



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGEOG

Arthur Cardoso Campos

ÁCIDOS GRAXOS COMO MOLÉCULAS *FINGERPRINTING* DE
IMPACTOS ANTRÓPICOS EM ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS

São João del-Rei

2025



Universidade Federal
de São João del-Rei

ÁCIDOS GRAXOS COMO MOLÉCULAS *FINGERPRINTING* DE IMPACTOS ANTRÓPICOS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

Arthur Cardoso Campos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental e Territorial

Linha de pesquisa: Dinâmicas das Paisagens Tropicais

Orientadora: Dra. Iola Gonçalves Boéchat

Coorientador: Dr. Björn Gucker

São João del-Rei
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ÁCIDOS GRAXOS COMO MOLÉCULAS *FINGERPRINTING* DE IMPACTOS ANTRÓPICOS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

Autor: Arthur Cardoso Campos

Orientadora: Dr^a. Iola Gonçalves Boëchat

Coorientador: Dr. Björn Gucker

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:

Documento assinado digitalmente
 IOLA GONCALVES BOECHAT
Data: 29/07/2025 16:19:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Iola Gonçalves Boëchat – Orientadora

Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Documento assinado digitalmente
 BJORN GUCKER
Data: 29/08/2025 09:50:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Björn Gucker

Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Documento assinado digitalmente
 CLEBER CUNHA FIGUEREDO
Data: 14/08/2025 09:27:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleber Cunha Figueredo

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

São João del-Rei
Julho de 2025

***Dedico este trabalho à memória da minha mãe,
cuj a presença permanece em mim como força, referência e amor.***

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio e à presença de pessoas que estiveram comigo ao longo dessa trajetória. A todas elas, registro minha sincera gratidão.

À minha orientadora, Professora Dra. Iola Gonçalves Boëchat, pela orientação criteriosa, pela confiança e pela dedicação constante durante todas as etapas deste trabalho. Seu compromisso com a formação científica foram fundamentais para que esta pesquisa alcançasse profundidade e consistência.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Björn Gücker, pelas contribuições técnicas e conceituais, pelo incentivo à reflexão crítica e pela generosidade intelectual que tanto enriqueceram este trabalho.

À Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEOG), pelo acolhimento institucional e pelo suporte acadêmico que permitiram a realização deste estudo.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Limnologia Aplicada da UFSJ (LABLIMNO) — Ana Paula, Elisa, Amanda, Bia, Lauren e André — pela parceria ao longo da graduação e da pós-graduação, pelas amizades, trocas construtivas e convívio leve e respeitoso que ajudou a tornar o processo de pesquisa mais fluido.

Ao meu irmão Alan e ao meu pai Júlio, por todo o apoio, carinho e incentivo ao longo da minha vida acadêmica. A presença de vocês é parte essencial da minha trajetória.

Aos meus amigos Mariana Deluchi, Gustavo Casalli e Thais, pela amizade constante, pela escuta generosa e por estarem presentes em diferentes fases da minha caminhada acadêmica e pessoal.

Aos amigos Allan Freitas e Amanda Giarola pela amizade leal, pela escuta atenta e por estar presente de maneira encorajadora em todos os momentos em que a caminhada exigiu mais força e persistência, tendo vivenciado um processo semelhante e compreendido, com sensibilidade, cada etapa deste percurso.

À amiga Telma, que, também por ter vivenciado um processo parecido, serviu de escuta atenta e demonstrou apoio genuíno em todos os momentos da realização deste trabalho.

Aos meus alunos da Escola Estadual Amélia Passos, por fazerem parte da minha vida profissional e pessoal. Vocês são fonte diária de motivação, e me inspiram a seguir aprendendo, assim como busco inspirar em cada aula o valor do conhecimento.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta jornada, meu muito obrigado.

RESUMO

Ácidos graxos (FA, do inglês *fatty acids*) são uma classe de moléculas bioquímicas com importantes funções estruturais e metabólicas em todos os organismos. Nas últimas décadas, a análise de ácidos graxos em estudos geoecológicos ganhou bastante atenção pela sua diversa aplicabilidade, seja como suporte taxonômico na identificação de espécies ou grupos de organismos em ecossistemas aquáticos, ou em estudos de interações tróficas em experimentos de nutrição de consumidores aquáticos. Recentemente, ácidos graxos vêm sendo crescentemente empregados em estudos de monitoramento ambiental, como ferramentas para detectar e determinar a ação antrópica sobre ecossistemas aquáticos. O objetivo geral desta dissertação foi testar a hipótese da existência de padrões gerais de resposta de ácidos graxos específicos (*fingerprintings*) a impactos antrópicos em ecossistemas de água doce, em uma escala global de análise. Em um primeiro momento, foi realizada uma análise das tendências gerais (Topic Modelling) do emprego de ácidos graxos em estudos ecológicos em sistemas aquáticos, a partir de uma modelagem temática das publicações envolvendo ácidos graxos, constantes da coleção Clarivate Analytics Web of Science. A modelagem visou identificar similaridade de tópicos entre as publicações, assim como a popularidade de tópicos (tópicos quentes, neutros e frios), de acordo com a prevalência destes ao longo dos anos. A partir desta análise verificou-se a prevalência dos tópicos “Seasonality and landuse effects”, “Environmental/temperature stress in biofilms”, “HUFAs in plankton” e “FAs in fish tissues”, classificados como tópicos quentes, sendo que os dois primeiros tiveram abordagem crescente na literatura a partir de 2015. Tópicos classificados como neutros foram “total lipids in invertebrates”, “FAs in river OM”, “FAs in freshwater and marine fish”, enquanto “Food quality for *Daphnia*”, “FA markers in sediments”, “Trophic transfer in reservoirs/fish farms” e “FA markers in sludge/wastewater” foram considerados tópicos frios. Na sequência deste trabalho foi realizada uma meta-análise para buscar padrões de resposta (aumento, redução) de moléculas específicas de ácidos graxos a impactos antrópicos (mudanças climáticas, eutrofização, uso da terra, acidificação, metais pesados, dentre outros), a fim de identificarmos potenciais *fingerprintings* bioquímicos em estudos ambientais, associados a diferentes matrizes biológicas. A meta-análise evidenciou tendências gerais de aumento ou redução de ácidos graxos face a diferentes tipos de impactos, sistemas e matrizes estudados. Este estudo realizou, pela primeira vez na literatura, uma revisão sistemática com a finalidade de identificar o potencial *fingerprinting* de ácidos graxos como indicadores de impactos ambientais em recursos hídricos, e possui grande aplicação em estudos futuros de monitoramento ambiental, apontando

moléculas mais propícias a servirem como indicadores ambientais de impactos específicos, de acordo com o sistema ou a matriz biológica investigada.

Palavras-Chave: marcadores bioquímicos; lipídios; comunidades aquáticas; uso do solo.

ÁCIDOS GRAXOS COMO MOLÉCULAS *FINGERPRINTING* DE IMPACTOS ANTRÓPICOS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

ABSTRACT

Fatty acids (FAs) are a class of biochemical molecules with essential structural and metabolic functions in all organisms. In recent decades, FA analysis in geoecological studies has gained considerable attention due to its wide range of applications, including taxonomic support for identifying species or organism groups in aquatic ecosystems, and investigations of trophic interactions in consumer nutrition experiments. More recently, fatty acids have been increasingly applied in environmental monitoring studies as tools for detecting and assessing anthropogenic impacts on aquatic ecosystems. The main objective of this dissertation was to test the hypothesis that specific fatty acids exhibit general response patterns (fingerprintings) to anthropogenic disturbances in freshwater ecosystems at a global scale. First, a topic modeling analysis was conducted to explore general trends in the use of fatty acids in ecological studies in aquatic systems, based on thematic modeling of publications indexed in the Clarivate Analytics Web of Science database. This modeling aimed to identify topic similarities among studies and to assess topic popularity (hot, neutral, or cold) based on their prevalence over time. The analysis revealed the prevalence of the topics "Seasonality and land-use effects," "Environmental/temperature stress in biofilms," "HUFAs in plankton," and "FAs in fish tissues" as hot topics, with the first two showing increasing prominence in the literature since 2015. Neutral topics included "Total lipids in invertebrates," "FAs in river OM," and "FAs in freshwater and marine fish," while cold topics included "Food quality for *Daphnia*," "FA markers in sediments," "Trophic transfer in reservoirs/fish farms," and "FA markers in sludge/wastewater." Subsequently, a meta-analysis was carried out to identify response patterns (increase or decrease) of specific FA molecules to anthropogenic stressors (such as climate change, eutrophication, land use, acidification, heavy metals, among others), with the aim of identifying potential biochemical fingerprintings associated with different biological matrices. The meta-analysis revealed consistent trends in FA increases or decreases in response to various impact types, aquatic systems, and biological matrices. This study presents, for the first time in the literature, a systematic review aimed at identifying the fingerprinting potential of fatty acids as indicators of environmental impacts on freshwater resources. The findings have broad application in future environmental monitoring studies by highlighting molecules most likely to serve as environmental indicators of specific anthropogenic impacts, depending on the system or biological matrix investigated.

Keywords: biochemical markers; lipids; aquatic communities; land use.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO NMDS.....	18
FIGURA 2 – VARIABILIDADE TEMPORAL E PREVALÊNCIA.....	19
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO GERAL DE RESPOSTA DOS ÁCIDOS G.....	29
FIGURA 4 – LRR POR ÁCIDO GRAXO.....	30
FIGURA 5 – FREQUÊNCIA DE MEDIÇÕES POR SISTEMA.....	31
FIGURA 6 – FREQUÊNCIA DE MEDIÇÕES POR MATRIZ.....	32
FIGURA 7 – FREQUÊNCIA DE MEDIÇÕES POR IMPACTO.....	33
FIGURA 8 – ÁCIDOS GRAXOS MAIS SIGNIFICATIVOS POR IMPACTO.....	34
FIGURA 9 – DEZ ÁCIDOS GRAXOS MAIS RESPONSÍVOS.....	36
FIGURA 10 – RESPOSTAS DE ÁCIDOS GRAXOS SELECIONADOS.....	37
FIGURA 11 – TOP 5 SISTEMAS COM MAIOR SIGNIFICÂNCIA.....	39
FIGURA 12 – TOP 5 MATRIZES COM MAIOR SIGNIFICÂNCIA.....	40
FIGURA 13 – LRR MAIS SIGNIFICATIVO POR SISTEMA-MATRIZ.....	41
FIGURA 14 – ÁCIDO GRAXO MAIS RESPONSIVO EM CADA SISTEMA.....	42

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
TABELA 1 – TÓPICOS EXTRAÍDOS DOS 119 ARTIGOS.....	17
TABELA 2 – SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS EXTRAÍDOS.....	24

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	01
2. MODELAGEM DE TÓPICOS.....	06
2.1 Introdução.....	06
2.2 Metodologia.....	09
2.2.1 Levantamento bibliográfico.....	09
2.2.2 Modelagem de tópicos.....	10
2.2.3 Similaridade e popularidade dos tópicos.....	11
2.3 Resultados e discussão.....	12
3. IDENTIFICAÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS MARCADORES FINGERPRINTING DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS POR MEIO DE META- ANÁLISE.....	20
3.1 Introdução.....	21
3.2 Metodologia.....	22
3.2.1 Seleção e extração de dados para meta-análise.....	22
3.2.2 Análise estatística (meta-análise).....	25
3.3 Resultados.....	28
3.4 Discussão.....	43
4. DISCUSSÃO GERAL.....	52
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
6. REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO 1.....	77
ANEXO 2.....	78
ANEXO 3.....	78

1 INTRODUÇÃO GERAL

A análise de ácidos graxos (FA, do inglês *fatty acids*) é uma metodologia que possui uma enorme variedade de aplicações dentro das ciências ambientais, tendo se mostrado, ao longo dos anos, uma importante ferramenta para estudos ecológicos envolvendo ecossistemas aquáticos.

Para responder questões que permitissem entender melhor o ciclo do carbono no ambiente marinho (mar aberto e estuário), bem como suas complexas interações constituídas com outros ambientes (atmosfera e continente), estratégias de pesquisas baseadas na análise de marcadores moleculares, incluindo os FA, começaram a ser exploradas em estudos ecológicos. FA, que são os principais constituintes de lipídios nos organismos marinhos (IVERSON et al., 2004), são predominantes em sedimentos e partículas suspensas (SALIOT et al. 1991, NAPOLITANO, 1999). Na mesma medida, a análise de FA revelou-se uma importante ferramenta para elucidar padrões presentes em diferentes cadeias tróficas (comunidades terrestres, de água doce e marinhas), possibilitando não somente uma descrição quantitativa destes padrões, demonstrando as semelhanças e diferenças entre as comunidades, mas também fornecendo subsídio para uma análise dos seus efeitos, tanto na comunidade quanto no nível dos organismos (PIM; LAWTON; COHEN, 1991).

