tamanho corporal, na abundância e na composição de espécies não-alvo, principalmente invertebrados (Hayasaka *et al.* 2012; Hébert *et al.* 2021). Tais mudanças, consequentemente, refletirão na forma como consumidores e recursos interagem, podendo levar redes

tróficas a colapsarem. Em contrapartida, fertilizantes químicos podem levar corpos d'água a eutrofização, modificando a base de redes tróficas por meio do crescimento excessivo de espécies dominantes, como cianobactérias (Burford & O'Donohue 2006). Além disso, apesar destes compostos geralmente afetarem determinados grupos biológicos, seus efeitos podem ser detectados em grupos diversos, ao longo das cadeias tróficas, por meio de efeitos cascata (Rumschlag *et al.* 2020).

1.4. Como esta tese aborda o tema

Em um cenário crescente de mudanças ambientais globais (Guiden *et al.* 2019; Johnson *et al.* 2017), os ecossistemas estão expostos a condições cada vez mais intensas e imprevisíveis (Potapov *et al.* 2021). Isso dificulta nossa capacidade rastrear os efeitos na biodiversidade, e investigar como as interações entre as espécies são afetadas é fundamental para uma real compreensão da natureza. Além disso, esforços recentes têm mostrado que as respostas de redes tróficas a mudanças ambientais não são diretas, e dissolvem-se numa intrincada teia de relações entre variáveis (Gibert 2019; Ho *et al.* 2022; Rumschlag *et al.* 2020), formando um sistema complexo e que demanda um olhar mais holístico sobre este fenômeno. Deste modo, esta tese se propõe a aventurar-se na complexidade das relações entre redes tróficas e mudanças ambientais em ecossistemas aquáticos, considerando os caminhos diretos e indiretos pelos quais as mudanças ambientais influenciam comunidades multitróficas em diferentes escalas. Dividida em dois capítulos independentes, esta tese primeiro aborda como redes tróficas em lagos e riachos respondem a mudanças climáticas e de uso do solo, considerando diferenças intrínsecas entre esses ecossistemas (capítulo 1). Depois, por meio de uma abordagem experimental com metacomunidades planctônicas, explorei o papel de agroquímicos (inseticidas e fertilizantes) na sincronia e variação temporal de produtores e consumidores (capítulo

2), ao longo de diferentes escalas (local e regional) e níveis de organização (populações, comunidades e metacomunidades).

1.5. Referências bibliográficas

- Allesina, S., Alonso, D. & Pascual, M. (2008). A General Model for Food Web Structure. *Science*, 320, 658–661.
- Bascompte, J. (2009). Disentangling the Web of Life. *Science*, 325, 416–419.
- Brose, U., Archambault, P., Barnes, A.D., Bersier, L.-F., Boy, T., Canning-Clode, J., *et al.* (2019). Predator traits determine food-web architecture across ecosystems. *Nat Ecol Evol*, 3, 919–927.
- Burford, M.A. & O'Donohue, M.J. (2006). A comparison of phytoplankton community assemblages in artificially and naturally mixed subtropical water reservoirs. *Freshwater Biol*, 51, 973–982.
- Chen, Z., Dudgeon, D. & Liew, J.H. (2021). Human settlements in headwater catchments are associated with generalist stream food webs. *Hydrobiologia*, 848, 4017–4027.
- Delmas, E., Besson, M., Brice, M.-H., Burkle, L.A., Dalla Riva, G.V., Fortin, M.-J., *et al.* (2019). Analysing ecological networks of species interactions: Analyzing ecological networks. *Biol Rev*, 94, 16–36.
- Dornelas, M., Gotelli, N.J., McGill, B., Shimadzu, H., Moyes, F., Sievers, C., *et al.* (2014). Assemblage Time Series Reveal Biodiversity Change but Not Systematic Loss. *Science*, 344, 296–299.
- Dunne, J.A., Williams, R.J. & Martinez, N.D. (2002a). Food-Web Structure and Network Theory: The Role of Connectance and Size. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 12917–12922.
- Dunne, J.A., Williams, R.J. & Martinez, N.D. (2002b). Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance. *Ecol Letters*, 5, 558–567.
- Estes, J.A., Terborgh, J., Brashares, J.S., Power, M.E., Berger, J., Bond, W.J., *et al.* (2011). Trophic Downgrading of Planet Earth. *Science*, 333, 301–306.
- Flynn, D.F.B., Gogol-Prokurat, M., Nogeire, T., Molinari, N., Richers, B.T., Lin, B.B., *et al.* (2009). Loss of functional diversity under land use intensification across multiple taxa. *Ecology Letters*, 12, 22–33.
- Foley, J.A. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309, 570–574.
- Galiana, N., Lurgi, M., Claramunt-López, B., Fortin, M.-J., Leroux, S., Cazelles, K., *et al.* (2018). The spatial scaling of species interaction networks. *Nat Ecol Evol*, 2, 782–790.
- Gibert, J.P. (2019). Temperature directly and indirectly influences food web structure. *Sci Rep*, 9, 5312.