Apesar da existência de diferentes ferramentas para estudo das interações tróficas em ambientes aquáticos, como por exemplo a análise de isótopos estáveis (PERGA et al., 2006; GAO, 2006;), os estudos que envolvem este tipo de ambiente por vezes fazem uso da análise de lipídios (dentre eles, os FA), devido à importância destas moléculas em processos metabólicos essenciais, como crescimento e reprodução (JU et al., 1997, MAHBOOB et al., 2019). Além disso, tendo em vista que lipídios tendem a ser metabolicamente estáveis ou retem uma estrutura básica após serem consumidos (NAPOLITANO, 1999; BURNS, BRETT E SCHALLENBERG, 2011), estas moléculas podem ser utilizadas para (1) mapear a transferência de energia entre os níveis tróficos e definir relações de predação, elucidando, inclusive, os fatores que controlam a eficiência

deste processo (BRETT E MÜLLER-NAVARRA, 1997), e (2) identificar, de maneira precisa, a dieta de predadores (IVERSON et al., 2004).

Muitos estudos envolvendo os FA foram produzidos com enfoque na produtividade primária, considerando os organismos produtores como principal objeto de estudo (PERSSON et al., 2007) e buscando elucidar aspectos como o impacto do aumento da temperatura sobre a comunidade planctônica de água doce (MAAZOUZI et al., 2008) ou sobre a qualidade do fitoplâncton como alimento para *Daphnia*, um importante consumidor responsável por grande parte da transferência de energia para os consumidores de níveis superiores (PERSSON et al., 2007). Outros estudos que envolvem os FA são voltados para os consumidores que ocupam níveis tróficos superiores, como peixes, permitindo responder questões relacionadas à origem da energia para esses consumidores — se ela provém da produção de ambientes terrestres adjacentes, de fontes externas ao sistema, ou da produção autóctone, como bactérias e algas presentes no próprio ambiente (NAPOLITANO, 1999). Por outro lado, alguns estudos avaliaram a forma pela qual a energia é armazenada nos consumidores, se acontece de maneira conservativa, quando são incorporados diretamente ao tecido dos consumidores sem serem modificados, ou de maneira não conservativa, quando são transformados em outras moléculas ao serem consumidos (BURNS, BRETT E SCHALLENBERG, 2011). Outra aplicação deste tipo de análise se dá em estudos que verificam como o ciclo de vida e alimentação dos peixes são alterados pela sazonalidade de estações secas e úmidas. (MÁRQUEZ-FERNÁNDEZ, 2020). Ademais, FA representam uma das mais importantes fontes de energia para as funções fisiológicas neste grupo de organismos, principalmente os FA altamente insaturados (HUFAs, do inglês *highly unsaturated FA*) (TOCHER, 2003). FA também são utilizados para responder questões relacionadas aos efeitos da prática de piscicultura. Este tipo de atividade é responsável pela deposição de uma grande quantidade de matéria orgânica, oriunda dos restos de ração não consumida ou excremento dos indivíduos que são criados nos tanques, nos corpos d'água, o que por sua vez, acaba atraindo uma grande quantidade de peixes e macroinvertebrados para se alimentar deste subproduto (GONZALEZ-SILVERA, 2020), causando mudanças na dinâmica trófica, especificamente na entrada de energia dos sistemas. Outro impacto

causado pela piscicultura se dá em relação aos organismos decompositores, onde observa-se a presença de bactérias, que através da decomposição de matéria orgânica não ingerida ou não assimilada, formam os FA bacterianos (BFAs) (BOËCHAT et al., 2021). Tais impactos devem cada vez mais se intensificar, considerando-se o cenário de acelerado crescimento populacional nas últimas décadas, o que coloca a piscicultura em posição de importante forma de obtenção de proteína animal de boa qualidade (MAHBOOB et al., 2019) para a nutrição humana (TOCHER, 2003).

Ao desmatar áreas naturais, praticar agricultura, intensificar a produção em terras agrícolas ou expandir centros urbanos, as ações humanas transformam paisagens naturais de diversas formas (FOLEY et al., 2005; MEKONNEN E HOEKSTRA, 2015), causando um aumento considerável no incremento de nutrientes em ecossistemas aquáticos e resultando em aumento da produtividade nos ecossistemas. A consequência disso se dá principalmente na diminuição da eficiência com a qual a energia e a biomassa são transferidas através da rede trófica e sustentam a produção de níveis tróficos superiores (MÜLLER-NAVARRA et al., 2004). Nesse contexto, a análise de impactos antrópicos sobre a síntese e transferência de FA essenciais assume papel igualmente importante em estudos dos efeitos dessas alterações em ecossistemas impactados e paisagens modificadas sobre o bem-estar e saúde das comunidades adjacentes, inclusive humana.

Com base nesses estudos, os FA podem ser considerados uma ferramenta polivalente, funcional tanto para realizar estudos sobre interações nas redes tróficas, quanto para estudos que envolvam os ciclos biogeoquímicos em ecossistemas aquáticos (NAPOLITANO, 1999), o que torna estas moléculas capazes de demonstrar alterações causadas nos ecossistemas aquáticos, inclusive de origem antrópica. No entanto, na literatura disponível, não há consenso sobre a existência de respostas-padrão de moléculas específicas de FA a diferentes tipos de impactos. Alguns estudos apontam, por exemplo, para a redução nas concentrações de ácidos graxos poliinsaturados - PUFA (do inglês *polyunsaturated FA*) de cadeia longa, como EPA (*Eicosapentaenoic acid*) e DHA (*Docosahexaenoic acid*) em ambientes submetidos a estresse térmico ou poluição por nutrientes, enquanto outros relatam alterações em FA bacterianos sob influência de matéria orgânica ou contaminantes. Isso significa que, embora seja possível encontrar

algumas tendências, ainda não está claro, dentro da literatura, a existência de padrões de associação de FA específicos a impactos antrópicos específicos de uma maneira clara e direta, independentemente do tipo de sistema ou da comunidade analisada.

A partir de um estudo que avaliou os FA encontrados no biofilme de riachos do Cerrado brasileiro, constatou-se maiores concentrações de PUFAs e HUFAs essenciais em amostras de biofilme provenientes de riachos inseridos em paisagens agrícolas, quando comparados com riachos naturais (BOËCHAT et al., 2011). Essa constatação levanta a seguinte questão: o aumento desses grupos de FA estaria associado somente a paisagens impactadas pela agricultura em riachos e em ambientes de Cerrado. Para responder a essa questão e outras de mesma natureza, torna-se essencial a realização de uma análise mais criteriosa, a fim de identificar moléculas que possam funcionar como marcadores *fingerprinting* de impactos específicos, independentemente do sistema e da comunidade analisada.

Neste projeto, testou-se a hipótese da existência de um padrão geral de resposta de FA específicos a impactos antrópicos de diversas naturezas em diferentes comunidades aquáticas (biofilme, peixes, fito- e zooplâncton, etc), em uma escala global de análise, envolvendo diferentes ecossistemas aquáticos, tanto de água doce quanto marinhos. Os resultados obtidos indicaram que há, de fato, certo grau de padronização nas respostas de determinados ácidos graxos frente a tipos específicos de impacto antrópico, sugerindo a possibilidade de seu uso como *fingerprintings* em contextos distintos de ecossistemas aquáticos.

Assim, esta dissertação investigou o potencial dos FA como marcadores de impactos ambientais em ecossistemas de água doce, avaliando a possibilidade de padrões consistentes de resposta dessas moléculas a diferentes tipos de impactos antrópicos. Em razão disso, o trabalho está estruturado em dois capítulos complementares. O primeiro capítulo aplica uma abordagem de modelagem de tópicos sobre a literatura científica para identificar tendências, lacunas e temas emergentes no uso dos FA em estudos ambientais. O segundo capítulo consiste em uma meta-análise quantitativa, que sintetiza evidências empíricas sobre a resposta dos FA a distintos tipos de impacto em diferentes organismos

e ecossistemas. Essa abordagem integrada visa contribuir para o avanço do uso de FA como ferramenta de monitoramento e diagnóstico ecológico.

Essas abordagens foram escolhidas por sua complementaridade: enquanto a modelagem de tópicos permite organizar e interpretar grandes volumes de literatura científica de forma automatizada — com base em artigos publicados entre 1984 e 2022 —, a meta-análise realiza uma síntese quantitativa das evidências empíricas disponíveis, considerando estudos publicados entre 2006 e 2022. Essa combinação possibilita o teste de hipóteses sobre padrões de resposta dos FA em diferentes contextos ecológicos. Ao integrar essas duas estratégias, esta dissertação apresenta uma das primeiras análises sistemáticas voltadas à identificação de padrões lipídicos associados a impactos ambientais em múltiplas comunidades aquáticas, contribuindo para consolidar o uso dos FA como ferramenta de biomonitoramento em escala global.

A meta-análise representa uma ferramenta essencial para a síntese quantitativa de resultados científicos, pois permite integrar evidências dispersas em diferentes estudos e identificar padrões gerais que dificilmente seriam percebidos de forma isolada. Essa abordagem aumenta o poder estatístico das análises, reduz a incerteza associada a experimentos individuais e possibilita avaliar a consistência dos efeitos observados em distintos contextos experimentais e ambientais. No caso dos ácidos graxos, a aplicação da meta-análise é particularmente relevante porque os estudos disponíveis apresentam grande variação em termos de organismos, sistemas aquáticos e tipos de impacto, o que torna necessária uma avaliação abrangente capaz de revelar tendências robustas e fornecer subsídios sólidos para o biomonitoramento e o manejo de ecossistemas.

2 MODELAGEM DE TÓPICOS (Artigo “Topic modeling of fatty acid studies: Evaluating environmental changes in freshwater ecosystems”, submetido ao periódico *International Review of Hydrobiology*)

2.1 Introdução

Compreender como um tema científico evoluiu ao longo do tempo na pesquisa ecológica, assim como como ele é atualmente abordado, ajuda a identificar suas tendências e desafios, além de permitir um melhor planejamento de pesquisas futuras. Isso é especialmente válido ao considerar estudos que utilizam ferramentas específicas para diferentes finalidades, como compostos bioquímicos e outras moléculas utilizadas como indicadores de composição de espécies, crescimento populacional, transferência de matéria e energia em teias tróficas, impactos ambientais e conectividade ecossistêmica. Lipídios são um bom exemplo desse tipo de molécula, já que diferentes classes lipídicas vêm sendo empregadas em estudos ecológicos há muitas décadas, com distintos objetivos e aplicações (ARTS et al., 2009). Entre os lipídios, os ácidos graxos (FAs) desempenham funções fisiológicas cruciais em todos os organismos vivos, como a regulação da fluidez das membranas, síntese de hormônios, metabolismo energético, funcionamento cerebral, processos inflamatórios e reprodução (CALDER, 2018; BERG et al., 2019). Nas ciências aquáticas, os FAs têm sido tradicionalmente analisados no contexto da composição de espécies e de interações tróficas (AHLGREN et al., 1996, 2009; VOLKMAN et al., 1998; MÜLLER-NAVARRA et al., 2004; ARTS et al., 2009; GALLOWAY & BUDGE, 2020), bem como como marcadores de contaminação por efluentes e sedimentos (QUEMÉNEUR & MARTY, 1994; JARDÉ et al., 2015).

Do final da década de 1980 até os anos 2000, parece que os FAs e outras classes lipídicas, bem como proteínas, carboidratos e vitaminas, foram amplamente analisados em experimentos sobre nutrição de zooplâncton (BECKER & BOERSMA, 2003; DEMOTT & MÜLLER-NAVARRA, 2007; PERSSON et al., 2007). Esses estudos geraram uma quantidade substancial de literatura, majoritariamente voltada à avaliação do efeito de diferentes dietas fitoplancônicas sobre o crescimento e a reprodução do zooplâncton, o que, por sua vez, motivou pesquisas abrangentes sobre a composição lipídica de algas e cianobactérias. A partir do conjunto de estudos laboratoriais e de campo

conectando os FAs do fitoplâncton à qualidade alimentar do zooplâncton, alguns ácidos graxos altamente insaturados (HUFAs), como o ácido eicosapentaenoico (EPA) e o ácido docosahexaenoico (DHA), rapidamente chamaram a atenção, pois sua presença e concentração na dieta eram frequentemente associadas a melhores taxas de crescimento e reprodução em espécies de zooplâncton (BRETT et al., 2009). Esses efeitos de limitação nutricional dos HUFAs já eram conhecidos para espécies de peixes (AHLGREN et al., 1996), mas, à época, a ecologia trófica do plâncton ainda começava a utilizar compostos bioquímicos específicos como indicadores do crescimento e reprodução de consumidores. Assim, estudos sobre os efeitos dos HUFAs na fisiologia, crescimento e reprodução de consumidores aquáticos dominaram o interesse de limnólogos tróficos por vários anos, e artigos sobre o tema continuam a ser publicados até hoje (PILECKY et al., 2021).