- Gross, T., Rudolf, L., Levin, S.A. & Dieckmann, U. (2009). Generalized Models Reveal Stabilizing Factors in Food Webs. *Science, New Series*, 325, 747–750.
- Guiden, P.W., Bartel, S.L., Byer, N.W., Shipley, A.A. & Orrock, J.L. (2019). Predator–Prey Interactions in the Anthropocene: Reconciling Multiple Aspects of Novelty. *Trends in Ecology & Evolution*, 34, 616–627.
- Guimarães, P.R. (2020). The Structure of Ecological Networks Across Levels of Organization. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 51, 433–460.
- Hautier, Y., Zhang, P., Loreau, M., Wilcox, K.R., Seabloom, E.W., Borer, E.T., *et al.* (2020). General destabilizing effects of eutrophication on grassland productivity at multiple spatial scales. *Nat Commun*, 11, 5375.
- Hayasaka, D., Korenaga, T., Suzuki, K., Saito, F., Sánchez-Bayo, F. & Goka, K. (2012). Cumulative ecological impacts of two successive annual treatments of imidacloprid and fipronil on aquatic communities of paddy mesocosms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 355–362.
- Hébert, M., Fugère, V., Beisner, B.E., Barbosa Da Costa, N., Barrett, R.D.H., Bell, G., *et al.* (2021). Widespread agrochemicals differentially affect zooplankton biomass and community structure. *Ecological Applications*, 31, e02423.
- Ho, H.-C., Brodersen, J., Gossner, M.M., Graham, C.H., Kaeser, S., Reji Chacko, M., *et al.* (2022). Blue and green food webs respond differently to elevation and land use. *Nat Commun*, 13, 6415.
- Jackson, M.C., Fourie, H.E., Dalu, T., Woodford, D.J., Wasserman, R.J., Zengeya, T.A., *et al.* (2020). Food web properties vary with climate and land use in South African streams. *Funct Ecol*, 34, 1653–1665.
- Jackson, M.C., Loewen, C.J.G., Vinebrooke, R.D. & Chimimba, C.T. (2016). Net effects of multiple stressors in freshwater ecosystems: a meta-analysis. *Glob Change Biol*, 22, 180–189.
- Jia, Y., Kennard, M.J., Liu, Y., Sui, X., Li, K., Wang, G., *et al.* (2020). Human disturbance and long-term changes in fish taxonomic, functional and phylogenetic diversity in the Yellow River, China. *Hydrobiologia*, 847, 3711–3725.
- Johnson, C.N., Balmford, A., Brook, B.W., Buettel, J.C., Galetti, M., Guangchun, L., *et al.* (2017). Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene. *Science*, 356, 270–275.
- Laliberté, E. & Tylianakis, J.M. (2010). Deforestation homogenizes tropical parasitoid–host networks. *Ecology*, 91, 1740–1747.
- Landi, P., Minoarivelo, H.O., Brännström, Å., Hui, C. & Dieckmann, U. (2018). Complexity and stability of ecological networks: a review of the theory. *Popul Ecol*, 60, 319–345.
- Leão, H., Siqueira, T., Torres, N.R. & Montag, L.F.D.A. (2020). Ecological uniqueness of fish communities from streams in modified landscapes of Eastern Amazonia. *Ecological Indicators*, 111, 106039.
- Ledger, M.E., Brown, L.E., Edwards, F.K., Milner, A.M. & Woodward, G. (2013). Drought alters the structure and functioning of complex food webs. *Nature Clim Change*, 3, 223–227.