Como os FAs são suscetíveis às condições ambientais, como temperatura (SUSHCHIK et al., 2018) e luz (MALTSEV et al., 2021), bem como à via de obtenção de energia e carbono adotada pelo organismo (autotrofia, heterotrofia ou mixotrofia; BOËCHAT et al., 2007), estudos sobre a qualidade alimentar de fitoplâncton cultivado sob diferentes condições começaram a emergir como uma abordagem interessante para conectar estresses ambientais à eficiência da transferência de energia e matéria entre níveis tróficos (MÜLLER-NAVARRA et al., 2000; KAINZ et al., 2004; IVERSSON, 2009). A partir desses estudos, surgiu uma nova direção de pesquisa focada no papel dos FAs e de outras moléculas bioquímicas como indicadores de mudanças nas condições ambientais. Inicialmente restrito a organismos planctônicos, o interesse logo se estendeu a outras comunidades e compartimentos aquáticos, bem como à compreensão dos fluxos de energia entre ecossistemas aquáticos e terrestres (TORREZ-RUIZ et al., 2007, 2010; BORISOVA et al., 2016).

Assim, do ponto de vista ecológico, a importância fisiológica dos FAs, combinada ao fato de que muitos organismos não conseguem sintetizar HUFAs de cadeia longa de forma endógena, fez com que a identificação e quantificação desses compostos se tornasse uma ferramenta valiosa para compreender limitações dietéticas de espécies consumidoras em ambientes naturais e controlados (MÜLLER-NAVARRA, 2008). Além disso, como restrições dietéticas podem levar a falhas nas interações tróficas, os FAs também podem servir como pistas para a eficiência de processos ecológicos chave, como

a transferência de energia ao longo das teias alimentares (MARTIN-CREUZBURG et al., 2017), bem como para adaptação e diversificação de consumidores (TWINING et al., 2021). Junto ao papel das condições ambientais na transferência de FAs entre níveis tróficos, bem como no metabolismo e na evolução desses compostos em espécies aquáticas, estudos sobre alterações antrópicas em ecossistemas aquáticos passaram a utilizar FAs e outras moléculas bioquímicas em diferentes comunidades e compartimentos como indicadores de impactos ambientais (BOËCHAT et al., 2014, 2021; HUSSAIN et al., 2019).

A ampla gama de aplicações da análise de FAs na pesquisa ecológica aquática levanta questões-chave sobre sua relação com os estudos de alterações e estresses ambientais. Especificamente: quais comunidades, sistemas aquáticos e compartimentos ecossistêmicos foram estudados? Que tipos de impacto foram considerados? Como o uso de FAs em estudos de mudanças ambientais evoluiu ao longo do tempo? Ao identificar quais tópicos perderam popularidade, quais mantiveram o interesse dos ecólogos aquáticos e quais estão emergindo como áreas de crescente relevância, é possível avançar na identificação de moléculas ou métricas específicas de FAs para a caracterização (“*fingerprinting*”) de estressores ambientais.

Para responder a essas questões, conduzimos uma análise de modelagem de tópicos com base em uma revisão sistemática da literatura, acompanhando tendências temporais em pesquisas com FAs relacionadas a alterações ambientais em ecossistemas de água doce. Nosso objetivo foi identificar os principais tópicos de pesquisa nos quase 40 anos de estudos com FAs e destacar os "tópicos quentes" da literatura atual (MURAKAMI et al., 2017). Buscamos compreender como os FAs vêm sendo aplicados à pesquisa ecológica, com foco nas tendências associadas a moléculas ou métricas específicas, grupos taxonômicos, sistemas de água doce, compartimentos ecossistêmicos e estressores ambientais.

A modelagem de tópicos, uma subárea das técnicas de processamento de linguagem natural (PLN), tem se consolidado como uma ferramenta poderosa na pesquisa científica para revelar estruturas ocultas em grandes volumes de dados textuais. Ao identificar e categorizar temas prevalentes, a modelagem de tópicos facilita uma compreensão mais profunda dos padrões e relações subjacentes em conjuntos de dados

textuais (MURAKAMI et al., 2017). Essa capacidade é particularmente valiosa na ciência, onde o volume de literatura publicada pode ser avassalador. A habilidade da modelagem de tópicos em revelar padrões e tendências ocultas em grandes corpora textuais pode ser instrumental na identificação de áreas emergentes de pesquisa, na compreensão da evolução do discurso científico e no mapeamento do panorama de um campo específico. Por exemplo, ao aplicar modelagem de tópicos a uma coleção de artigos científicos, pesquisadores podem acompanhar o desenvolvimento de tópicos ao longo do tempo, evidenciando mudanças no foco da ciência e áreas emergentes de interesse (LUIZ et al., 2019). Ao agrupar documentos relacionados e identificar temas-chave, os pesquisadores podem localizar estudos relevantes, entender o escopo da pesquisa existente e identificar lacunas que merecem investigação futura.

2.2 Metodologia

2.2.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento seguiu os princípios descritos por GRAMES et al. (2019) e pelas diretrizes PRISMA para construir buscas bibliográficas mais eficazes em bases científicas internacionais (PAGE et al., 2021). Eficácia, aqui, foi definida como a capacidade de uma busca recuperar o maior número possível de artigos relacionados ao tema pesquisado, ao mesmo tempo excluindo artigos de outras áreas (por exemplo, estudos médicos, que frequentemente mencionam FAs). O primeiro passo consistiu em uma busca “ingênua” na plataforma *Web of Science* (Clarivate Analytics), devido à sua ampla cobertura de periódicos científicos indexados de alto prestígio. O acesso à base foi viabilizado pela plataforma CAFE (Comunidade Acadêmica Federada), promovida pela RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa) da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Os termos utilizados na busca incluíram: *fatty acids, impact, land use, urbanization, eutrophication, human, sewage, agriculture, anthropogenic impact, environmental change, biofilm, seston e plankton*, entre outros considerados relevantes para estudos ecológicos com FAs como moléculas de *fingerprinting* de alterações ambientais.

A extração dos dados bibliográficos foi feita em formato RIS (*Research Information System*), amplamente utilizado para gerenciamento de referências em

trabalhos científicos. Com os dados extraídos, utilizou-se o pacote *litsearchr* no R (GRAMES et al., 2019), que transforma todas as palavras dos dados em uma rede de coocorrência, baseada na frequência e relação entre termos, permitindo identificar os melhores termos para uma busca refinada. Após a seleção dos termos pelo *litsearchr*, uma segunda busca foi realizada na Web of Science, restringindo-se aos campos *título*, *palavras-chave* e *resumo*, com os termos: *impact*, *land use*, *urbanization*, *eutrophication*, *sewage*, *agriculture*, *anthropogenic impact*, *biofilm*, *seston* e *plankton*. Todos esses termos foram inseridos em uma cadeia de busca entre parênteses, com conectores “or”, combinados ao termo “*fatty acid*” fora dos parênteses (ALIYU, 2017). Esse formato permitiu recuperar artigos que relacionavam os termos ao tema central dos FAs.

A busca resultou em um total de 786 artigos, os quais passaram por um processo de triagem manual baseado na leitura de título e resumo, com o objetivo de identificar registros duplicados e verificar se abordavam, ainda que parcialmente, os temas centrais da pesquisa: estudos ecológicos *in situ* com sistemas de água doce associados a alterações ambientais. Foram excluídos 586 artigos de áreas não relacionadas à Ecologia, como Medicina, Veterinária, Bioquímica ou Nutrição Humana, além de 48 estudos metodológicos ou *in vitro*, 28 artigos que não consideravam mudanças ambientais e 2 estudos focados exclusivamente em sistemas marinhos. (Anexo S1) Ao final desse processo de triagem, chegou-se a uma lista com 119 artigos publicados entre 1984 e setembro de 2022, os quais formaram a base de dados utilizada nas análises posteriores (Anexo S2).

2.2.2 Modelagem de tópicos

A modelagem de tópicos é um método utilizado para descrever o conteúdo de um conjunto de textos. A técnica identifica uma lista de palavras com alta probabilidade de coocorrência e gera “tópicos” formados por conjuntos específicos de palavras que aparecem frequentemente juntas. No presente estudo, a análise de modelagem de tópicos foi aplicada para classificar, sob a forma de tópicos, os temas abordados nos 119 artigos resultantes da busca bibliográfica anterior. Para isso, aplicamos a técnica de alocação de Dirichlet latente (LDA) para a construção dos tópicos (LUIZ et al., 2019). A LDA é uma técnica que identifica conjuntos de palavras que aparecem juntas no mesmo contexto

linguístico com frequência superior ao que seria esperado ao acaso. Ela define agrupamentos de palavras coocorrentes com significados semelhantes e relacionadas a um mesmo assunto, permitindo assim a definição de diferentes tópicos (LUIZ et al., 2019). A aplicação da LDA se justifica pela multiplicidade de temas que podem estar presentes em um artigo. Embora os artigos geralmente apresentem um tema central ou tópico dominante, outros assuntos costumam ser abordados em menor proporção. Com o uso da LDA, todos os tópicos presentes em um artigo, mesmo aqueles menos representativos que o tema central, são identificados e considerados.

A modelagem LDA foi realizada utilizando os pacotes "ldatuning" (NIKITA & CHANEY, 2020) e "topicmodels" (GRUN & HORNIK, 2011) na linguagem R, sendo a análise precedida por etapas de pré-processamento voltadas à padronização das informações presentes nos campos “autor”, “título”, “ano”, “periódico” e “resumo”. Inicialmente, foram removidos termos relacionados a direitos autorais e outras informações irrelevantes (por exemplo, *stopwords*, números, pontuação e palavras com menos de três letras). Além disso, palavras mais genéricas (como *tratamento*, *quantidade*, *introdução*, *análise*), que apareciam com frequência no conjunto de dados mas não estavam diretamente relacionadas a nenhum tópico específico, tampouco apresentavam ideias relevantes, também foram removidas. Em seguida, foi realizada a tokenização, transformando frases e sentenças em termos individuais em formato de *n-grams*, *2-grams* e *3-grams*, a fim de aprimorar a forma como o modelo LDA agrupa os dados. Embora a LDA seja capaz de identificar os tópicos, ela não os nomeia automaticamente. Por isso, foi necessário analisar manualmente o conjunto de palavras mais frequentes em cada tópico para determinar a área de pesquisa e o tema ao qual o tópico estava relacionado.

2.2.3 Similaridade e popularidade dos tópicos.

Uma vez que os agrupamentos de tópicos foram gerados pela LDA e nomeados manualmente, foi realizada uma análise de ordenação multivariada para identificar a similaridade (grau de semelhança entre eles) e a dissimilaridade (grau de diferença). Essa análise resultou na construção de um gráfico de escalonamento multidimensional não métrico (nMDS) (LUIZ et al., 2019), no qual o tamanho dos círculos corresponde ao número de artigos em que determinado tópico é dominante, enquanto a distância entre os

círculos representa o grau de similaridade ou dissimilaridade entre os tópicos. Assim, quanto mais próximos os círculos, mais semelhantes são os termos associados àqueles tópicos; quanto mais distantes, menos termos semelhantes foram encontrados entre eles.

A análise da popularidade dos tópicos foi realizada por meio da criação de uma distribuição espacial do número de artigos por tópico ao longo de um gradiente temporal, com início no ano da publicação mais antiga. Para avaliar a popularidade dos tópicos, foram utilizadas as proporções médias anuais de cada tópico, a fim de inferir tendências de prevalência ao longo do tempo (LUIZ et al., 2019). Se as mudanças entre dois anos consecutivos resultassem em uma média positiva de prevalência ao longo do tempo ($> 0,1$), o tópico era classificado como quente (popularidade crescente). Por outro lado, uma média negativa ($< -0,1$) indicava um tópico frio (popularidade decrescente) (GRIFFITHS & STEYVERS, 2004; MCCALLEN et al., 2019). Outros pacotes do R utilizados para padronização e processamento dos dados, bem como para a geração dos gráficos apresentados na análise, incluíram: "readxl" (WICKHAM & BRYAN, 2019), "dplyr" (WICKHAM et al., 2018), "tidytext" (SILGE & ROBINSON, 2016), "SnowballC" (BOUCHET-VALAT, 2020), "tm" (FEINERER et al., 2008), "Rmpfr" (MAECHLER, 2023) e "openxlsx" (WALKER & BRAGLIA, 2018).

2.3 Resultados e Discussão

Em nosso estudo, a modelagem de tópicos resultou em um total de 12 tópicos, que descreveram os temas abordados no conjunto de dados (Tabela 1) e representaram diversas aplicações da análise de FAs em estudos sobre mudanças ambientais ao longo do tempo. Esses tópicos incluíram questões relacionadas à transferência de energia na cadeia alimentar, qualidade nutricional de espécies planctônicas, caracterização bioquímica de sedimentos ou matéria orgânica em suspensão, lipídios em tecidos de peixes e marcadores de FAs encontrados em esgoto, entre outros.