- Loeuille, N. (2019). Eco-evolutionary dynamics in a disturbed world: implications for the maintenance of ecological networks. *F1000Res*, 8, 97.
- MacArthur, R. (1955). Fluctuations of Animal Populations and a Measure of Community Stability. *Ecology*, 36, 533.
- Magurran, A.E., Dornelas, M., Moyes, F., Gotelli, N.J. & McGill, B. (2015). Rapid biotic homogenization of marine fish assemblages. *Nat Commun*, 6, 8405.
- May, R.M. (1972). Will a Large Complex System be Stable?
- Mello, J.L., Cardoso, B.N., Colombo-Corbi, V. & Corbi, J.J. (2019). Effects of Agrochemicals on Freshwater Macroinvertebrates: Challenges and Perspectives from Southeastern Brazil. *Limnology & Oceanogr Bull*, 28, 1–4.
- Newbold, T., Bentley, L.F., Hill, S.L.L., Edgar, M.J., Horton, M., Su, G., *et al.* (2020). Global effects of land use on biodiversity differ among functional groups. *Funct Ecol*, 34, 684–693.
- O’Gorman, E.J., Petchey, O.L., Faulkner, K.J., Gallo, B., Gordon, T.A.C., Neto-Cerejeira, J., *et al.* (2019). A simple model predicts how warming simplifies wild food webs. *Nat. Clim. Chang.*, 9, 611–616.
- Olden, J.D. (2006). Biotic homogenization: a new research agenda for conservation biogeography. *J Biogeography*, 33, 2027–2039.
- Paine, R.T. (1966). Food Web Complexity and Species Diversity. *The American Naturalist*, 100, 65–75.
- Palmer, M. & Ruhi, A. (2019). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365, eaaw2087.
- Penn, H.J., Athey, K.J. & Lee, B.D. (2017). Land cover diversity increases predator aggregation and consumption of prey. *Ecol Lett*, 20, 609–618.
- Peoples, B.K., Davis, A.J.S., Midway, S.R., Olden, J.D. & Stoczynski, L. (2020). Landscape-scale drivers of fish faunal homogenization and differentiation in the eastern United States. *Hydrobiologia*, 847, 3727–3741.
- Petsch, D.K., Blowes, S.A., Melo, A.S. & Chase, J.M. (2021). A synthesis of land use impacts on stream biodiversity across metrics and scales. *Ecology*, 102.
- Pillai, P., Loreau, M. & Gonzalez, A. (2010). A patch-dynamic framework for food web metacommunities. *Theor Ecol*, 3, 223–237.
- Poisot, T., Stouffer, D.B. & Gravel, D. (2015). Beyond species: why ecological interaction networks vary through space and time. *Oikos*, 124, 243–251.
- Poisot, T., Stouffer, D.B. & Kéfi, S. (2016). Describe, understand and predict: why do we need networks in ecology? *Funct Ecol*, 30, 1878–1882.
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M.C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., *et al.* (2021). Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nat Food*, 3, 19–28.
- Price, E.L., Sertić Perić, M., Romero, G.Q. & Kratina, P. (2019). Land use alters trophic redundancy and resource flow through stream food webs. *J Anim Ecol*, 88, 677–689.

- Reid, A.J., Carlson, A.K., Creed, I.F., Eliason, E.J., Gell, P.A., Johnson, P.T.J., *et al.* (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biol Rev*, 94, 849–873.
- Rosset, V., Ruhi, A., Bogan, M.T. & Datry, T. (2017). Do lentic and lotic communities respond similarly to drying? *Ecosphere*, 8, e01809.
- Rumschlag, S.L., Mahon, M.B., Hoverman, J.T., Raffel, T.R., Carrick, H.J., Hudson, P.J., *et al.* (2020). Consistent effects of pesticides on community structure and ecosystem function in freshwater systems. *Nat Commun*, 11, 6333.
- Ryall, K.L. & Fahrig, L. (2005). Habitat loss decreases predator-prey ratios in a pine-bark beetle system. *Oikos*, 110, 265–270.
- Sabatino, M., Maceira, N. & Aizen, M.A. (2010). Direct effects of habitat area on interaction diversity in pollination webs. *Ecological Applications*, 20, 1491–1497.
- Schneck, F., Bini, L.M., Melo, A.S., Petsch, D.K., Saito, V.S., Wengrat, S., *et al.* (2022). Catchment scale deforestation increases the uniqueness of subtropical stream communities. *Oecologia*, 199, 671–683.
- Schürings, C., Feld, C.K., Kail, J. & Hering, D. (2022). Effects of agricultural land use on river biota: a meta-analysis. *Environ Sci Eur*, 34, 124.
- Siqueira, T., Bini, L.M., Thomaz, S.M. & Fontaneto, D. (2015b). Biodiversity analyses: are aquatic ecologists doing any better and differently than terrestrial ecologists? *Hydrobiologia*, 750, 5–12.
- Siqueira, T., Lacerda, C.G.-L.T. & Saito, V.S. (2015a). How Does Landscape Modification Induce Biological Homogenization in Tropical Stream Metacommunities? *Biotropica*, 47, 509–516.
- Thebault, E. & Fontaine, C. (2010). Stability of Ecological Communities and the Architecture of Mutualistic and Trophic Networks. *Science*, 329, 853–856.
- Thompson, P.L. & Gonzalez, A. (2017). Dispersal governs the reorganization of ecological networks under environmental change. *Nat Ecol Evol*, 1, 0162.
- Tylianakis, J.M. & Morris, R.J. (2017). Ecological Networks Across Environmental Gradients. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 48, 25–48.
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., *et al.* (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555–561.
- Wardle, D.A., Bardgett, R.D., Callaway, R.M. & Van der Putten, W.H. (2011). Terrestrial Ecosystem Responses to Species Gains and Losses. *Science*, 332, 1273–1277.
- Wilkinson, C.L., Yeo, D.C.J., Tan, H.H., Fikri, A.H. & Ewers, R.M. (2018). Land-use change is associated with a significant loss of freshwater fish species and functional richness in Sabah, Malaysia. *Biological Conservation*, 222, 164–171.
- Wimp, G.M., Ries, L., Lewis, D. & Murphy, S.M. (2019). Habitat edge responses of generalist predators are predicted by prey and structural resources. *Ecology*, e02662.
- Wootton, K.L. (2017). Omnivory and stability in freshwater habitats: Does theory match reality? *Freshw Biol*, 62, 821–832.