Os tópicos dominantes, ou seja, aqueles cujos termos apareceram com mais frequência no conjunto de dados, incluíram: “Lipídios totais em invertebrados”, “Qualidade alimentar para *Daphnia*”, “HUFAs em plâncton”, “Marcadores de FAs em sedimentos” e “Marcadores de FAs em peixes de água doce e marinhos” (Tabela 1). Esses tópicos, em conjunto, abarcaram a maior parte da literatura produzida sobre FAs durante

as décadas de 1980 e 1990. Por exemplo, em 1997, um volume inteiro do periódico *Freshwater Biology* foi dedicado ao papel da qualidade alimentar na nutrição do zooplâncton, e muitos artigos desse volume abordaram o papel dos FAs e de outras classes lipídicas, bem como a limitação mineral no crescimento e reprodução de zooplâncton (DEMOTT et al., 1997, e referências ali contidas). Além disso, muitos trabalhos sobre fisiologia e nutrição de peixes foram publicados nesse período em função da expansão da aquicultura continental, impulsionada pela redução dos estoques pesqueiros oceânicos causada pela sobrepesca (BOYD et al., 2022). Em contrapartida, o tópico menos dominante foi “FAs em matéria orgânica de rios” (Tabela 1), cuja baixa predominância pode ser explicada por seu elevado grau de especificidade, considerando apenas um único compartimento (matéria orgânica) e um tipo de ecossistema (rios).

Além disso, com exceção dos tópicos 1 (“Lipídios totais em invertebrados”) e 10 (“Sazonalidade e efeitos do uso da terra”), todos os demais apresentaram certo grau de dissimilaridade (Figura 1). A similaridade entre os tópicos 1 e 10 pode refletir uma tendência de uso dos FAs em invertebrados, em detrimento de outras comunidades biológicas, como ferramenta para acessar variações sazonais e alterações estruturais e fisiológicas causadas pelo uso da terra. De fato, impactos relacionados ao uso da terra costumam ser investigados em rios e córregos que atravessam paisagens com diferentes características de cobertura e gradientes de uso. Como comunidade relevante em ambientes lóticos — frequentemente usada no biomonitoramento desses sistemas e também importante como fonte de biomassa e alimento —, os macroinvertebrados bentônicos têm se mostrado um modelo adequado para análise de FAs em tais estudos. Os tópicos 2 (“Qualidade alimentar para *Daphnia*”), 4 (“HUFAs em plâncton”) e 5 (“FAs em tecidos de peixes”) também apresentaram certa similaridade (Figura 1), o que era esperado, visto que o uso de FAs como indicadores de qualidade alimentar em estudos limnológicos frequentemente se concentra em HUFAs específicas, reconhecidas por seu papel limitante na nutrição de animais, incluindo zooplâncton (MÜLLER-NAVARRA et al., 2000; BRETT et al., 2009) e peixes (EBM et al., 2021). Como os HUFAs desempenham funções fisiológicas semelhantes em predadores aquáticos, é esperado que haja semelhanças nas abordagens metodológicas e na discussão dos resultados. Por outro lado, o tópico 9 (“Estresse ambiental/temperatura em biofilmes”) foi consideravelmente

diferente dos demais, representando também um dos tópicos quentes (ver discussão abaixo). Esse tópico se destacou por introduzir uma nova perspectiva sobre as aplicações dos FAs em estudos ecológicos, ao explorar como FAs individuais e métricas derivadas podem ser utilizadas para compreender alterações climáticas em ecossistemas aquáticos.

A análise dos padrões temporais de publicação revelou um gradiente de prevalência entre os tópicos, permitindo classificá-los como frios (com decréscimo de publicações), neutros (sem tendência clara) ou quentes (com crescimento), bem como determinar a taxa de variação dessa prevalência (Figuras 2a e 2b). Em outras palavras, a prevalência de cada tópico foi avaliada com base no número de publicações por ano.

Os tópicos frios (“Transferência trófica em reservatórios/aquicultura” e “Marcadores de FAs em lodo/esgoto”) apresentaram quatro picos distintos de prevalência ao longo dos anos, com o pico mais expressivo entre 1999 e 2001, seguido por uma baixa frequência até 2004, quando dois novos picos ocorreram até 2007 (Figura 2b). Esses picos foram relativamente intensos e definidos, com duração média de três anos (exceto o primeiro, que durou cinco anos). Além disso, a sobreposição entre os erros padrão e o valor zero na prevalência dos tópicos (Figura 2a) indica que, mesmo classificados como frios, esses tópicos ainda apresentaram frequência regular de publicação.

Esses dois tópicos apresentaram as maiores taxas negativas de variação na prevalência ao longo dos anos e, portanto, podem ser considerados temas que deixaram de atrair tanto interesse científico. Isso pode estar relacionado ao uso já amplamente consolidado dos FAs para estudar transferência trófica e nutrição de consumidores nos anos 1990, que, posteriormente, foi complementado por outras técnicas, como o uso de isótopos estáveis, que ganharam popularidade nos anos 2000 como método eficiente para rastrear assimilação e preferências alimentares em teias tróficas aquáticas (TWINING et al., 2020). A existência de picos acentuados no passado também pode indicar uma certa saturação temática, ou, ao menos, que lacunas de pesquisa foram parcialmente preenchidas. No entanto, as taxas de publicação relativamente estáveis (entre 5 e 14 artigos por ano) e os limites de confiança da prevalência sobrepondo-se a zero sugerem que esses temas ainda são áreas ativas de pesquisa.

FAs também foram empregados como marcadores de esgoto e lodo, especialmente em períodos e regiões com tratamento de esgoto precário ou inexistente.

Contudo, melhorias significativas ocorreram em diversos países desenvolvidos após a implementação de diretrizes rigorosas, como a EU Urban Waste Water Treatment Directive de 1991 (BOURAOUI & GRIZZETTI, 2011) e as diversas emendas ao Clean Water Act nos Estados Unidos (WALSH & WARD, 2022). Embora ainda haja desafios em muitos países em desenvolvimento, essas melhorias foram notáveis a partir do final dos anos 2000. Além disso, os marcadores de FAs associados ao esgoto geralmente estão relacionados à contaminação doméstica. Uma vez caracterizados os perfis de FAs em efluentes (QUÉMÉNEUR & MARTY, 1994), o número de publicações sobre o tema pode ter diminuído, exceto em estudos voltados para a eficiência de tratamento de esgoto, especialmente quanto à remoção de FAs voláteis (ZEWDE et al., 2023). Ainda, a contaminação por esgoto costuma ser detectada de forma mais barata e prática por meio de indicadores microbianos, como bactérias termotolerantes, o que pode ter um custo de detecção menor que FAs.

Os tópicos neutros (“Marcadores de FAs em sedimentos”, “Qualidade alimentar para *Daphnia*”, “FAs em perifiton”, “FAs em peixes de água doce e marinhos”, “FAs em matéria orgânica de rios” e “Lipídios totais em invertebrados”) corresponderam à metade dos tópicos identificados e apresentaram padrões temporais semelhantes (Figura 2b). Entre eles, “Lipídios totais em invertebrados” apresentou o pico mais expressivo (2001–2006), com redução na prevalência após 2011. Os demais apresentaram padrões alternantes, o que pode ser explicado pelo fato de que tópicos neutros costumam ser amplamente investigados, mas muitas vezes como temas secundários, sem despertar atenção crescente por demandas específicas de pesquisa.

Em contraste, os tópicos quentes (“FAs em tecidos de peixes”, “HUFAs em plâncton”, “Estresse ambiental/temperatura em biofilmes” e “Sazonalidade e efeitos do uso da terra”) apresentaram prevalência relativamente constante, mas com aumento expressivo a partir de 2018 (Figura 2b). Em geral, esses tópicos estiveram associados ao uso de FAs para o monitoramento de impactos ambientais, sejam eles climáticos ou relacionados ao uso do solo, especialmente quando vinculados a alterações em comunidades biológicas (primeiro plâncton e peixes, depois biofilmes) e ao estado fisiológico dos organismos, em diferentes tipos de ambientes e compartimentos aquáticos. Por exemplo, um estudo no Brasil investigou alterações no perfil de FAs de diferentes

espécies de peixes em reservatórios com distintos níveis de eutrofização (GOMES et al., 2021). Já um estudo no sudeste de Ohio (EUA) propôs uma ferramenta de monitoramento baseada em lipídios de biofilme, associando biomarcadores de FAs à classificação de qualidade de riachos segundo a temperatura da água (DEFOREST et al., 2016). Os autores demonstraram que a análise de FAs em biofilmes forneceu uma abordagem sensível, precisa e de baixo custo para detecção de alterações térmicas em ecossistemas aquáticos.

Nos últimos anos, a ciência da água doce tem adotado uma abordagem mais holística e integrada para compreender alterações ambientais em um mundo sujeito a múltiplos estressores, incluindo grandes transformações climáticas (HIRAVE et al., 2023) e mudanças no uso da terra (BOËCHAT et al., 2021; MACFADDEN et al., 2023). Espera-se que os estudos com FAs também evoluam nesse sentido, dada a crescente demanda por indicadores-chave específicos para cada tipo de impacto. Além disso, moléculas capazes de transitar entre compartimentos e ecossistemas são candidatas promissoras para investigar conexões ecológicas em larga escala, ajudando a entender como alterações em um ecossistema afetam outros na paisagem (O'MARA et al., 2022).

A extração de 12 tópicos pela modelagem indicou que os FAs são marcadores promissores para avaliar alterações ambientais em ecossistemas aquáticos de água doce, aplicáveis a diferentes comunidades, compartimentos, sistemas e tipos de impacto. Estudos futuros devem buscar estabelecer padrões de fingerprinting com FAs voltados a impactos específicos, considerando a perspectiva de múltiplos estressores. O desenvolvimento de modelos que combinem moléculas-alvo de FAs com outros biomarcadores químicos, como isótopos estáveis (TWINING et al., 2020) e aminoácidos (THORP & BOWES, 2017), poderá incorporar uma perspectiva mais bioquímica e fisiológica às avaliações de impacto, contribuindo para a compreensão de possíveis interações sinérgicas entre diferentes estressores ambientais, como mudanças climáticas e impactos antrópicos em ecossistemas aquáticos. Pesquisas futuras também devem explorar o potencial dos FAs em investigações voltadas à remediação e restauração ambiental, avaliando sua aplicabilidade geográfica e considerando múltiplos estressores de modo a permitir a diferenciação entre eles. Abordagens pioneiras nesse sentido têm o potencial de avançar o manejo de ecossistemas aquáticos, oferecendo novos

entendimentos e aplicações práticas frente às complexas dinâmicas das mudanças ambientais.

Tabela 1 – Tópicos extraídos de um total de 119 publicações resultantes da busca bibliográfica sobre análise de FAs em estudos limnológicos até 2022.

Nº do tópico	Título do Tópico	Descrição do Tópico
1	Lipídios totais em invertebrados	Medições de várias classes lipídicas em invertebrados aquáticos
2	Qualidade alimentar para <i>Daphnia</i>	Qualidade nutricional dos itens dietéticos para o crescimento e reprodução do zooplâncton, principalmente <i>Daphnia</i>
3	Transferência trófica em reservatórios/psicultura	Lipídios como marcadores de interações tróficas em reservatórios e sistemas de aquicultura
4	HUFAs em plâncton	Papel dos ácidos graxos altamente insaturados (HUFAs) na nutrição do plâncton e na eficiência da transferência de energia
5	FAs em tecidos de peixe	Comparação da composição e concentração de FAs em diferentes tecidos de peixes
6	Marcadores de FAs em sedimentos	FAs como marcadores lipídicos em sedimentos de sistemas aquáticos
7	FAs em peixes de água doce e marinhos	Comparação e descrição de FAs individuais e métricas de FAs entre espécies de peixes de água doce e marinhos
8	Marcadores FAs em lodo/águas residuais	FAs individuais e métricas de FAs como marcadores da presença de lodo e/ou esgoto em sistemas aquáticos
9	Estresse ambiental/térmico em biofilmes (e outras comunidades aquáticas)	FAs individuais e métricas de FAs como marcadores de estresse ambiental e/ou térmico sobre biofilmes e outras comunidades aquáticas
10	Sazonalidade e efeitos de uso da terra	Efeitos da sazonalidade e das mudanças no uso da terra sobre a composição e concentração de FAs em comunidades aquáticas
11	FAs em matéria orgânica de rios	Composição e concentração de FAs na matéria orgânica em suspensão de rios
12	FAs em perifíton de riachos	Composição e concentração de FAs em comunidades de perifíton