4. Considerações finais

Mudanças ambientais, principalmente causadas por intervenções humanas nos ecossistemas, influenciam diferentes aspectos da biodiversidade. Utilizando diferentes abordagens de pesquisa, esta tese dedicou-se a explorar as relações diretas e indiretas entre mudanças ambientais e redes tróficas em ecossistemas aquáticos dulcícolas. Os dois estudos aqui apresentados trazem importantes contribuições para o entendimento dos caminhos pelos quais modificações no ambiente, em especial mudanças climáticas, de uso do solo, e exposição a agrotóxicos, afetam a estrutura e a estabilidade de comunidades multitróficas.

No primeiro estudo, eu mostrei que aspectos fundamentais da estrutura de redes tróficas, como a conectância e o número de níveis tróficos foram direta e indiretamente influenciados por mudanças climáticas (temperatura e precipitação) e de uso do solo. No entanto, a forma como os preditores afetam a estrutura das redes depende de características intrínsecas dos ecossistemas. Enquanto redes tróficas em lagos não demonstraram alterações na conectância, em riachos a relação entre conectância, intensidade do uso do solo e mudanças climáticas foi positiva, sugerindo dominância de espécies generalistas onde a urbanização e a conversão em agricultura foram mais intensas. Já a estrutura vertical das redes tróficas foi negativamente relacionada com mudanças climáticas e de uso do solo em riachos, e negativamente relacionada com aumento da temperatura em riachos, indicando simplificação das redes frente a estas mudanças. Além disso, o primeiro estudo mostrou ainda que a proporção de predadores de topo na comunidade exerce um papel importante, mediando os efeitos de mudanças climáticas na estrutura das redes tróficas.

No segundo estudo, meus esforços foram direcionados a entender como efeitos indiretos da expansão agrícola, mais especificamente a exposição de ecossistemas aquáticos a agrotóxicos, influencia a estabilidade de produtores e consumidores em comunidades multitróficas. Por meio de uma abordagem experimental consistente, eu mostrei que inseticidas e fertilizantes tem o potencial de modificar a forma como a variação temporal na abundância se propaga ao longo de escalas e níveis de organização. A exposição a inseticidas foi relacionada com alta variação temporal na população de consumidores. Porém, ao nível de comunidade, a variação temporal na abundância foi reduzida devido a um efeito negativo do fipronil na sincronia populacional. Esse resultado sugere que, ainda que inseticidas imponham filtros de seleção a consumidores em ecossistemas aquáticos, outros processos podem estar atuando para manutenção da estabilidade em níveis hierárquicos superiores (e.g., dispersão). Por outro lado, modelos investigando os efeitos de fertilizantes na variação temporal de produtores e consumidores mostraram que, ao passo em que as manchas que compõem a metacomunidade são expostas a vinhaça, a sincronia espacial entre comunidades é reduzida. Esse resultado sugere que o fertilizante possa ter favorecido a produtividade primária em algumas comunidades, permitindo que estas se diferenciasssem na escala regional.

Por fim, é possível concluir que mudanças ambientais influenciam fortemente a estrutura e estabilidade de redes tróficas em ecossistemas aquáticos. Porém, as relações entre preditores ambientais e variáveis resposta são complexas e demandam uma análise detalhada dos caminhos (diretos e indiretos) pelos quais as mudanças ocorrem. Para que possamos compreender melhor como mudanças climáticas e de uso do solo influenciam a estrutura de redes tróficas, é crucial que se considere as características intrínsecas dos ecossistemas dulcícolas (e.g., lagos e

riachos), visto que as relações entre preditores e respostas mudam entre eles. Por outro lado, é necessário que aumentemos os esforços para investigar a influência de agrotóxicos nas comunidades aquáticas, visto que os efeitos de inseticidas e fertilizantes transpassam níveis de organização e escalas, afetando diferentemente produtores e consumidores.