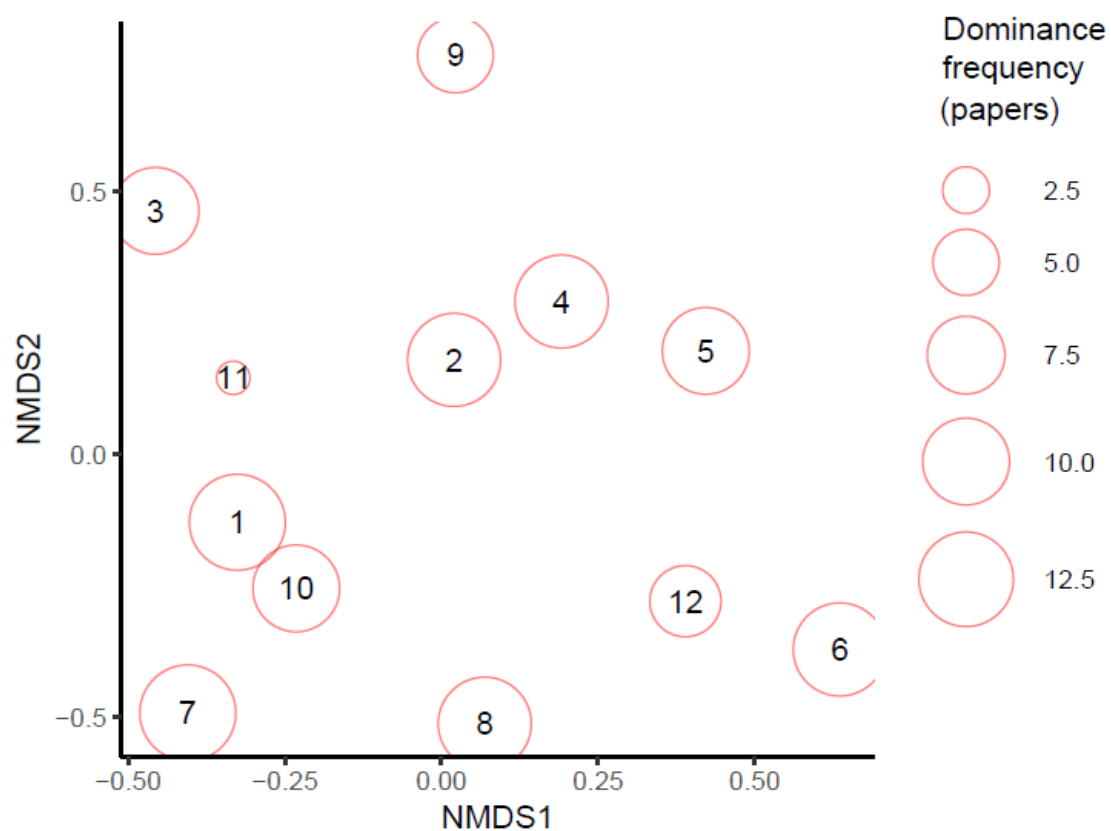


Figura 1 – Dominância, similaridade e dissimilaridade dos tópicos com base na análise de escalonamento multidimensional não métrico (nMDS). O tamanho dos círculos indica a dominância do tópico, sendo que círculos maiores representam tópicos mais dominantes, enquanto a proximidade entre os círculos representa o grau de similaridade (círculos próximos) ou dissimilaridade (círculos afastados) entre os tópicos.

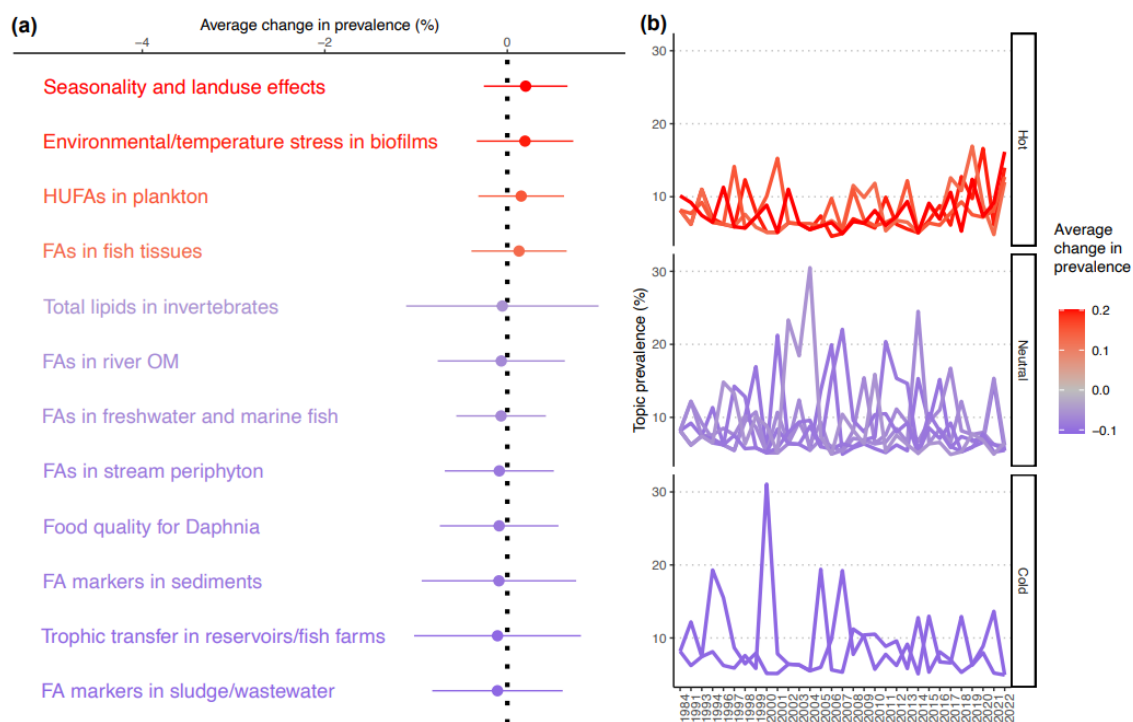


Figura 2. Padrões de mudança na prevalência média dos tópicos ao longo do tempo (A; barras representam os erros padrão), bem como as taxas de variação da prevalência (B), para tópicos quentes (vermelho), neutros (roxo claro) e frios (roxo escuro).

3 IDENTIFICAÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS MARCADORES *FINGERPRINTING* DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS POR MEIO DE META-ANÁLISE

3.1 Introdução

Apesar da ampla utilização dos FA em estudos ecológicos aquáticos, a literatura científica carece de sínteses quantitativas capazes de estabelecer padrões consistentes de resposta dessas moléculas frente aos diferentes tipos de impacto antrópico. Diversos estudos relatam alterações na concentração de compostos lipídicos em ambientes expostos à eutrofização, aquicultura, contaminação por metais pesados e outros estressores ambientais. No entanto, essas evidências permanecem dispersas, dificultando a consolidação de critérios objetivos para o uso de FA como indicadores bioquímicos.

Neste contexto, a presente meta-análise foi desenvolvida com o objetivo de identificar tendências gerais e compostos responsivos — ou seja, FA cuja concentração tende a variar de forma recorrente sob determinados tipos de impacto ambiental. Com base em 29 estudos extraídos da literatura, e mais de dez mil registros individuais de medições, foram calculados os valores de Log Response Ratio (LRR) para diferentes FA, organizados segundo categorias como tipo de impacto, sistema aquático e matriz biológica. O foco desta abordagem foi testar a hipótese de que existem respostas sistemáticas de determinados FA a estressores ambientais específicos, independentemente da localização geográfica, metodologia adotada ou grupo taxonômico amostrado.

Os resultados revelaram uma predominância de respostas negativas, ou seja, uma tendência geral de redução nas concentrações de FA sob impacto ambiental, com destaque para compostos poliinsaturados como total PUFA, DHA (*Docosahexaenoic acid*) e ARA (*Arachidonic acid*), reconhecidos por seu papel ecológico fundamental em cadeias tróficas, por se tratarem, em muitos organismos, de ácidos graxos essenciais (não sintetizados pelo organismo, ou apenas em concentrações muito baixas, precisando ser complementados na dieta). Essa tendência sugere uma possível perda de qualidade

nutricional da base trófica em ambientes impactados, com implicações para consumidores primários e para os processos de transferência de energia no ecossistema.

Ainda assim, alguns compostos apresentaram aumento significativo nas suas concentrações sob condições de impacto, como os ácidos na razão BAFA/EFA (*Bacterial FA/Essential FA*) e 16:0, indicando possível substituição de fontes lipídicas autotróficas por fontes bacterianas ou alóctones em contextos de degradação ambiental. Além disso, a análise por tipo de impacto permitiu identificar *fingerprintings* lipídicos específicos, como o aumento de EPA/ARA em sistemas sob impacto de eutrofização, a redução nas concentrações de SFA (*Saturated FA*) sob impacto de aquicultura e o aumento de 18:1n9c sob o impacto de drenagem ácida, sugerindo que diferentes estressores geram respostas bioquímicas distintas e potencialmente diagnósticas.

A meta-análise também evidenciou a influência do sistema aquático e da matriz biológica nos padrões de resposta, com plâncton, perifíton e peixes figurando entre as matrizes mais sensíveis à variação lipídica, enquanto ambientes como reservatórios e rios apresentaram os efeitos mais pronunciados. Por fim, a integração entre sistema, matriz e tipo de impacto indicou que as combinações ecológicas contextuais afetam fortemente os efeitos observados, reforçando a necessidade de interpretações multivariadas e contextualizadas.

Ao reunir evidências empíricas dispersas e revelar padrões estatisticamente robustos de resposta lipídica, esta meta-análise representa uma das primeiras tentativas sistemáticas de identificar moléculas *fingerprinting* associadas a impactos ambientais em ecossistemas aquáticos. Os achados obtidos oferecem subsídios relevantes para o uso estratégico dos FA em iniciativas de monitoramento ecológico e gestão ambiental em diferentes escalas.

3.2 Metodologia

3.2.1 Seleção e extração de dados para a meta-análise

Após a etapa de modelagem de tópicos, iniciou-se o processo de triagem dos artigos. O objetivo foi identificar, entre os artigos do corpus inicial, aqueles com dados adequados para integrar a meta-análise. Uma das premissas de uma meta-análise está pautada na comparabilidade entre os dados, ou seja, é necessário poder contrapor os dados veiculados pelos estudos, o que implica em uma uniformidade mínima entre as diferentes abordagens metodológicas, variáveis reportadas e resultados apresentados. Nem todos os artigos inicialmente selecionados para as análises exploratórias — como a modelagem de tópicos, avaliação de similaridade e popularidade de tópicos — atendiam aos critérios necessários para a meta-análise, o que tornou essa triagem uma etapa fundamentalmente importante para garantir a integridade das etapas analíticas conduzidas nesta segunda parte do estudo. Os 119 estudos presentes no corpus se mostraram bastante heterogêneos em relação a suas abordagens e variáveis investigadas. Diante dessa heterogeneidade, foi necessário definir critérios claros para assegurar a consistência e a comparabilidade dos dados que seriam incluídos na meta-análise. Esse processo exigiu a leitura de cada estudo, a fim de avaliar sua elegibilidade com base em critérios específicos. Trata-se de uma etapa minuciosa, que exigiu atenção criteriosa e interpretação dos estudos. Em diversos casos, foi necessário lidar com metodologias pouco padronizadas ou extrair dados apresentados de forma parcial, o que aumentou o grau de complexidade da seleção dos artigos.

Entre os aspectos considerados na avaliação de elegibilidade, destacou-se a natureza da análise empregada em cada estudo, classificando-os como quantitativos ou qualitativos. Essa classificação foi determinada com base na forma como os dados analíticos eram apresentados. Classificou-se como quantitativos quando o estudo apresentava dados numéricos sistematizados (como por exemplo, em tabelas), evidenciando que houve um tratamento estatístico claro e adequado à comparação entre grupos (tais como grupo controle e impactado, por exemplo). Ademais, estudos foram caracterizados como qualitativos quando os dados eram predominantemente descritivos,

não expressando uma estrutura clara que permitisse a comparação, ou sem apresentar claramente a aplicação de um método estatístico que permitisse a análise dos valores.

Para organizar informações relevantes durante a triagem dos 119 estudos, foram registrados os seguintes aspectos de cada artigo: (1) Tópicos que foram explorados dentro do estudo, bem como a maneira como o estudo foi conduzido; (2) Sistema aquático abordado no estudo (como marinho, estuarino, rio, riacho, lago, reservatório etc.); (3) Tipo de impacto antrópico considerado no estudo (direto ou indireto); (4) Categorização da biota analisada no estudo (peixe, fitoplâncton, zooplâncton, mamíferos aquáticos, microzooplâncton, macrófitas, macroinvertebrados bentônicos, dentre outros.); (5) FA e/ou métricas presentes no estudo, como por exemplo, ácidos graxos saturados (SFA), monoinsaturados (MUFA), polinsaturados (PUFA), ômega-3, dentre outros; e (6) Análise estatística empregada no estudo (quantitativa ou qualitativa).

Ao final do processo de seleção dos artigos, foi obtido um corpus que totalizou 29 estudos. Em estudos ambientais de meta-análises voltados para ambientes aquáticos é comum autores reunirem um número mais expressivo de publicações, formando corpora mais extensos. Por exemplo, Foley et al. (2018) reuniu 43 estudos para investigar os efeitos de microplásticos em peixes e invertebrados aquáticos. Já Dai et al. (2023) integrou 105 publicações relacionadas à dinâmica de sedimentos em lagos da China. Além disso, Cox et al. (2018) elencou 42 estudos sobre a poluição por ruído sonoro em peixes, compilando 2.354 pontos de dados. Embora um grande volume de dados contribua para a identificação de padrões estatísticos mais claros e robustos, o número de artigos incluídos nesta meta-análise deve ser compreendido na perspectiva da rigorosidade dos critérios de seleção aplicados, onde o foco na comparabilidade dos dados guiou a seleção dos estudos, refletindo uma melhor prática para a condução de meta-análises (GUREVITCH et al., 2018) e validando o rigor metodológico em detrimento do tamanho do corpus.

A extração dos dados necessários à realização da meta-análise teve início a partir dos 29 artigos selecionados na etapa anterior. Essa fase demandou um exame mais profundo do conteúdo metodológico de cada estudo, indo além da simples leitura complementar. Dada a heterogeneidade metodológica presente no conjunto dos estudos,

tornou-se necessário realizar uma nova rodada de análise ainda mais criteriosa, desta vez com foco ampliado sobre aspectos técnicos e conceituais. Essa leitura aprofundada concentrou-se na estrutura metodológica que cada pesquisa adotou, na clareza da apresentação das métricas e variáveis analisadas, bem como na forma como os dados estavam organizados, especialmente no que diz respeito à mensuração dos impactos antrópicos e à utilização de FA como marcadores. Esse processo foi fundamental para assegurar a comparabilidade entre os estudos, permitindo a sistematização padronizada dos dados extraídos e viabilizando sua posterior análise comparativa no contexto da meta-análise.

Tabela 2 – Campos utilizados para a sistematização dos dados extraídos dos estudos selecionados

Nº	Campo	Descrição resumida
1	Trabalho	Número de identificação no corpus inicial
2	Descrição do estudo	Objetivo e/ou forma de condução
3	Sistema estudado	Marinho, estuário, rio, riacho, lago, reservatório etc.
4	Impacto antrópico considerado	Tipo específico de perturbação antrópica
5	Tipo de avaliação	Qualitativa ou quantitativa
6	Covariável de impacto	Variável ambiental usada como indicadora (ex: clorofila-a)
7	Covariável – Controle e Tratamento	Valores e desvios padrão das covariáveis nos dois grupos
8	Métrica de ácido graxo	Ex: molécula específica, razão, FA total, PUFA, HUFA etc.
9	Ácidos graxos – Controle e Tratamento	Valores e desvios padrão
10	Unidade de medida dos ácidos graxos	mg/g, %, µg/L, etc.
11	Comentários	Observações relevantes sobre o estudo

A coluna "Nº" refere-se as repartições dentro da planilha de extração de dados. A coluna "Campo" refere-se ao título do campo na planilha de extração de dados.

Fonte: Elaboração própria

Diante do exposto, os campos definidos na planilha permitiram organizar os dados de maneira sistemática e comparável, criando as condições necessárias para a aplicação das análises estatísticas subsequentes. Com os dados organizados de forma padronizada, foi possível submetê-los a análise estatística por meio da linguagem R, utilizando pacotes específicos para meta-análise e manipulação de dados.

As principais variáveis extraídas incluíram: tipo de biota analisada, tipo de ambiente (marinho, estuarino, dulcícola etc.), natureza do impacto antrópico, variáveis ambientais associadas (como clorofila-a), tipo de métrica utilizada para os ácidos graxos (como frações totais, PUFA's ou HUFAs), além de medidas quantitativas (média e desvio padrão) para grupos controle e tratamento.

3.2.2 – Análise estatística (meta-análise)

A análise estatística foi conduzida por meio da execução de scripts na linguagem R (versão 4.4.0), com o uso dos pacotes “metafor” (VIECHTBAUER, 2010), amplamente empregado em meta-análises nas áreas de ecologia e ciências ambientais; “readxl” (WICKHAM; BRYAN, 2019), utilizado para a importação de planilhas em formato “.xlsx” (Microsoft Excel); e “dplyr” (WICKHAM et al., 2018), aplicado na manipulação e organização dos dados.

A escolha do R se justifica por ser uma linguagem de programação gratuita e de código aberto, amplamente adotada na comunidade científica devido à sua versatilidade para análise estatística, visualização de dados e desenvolvimento de modelos complexos. Sua estrutura baseada em pacotes facilita a integração de diferentes métodos analíticos em um único ambiente, promovendo reprodutibilidade e transparência em pesquisas científicas (R CORE TEAM, 2022).

A planilha contendo os dados extraídos dos estudos selecionados foi submetida a um processo de adequação dos dados. Foram excluídas linhas que apresentavam ausência de dados numéricos para os ácidos graxos ou de variáveis categóricas associadas (ex.: covariável indicadora de impacto, sistema etc.), para que não houvesse interferência desses dados ausentes durante a execução do código. Nesse processo, também foram verificados outros parâmetros, como o uso de separador de milhar e a grafia de cada entrada, com a finalidade de evitar erros na leitura e manipulação dos dados decorrentes de diferentes formas de escrita para a mesma informação (por exemplo, “w3” e “ω3” para se referir ao ácido graxo ômega 3).

A medida de efeito escolhida foi o Log Response Ratio (LRR), obtido a partir da razão entre os valores médios do grupo sob impacto (tratamento) e do grupo não afetado

pelo impacto (controle). Esse valor foi calculado por meio do logaritmo natural dessa razão, conforme expresso na seguinte equação:

$$LLR = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right), \text{ onde:}$$

$\ln$ = logaritmo natural

X_t = média do grupo tratamento

X_c = média do grupo controle

O LRR é amplamente adotado em estudos ecológicos, pois expressa variações proporcionais de forma simétrica, possui distribuição aproximadamente normal e permite interpretação direta da intensidade e direção do efeito (HEDGES; GUREVITCH; CURTIS, 1999).

Aplicado aos valores de log response ratio (LRR), utilizou-se o modelo de efeitos aleatórios com estimação por *Restricted Maximum Likelihood* (REML), com o objetivo de calcular a variância entre os efeitos reais incluídos na meta-análise (SABATER et al., 2018). Esse modelo estima a estatística τ^2 (tau quadrado), que representa a variância entre os efeitos verdadeiros dos estudos, ou seja, a heterogeneidade que não pode ser atribuída ao erro amostral.

Embora a meta-análise tenha sido composta por apenas 29 estudos, a extração resultou em mais de dez mil entradas, em virtude da presença de múltiplas comparações entre grupos controle e tratamento em diversos artigos. Esse volume expressivo reforça a adequação do modelo adotado, permitindo a obtenção de estimativas confiáveis do efeito médio e da variabilidade entre os estudos.

Devido à heterogeneidade metodológica dos estudos incluídos, optou-se por realizar uma análise por subgrupos. O objetivo foi verificar se o valor médio do efeito (LRR), calculado a partir dos diferentes estudos, variava em função de determinadas características presentes nos dados, como o tipo de FA, o ambiente avaliado ou o grupo biológico amostrado. A primeira categorização adotada foi o agrupamento dos dados com base nos diferentes ácidos graxos analisados, o que permitiu estimar o efeito médio para

cada composto. Em etapas subsequentes, os dados também foram organizados conforme outras variáveis categóricas, como o tipo de impacto antrópico, o sistema aquático avaliado e a matriz biológica, a fim de aprofundar a análise dos padrões observados.

O tratamento dos dados resultou, inicialmente, em um agrupamento de acordo com o tipo de FA identificado nos estudos. Para cada FA, foi calculado o valor médio do LRR, o erro padrão da média (SE) e o intervalo de confiança de 95%. Também foi aplicado um teste t para verificar se o LRR médio era significativamente diferente de zero. Apenas os FA com três ou mais observações foram mantidos na análise, garantindo a validade estatística mínima. Os resultados foram representados em forma de gráfico de barras com intervalos de confiança, organizados em ordem decrescente do valor médio.

Outro teste realizado foi o de categorização por tipo de impacto, onde os dados foram reorganizados com base nas variáveis que representam o tipo de impacto antrópico descrito nos estudos. Para cada tipo de impacto foi calculado o valor médio do LRR, o erro padrão da média (SE) e o intervalo de confiança de 95%. Os resultados foram representados em forma de gráfico de barras com intervalos de confiança, organizados em ordem decrescente do valor médio.

Já para os sistemas aquáticos, foi realizada uma reorganização dos dados que culminou em um agrupamento de acordo com o tipo de sistema analisado nos estudos, onde calculou-se o valor médio do LRR e o intervalo de confiança de 95%. Os resultados foram representados em forma de gráfico e foram ordenados de acordo com o efeito.

Por fim, realizou-se a categorização das matrizes biológicas, onde os agrupamentos foram determinados a partir da matriz em que os FA foram mensurados. Para tanto, realizou-se o cálculo do valor médio do LRR e o intervalo de confiança de 95% para cada matriz. Os resultados geraram gráficos que permitiram a visualização da variação entre as matrizes.

3.3 Resultados

Diferentemente da seção envolvendo a modelagem de tópicos, que combina resultados e discussão em uma única parte do texto devido à natureza exploratória da abordagem — na qual resultados e interpretações se mostram mais interligados —, neste capítulo optou-se por separar as seções de resultados e discussão, dando um caráter mais analítico devido as abordagens estatísticas empregadas, a complexidade estatística das análises conduzidas e a quantidade de resultados gerados.

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos por meio da meta-análise conduzida com dados inicialmente extraídos de 29 estudos da literatura. No entanto, alguns desses trabalhos foram excluídos por não apresentarem informações compatíveis com os critérios de análise, resultando em um conjunto final de 18 estudos. Antes de apresentar os efeitos obtidos por meio das análises estatísticas, é importante caracterizar brevemente esse banco de dados, bem como os efeitos gerais observados, que fornecem subsídios essenciais para a interpretação dos resultados.

A Figura 3, gerada por meio de um agrupamento que foi realizado a partir da totalidade de medições extraída dos estudos, mostra a distribuição das medições de ácidos graxos segundo a tendência de resposta ao impacto ambiental, classificadas como *aumento*, *redução* ou *sem alteração*. Observa-se que a maioria das respostas representa uma redução na concentração dos FA sob condições de impacto, seguida por aumentos e, por fim, com valores expressivamente menores, respostas sem alteração significativa. Esse padrão inicial já sugere uma tendência geral de decréscimo na disponibilidade desses compostos em contextos de ambientes perturbados.

De maneira complementar, a Figura 4 apresenta uma visualização geral dos efeitos da média de LRR, obtidos por FA individual, a partir de uma meta-análise não ponderada, ou seja, sem o ajuste que atrela os resultados ao tamanho amostral de cada composto. Embora os resultados apresentados nessa figura estejam encavalados e parcialmente sobrepostos, de maneira que dificulta a leitura e interpretação precisa, a figura oferece uma representação preliminar da direção dos efeitos, reforçando a predominância de FA com valores de média LRR negativas, conforme observado na Figura 3. Por se tratar de

uma análise não ajustada pelo número de medições (n), os resultados devem ser interpretados com cautela e não substituem os resultados com efeitos combinados que serão apresentados posteriormente.

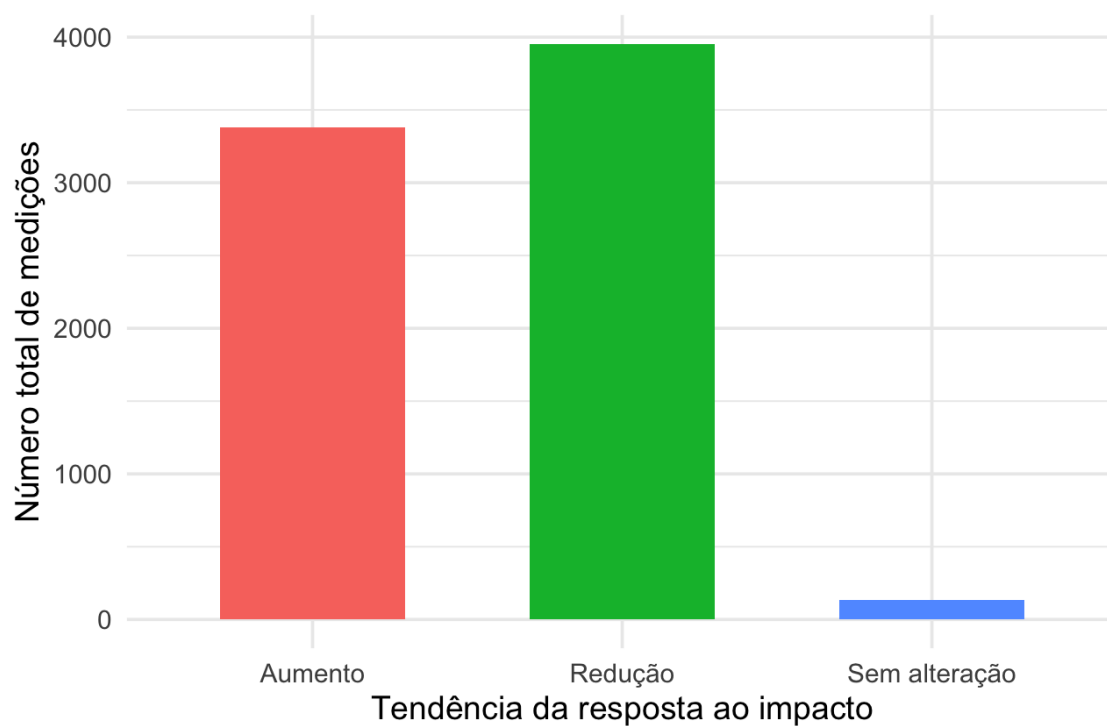


Figura 3 – Distribuição das medições de ácidos graxos segundo a tendência de resposta ao impacto ambiental. As barras representam o número total de registros classificados conforme a direção do efeito observado (aumento, redução ou ausência de alteração) nas concentrações de ácidos graxos, comparando condições de controle e impacto.

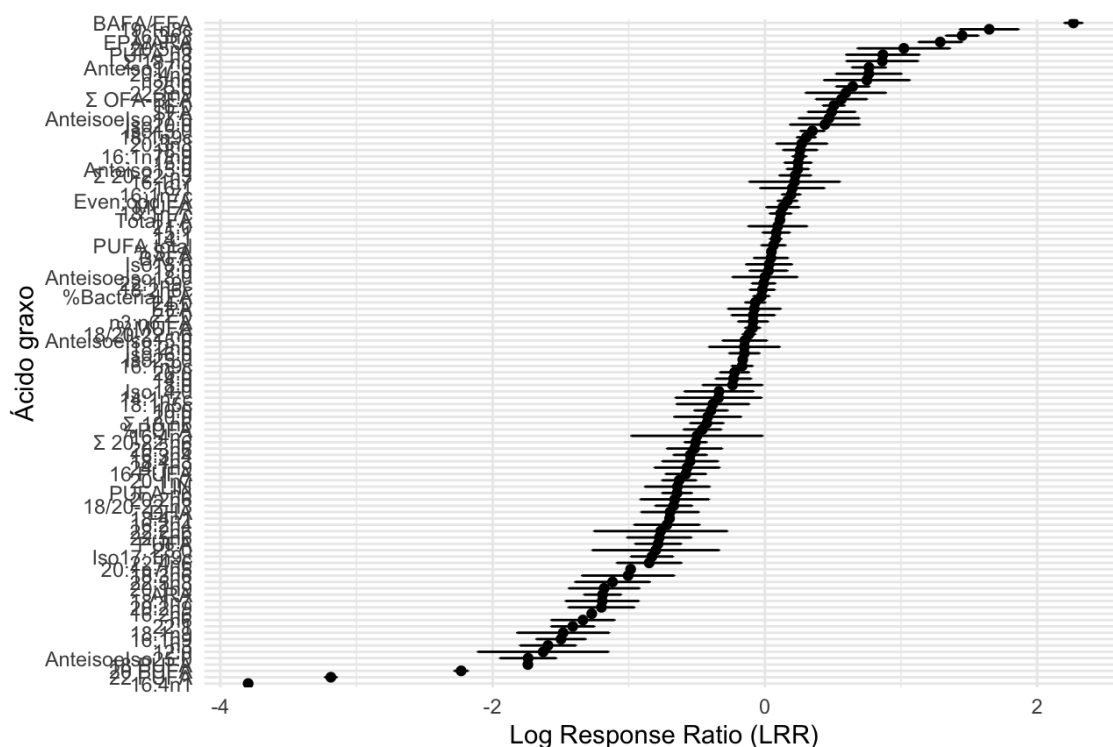


Figura 4 – Estimativa não ponderada dos efeitos médios (LRR) por ácido graxo. Cada barra representa o valor médio do Log Response Ratio (LRR) calculado individualmente para cada ácido graxo, sem ajuste por número de medições (n). Por se tratar de uma análise não ponderada, os resultados devem ser interpretados como uma visualização exploratória da direção geral dos efeitos.

Dando continuidade à caracterização do banco de dados, as Figuras 5 a 8 detalham a distribuição das medições seguindo variáveis contextuais dos estudos incluídos.

A Figura 5 mostra a frequência de medições considerando os sete sistemas impactados envolvidos neste estudo, onde observa-se que os sistemas com maior número de registros são reservatórios (com quase 4.000 medições) e rios (pouco mais de 3.000), representando a maior parte das medições extraídas. Em seguida, aparecem os riachos, com pouco mais de 500 medições. Sistemas marinhos e Áreas alagadas apresentam um número pequeno de medições, frente aos sistemas supracitados. Por fim, águas costeiras e lagos exibem valores de medições muito próximos de zero.

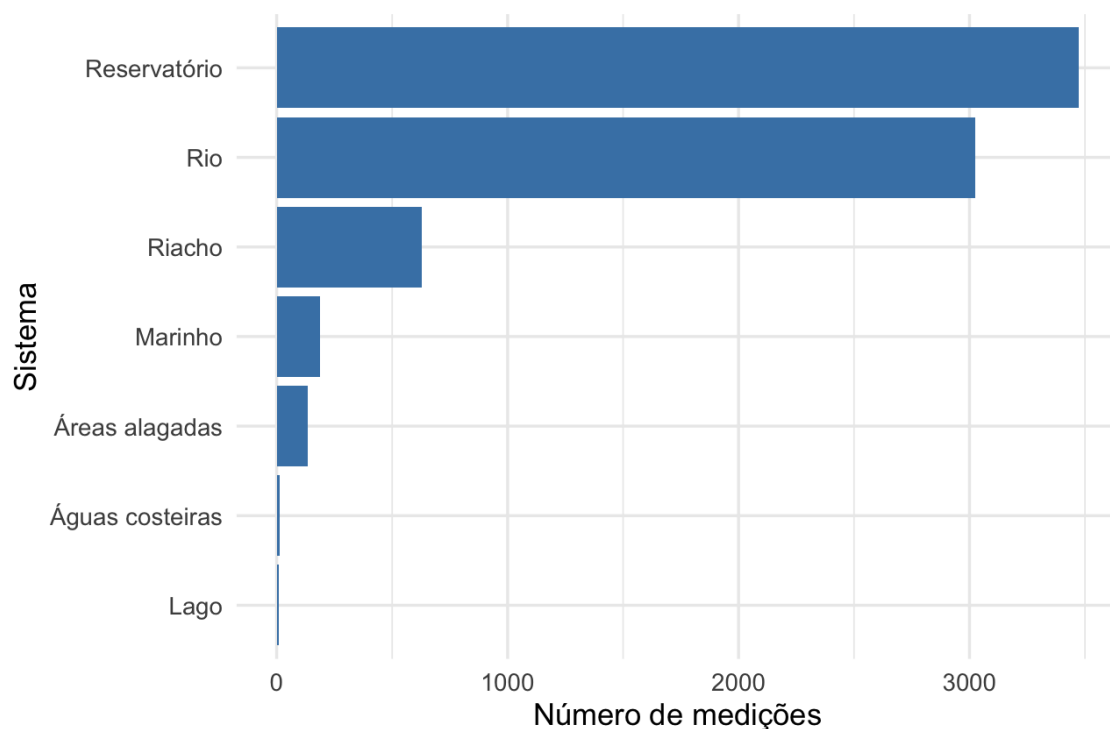


Figura 5 – Frequência de medições por sistema aquático e ácido graxo. As barras representam o número total de medições extraídas da literatura para cada sistema aquático

A Figura 6, por sua vez, apresenta a distribuição das medições de acordo com a matriz biológica amostrada nos estudos, com a finalidade de caracterizar os organismos analisados em função da frequência de medições de cada um. Verifica-se que os peixes correspondem à matriz mais frequente, apresentando mais de 2.500 ocorrências, o que representa quase o dobro do segundo mais frequente, que é o seston, com cerca de 1.500 registros. Depois, temos plâncton, potamoseston e biofilme, todos com valores entre 500 e 1000 ocorrências, seguidos de perifíton e bentos, que aparecem com quase o mesmo valor (<500). Por outro lado, matrizes como corais, lagosta e moluscos exibem um número bastante reduzido de medições, indicando uma menor representatividade desses organismos nas pesquisas reportadas na meta-análise.

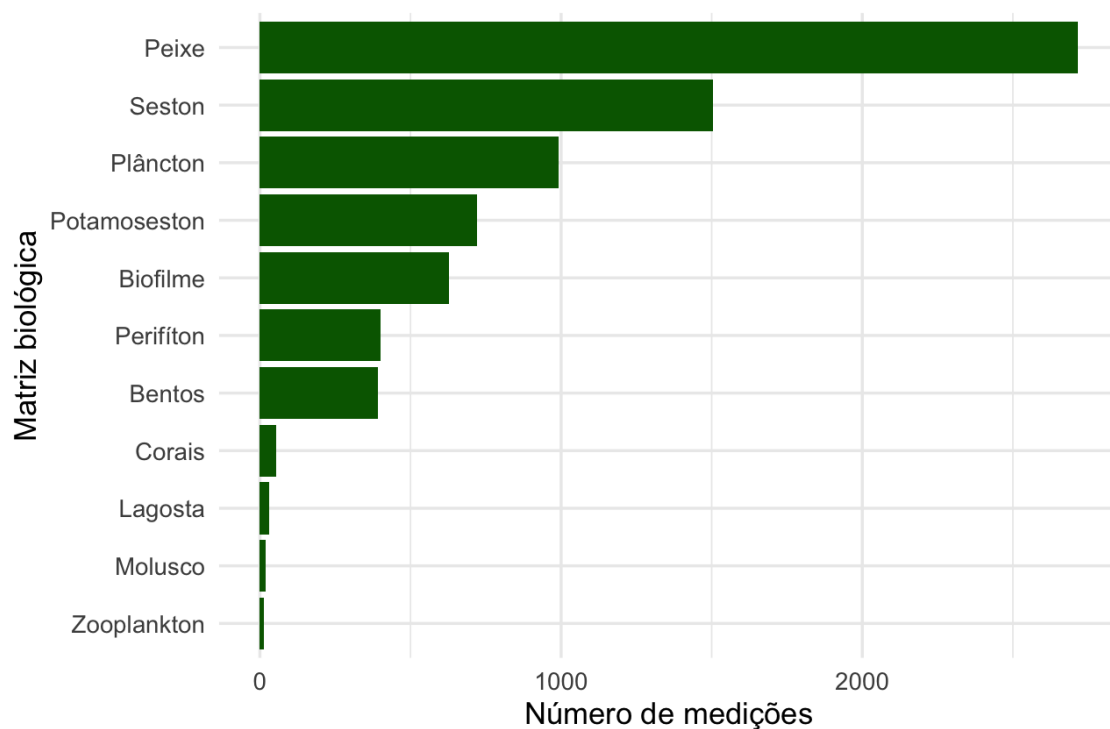


Figura 6 – Frequência de medições por matriz biológica. As barras representam o número total de medições extraídas da literatura para cada matriz biológica avaliada nos estudos incluídos na meta-análise.

Por fim, a Figura 7 mostra a distribuição dos dados conforme o tipo de impacto antrópico investigado nos estudos. Essa medição condensou as categorias de impacto identificadas no corpus, totalizando nove agrupamentos distintos. O impacto mais proeminente que aparece dentro do conjunto é causado por metais pesados, alcançando quase 2.500 registros. Em seguida, é possível observar: aquicultura, com valor próximo de 1.500; eutrofização, que supera 1.000 registros; mudanças climáticas, com número próximo de 1.000; uso da terra, acima de 750 e drenagem ácida, com pouco mais de 500 registros. Os demais (acidificação, pesca e carga de sedimentos), apresentam uma frequência muito baixa, próximo de zero.



Figura 7 – Frequência de medições extraídas da literatura por tipo de impacto, organizadas por categoria de impacto ambiental utilizada na meta-análise.

Após a caracterização do banco de dados, os resultados a seguir detalham as respostas dos FA aos impactos ambientais. A apresentação começa pela identificação do FA mais responsivo em cada tipo de impacto e, em seguida, avança para a análise direta dos FA, considerando os valores de média de LRR e a significância estatística das variações observadas.

A Figura 8 apresenta o FA com a resposta mais significativa para cada tipo de impacto ambiental considerado. Essa análise permite identificar quais compostos apresentaram maior sensibilidade dentro de cada categoria de impacto, com base nos valores de média de LRR e nos respectivos intervalos de confiança. As respostas estatisticamente significativas estão indicadas com asteriscos. A linha vermelha tracejada posicionada no eixo X indica o valor zero dentro da escala LRR.

Entre os nove tipos de impacto analisados, seis apresentaram pelo menos um FA com resposta estatisticamente significativa. Refletindo uma resposta positiva, temos a razão EPA/ARA (*Eicosapenenoic acid/arachdonic acid*) na eutrofização, seguido do EPA no uso da terra, e por fim, 18:1n9c no caso da drenagem ácida. Refletindo respostas negativas, temos o SFA (*saturated fatty acids*) na aquicultura, o ARA em metais pesados e, por fim, o 18 PUFA (Poli-insaturated fatty acids with 18 C atoms) nas mudanças climáticas. Os impactos relacionados à acidificação, à carga de sedimentos e à pesca não apresentaram respostas estatisticamente significativas, sendo classificados como “ns” na figura.

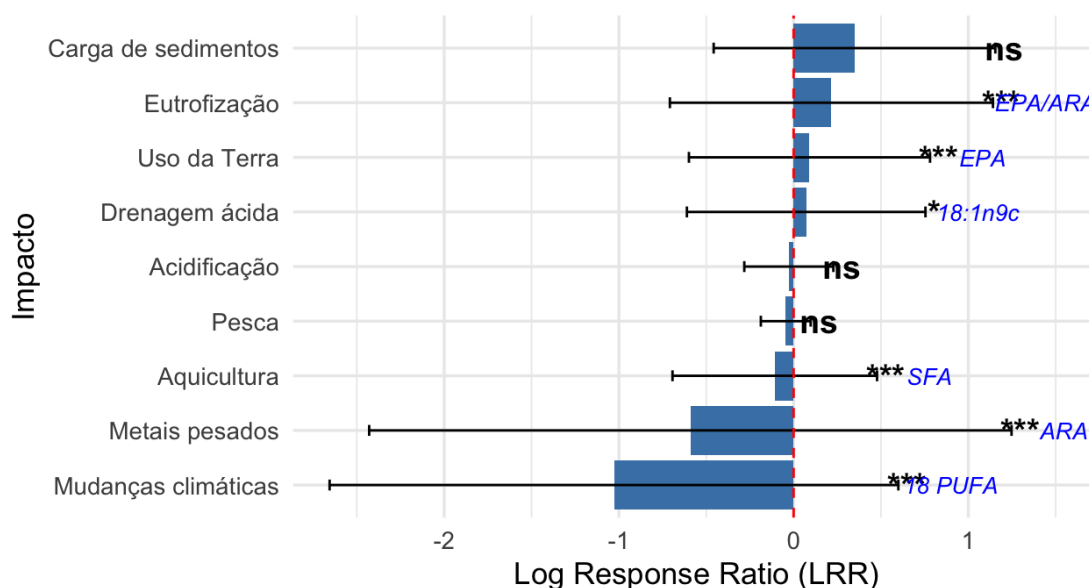


Figura 8 – Ácidos graxos com a resposta mais significativa em cada tipo de impacto ambiental. As barras azuis mostram os valores médios de LRR, e as linhas pretas indicam os intervalos de confiança. Os asteriscos marcam respostas estatisticamente significativas (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$), enquanto “ns” indica ausência de significância.

A Figura 9 apresenta os dez FA que exibiram as maiores variações nos valores médios de LRR em resposta aos impactos ambientais. Os compostos foram selecionados com base na amplitude das respostas observadas, independentemente do tipo de impacto. Os valores são apresentados com suas respectivas médias, desvios padrão e número total de medições (entre parênteses). A linha vermelha tracejada posicionada no eixo X indica

o valor zero dentro da escala LRR, e os asteriscos indicam diferenças estatisticamente significativas.

De forma geral, observou-se uma ampla variação nas respostas, tanto em termos de intensidade quanto na direção dos efeitos. Todos os compostos destacados na Figura 5 apresentaram alterações estatisticamente significativas ($p \leq 0,001$), porém apenas quatro demonstraram valores médios de LRR — positivos ou negativos — superiores a 2, sendo considerados os mais responsivos aos impactos ambientais: BAFA/EFA (bacterial fatty acids/essential fatty acids), 16:4n1, 22 PUFA (PUFAs de 22 C) e 20 PUFA (PUFA de 20C). Os demais compostos (16:0, 18:4n1, 20:1n7/n5, ARA, 16:2n6 e 18 PUFA), também apresentaram efeitos significativos, embora com valores médios menores, refletindo respostas mais sutis às condições de impacto. Apenas BAFA/EFA e 16:0 demonstraram um valor médio de LRR positivo, indicando aumento em suas concentrações em função do impacto. Todos os demais apresentaram valores negativos. Outro dado importante demonstrado pela figura é a assimetria nas respostas, com predominância de efeitos negativos. Além da direção e da intensidade dos efeitos, a quantidade de observações também variou entre os compostos. O ácido graxo 16:0, por exemplo, apresentou um valor médio positivo próximo de zero, mas foi analisado com base em 305 observações, conferindo elevada robustez a esse resultado. A grande maioria dos outros ácidos graxos apresentou $n = 24$, o que sugere que esses resultados, apesar de indicar confiança no âmbito estatístico, devem ser interpretados de maneira cautelosa.

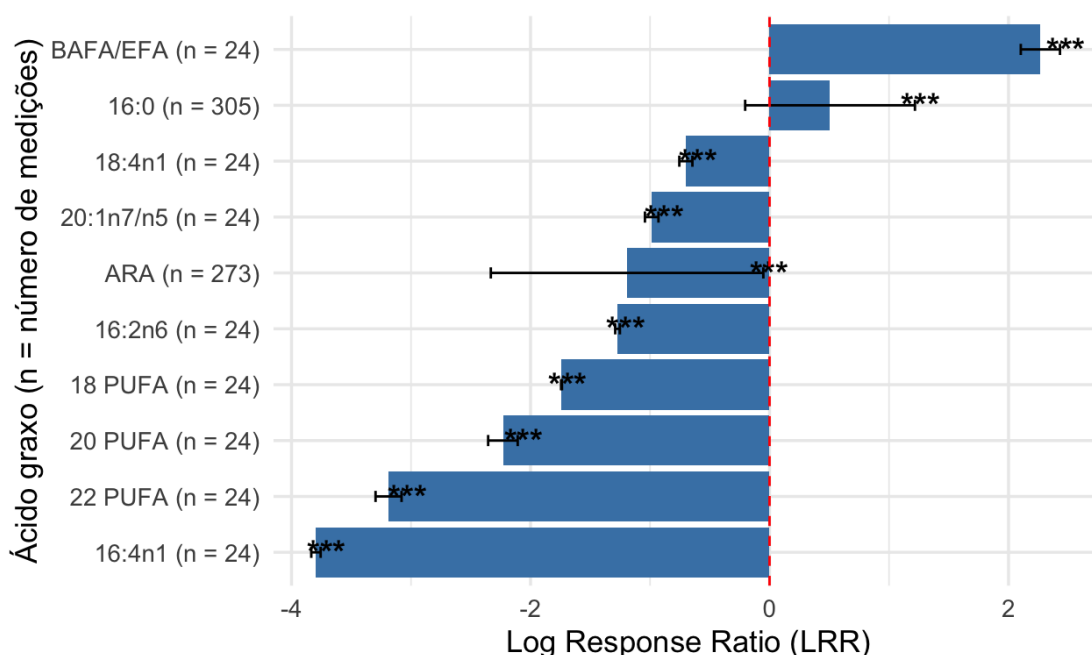


Figura 9 – Dez ácidos graxos mais responsivos aos impactos ambientais. A média dos efeitos foi calculada usando o Log Response Ratio (LRR). As linhas horizontais mostram a incerteza dos valores (intervalo de confiança de 95%). O número entre parênteses indica quantas medições foram analisadas para cada composto.

A Figura 10 apresenta os valores médios de Log Response Ratio (LRR) para um conjunto de compostos amplamente utilizados em estudos ecológicos e fisiológicos, incluindo grupos (SFA, MUFA-monounsaturated FA, PUFA) e ácidos graxos individuais (EPA, DHA, ARA e LIN – *linolenic acid*). As barras representam as médias de LRR, com linhas pretas indicando o desvio padrão, e os números entre parênteses correspondem ao total de medições para cada composto. A linha vermelha tracejada posicionada no eixo X representa o valor zero da escala LRR. Os asteriscos indicam diferenças estatisticamente significativas (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$).

Dentre os compostos analisados, apenas um (EPA) não apresenta resposta estatisticamente significativa, uma vez que o seu valor está bem próximo de zero. SFA e MUFA apresentam média LRR positiva. Já EPA, LIN, DHA, PUFA e ARA apresentam média negativa. A redução mais acentuada foi observada no ARA, com valor médio de LRR inferior a -1 , seguida por PUFA e DHA. O ácido graxo EPA apresentou a menor média de diminuição entre os compostos individuais (próximo de zero).

O número de observações variou consideravelmente entre os compostos. EPA, LIN e ARA, apresentaram o maior número de medições (acima de 200), conferindo maior robustez estatística aos seus valores médios. Os resultados da figura indicam que, entre os compostos mais utilizados na literatura, há uma tendência predominante de redução em resposta aos impactos ambientais considerados.

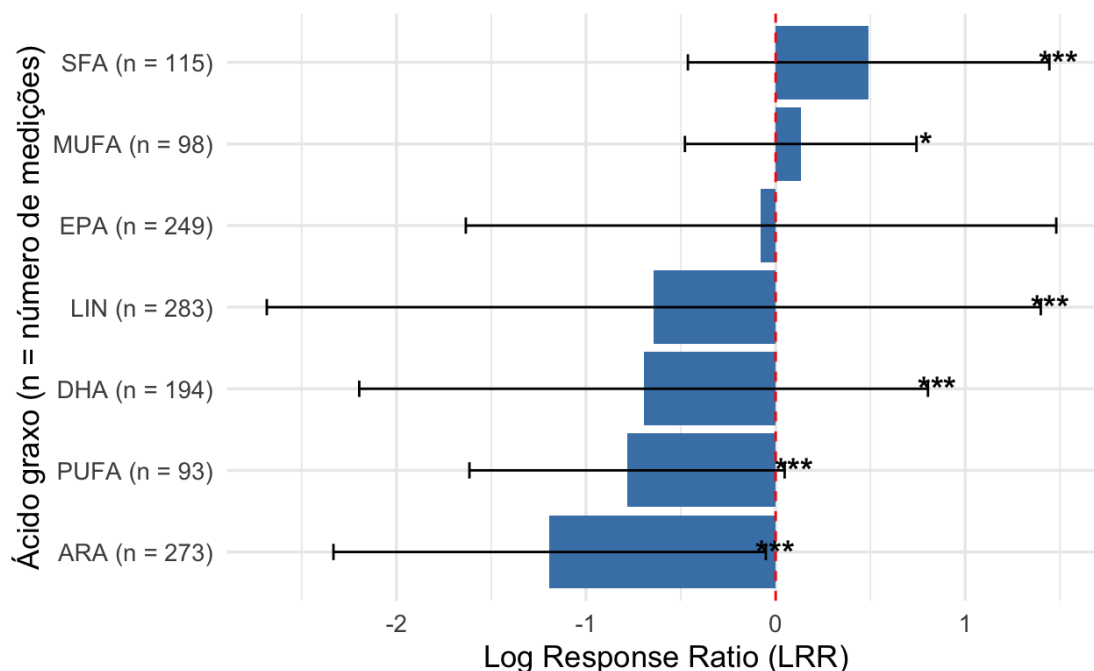


Figura 10 – Resposta média de compostos ou grupos de ácidos graxos utilizados em estudos ecológicos e fisiológicos. Os valores médios de Log Response Ratio (LRR) são apresentados com seus respectivos desvios padrão, e o número total de medições utilizadas em cada cálculo está indicado entre parênteses. A linha vermelha tracejada posicionada no eixo X representa o valor zero dentro da escala LRR. As linhas pretas indicam o intervalo de confiança de 95%. Os asteriscos indicam respostas estatisticamente significativas (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$).

Após a análise das respostas dos FA aos diferentes tipos de impactos ambientais, bem como a análise das respostas individuais, o bloco de resultados a seguir explora como essas respostas se distribuem entre os sistemas aquáticos amostrados nos estudos. Considerar o sistema onde as medições foram realizadas permite refinar a compreensão dos padrões observados, destacando contextos ecológicos mais sensíveis às alterações

associadas aos impactos. As análises incluem tanto os efeitos médios por sistema quanto as interações entre sistemas, matrizes biológicas e categorias de impacto.

A Figura 11 apresenta os cinco sistemas aquáticos que exibiram as respostas mais expressivas em termos estatísticos, com base nos valores médios de Log Response Ratio (LRR) e nos resultados do teste t aplicado para verificar a diferença em relação ao valor zero. Os sistemas foram selecionados com base nos menores valores de p, o que indica maior evidência de alteração nas concentrações de FA em ambientes impactados. Todos os sistemas destacados apresentaram valores médios negativos de LRR, sugerindo uma tendência geral de redução nas concentrações desses compostos sob condições de perturbação. Os intervalos de confiança estão representados pelas linhas pretas associadas às barras, e a linha vermelha tracejada posicionada no eixo X indica o ponto de referência zero.

De forma complementar, a Figura 12 apresenta as cinco matrizes biológicas que também exibiram os maiores níveis de significância estatística nos testes t. Assim como nos sistemas aquáticos, as categorias foram selecionadas com base nos menores valores de p, refletindo os grupos mais sensíveis à variação de FA sob impacto. Observa-se uma predominância de efeitos negativos, especialmente em plâncton, perifiton e peixes, o que sugere perda de compostos lipídicos relevantes nessas matrizes. O caso do potamoseston, por outro lado, apresentou um efeito positivo e altamente significativo, indicando um possível acúmulo ou manutenção diferencial de certos FA sob estresse ambiental. A disposição gráfica segue o mesmo padrão da figura anterior, permitindo comparações diretas entre os diferentes contextos ecológicos e biológicos analisados.

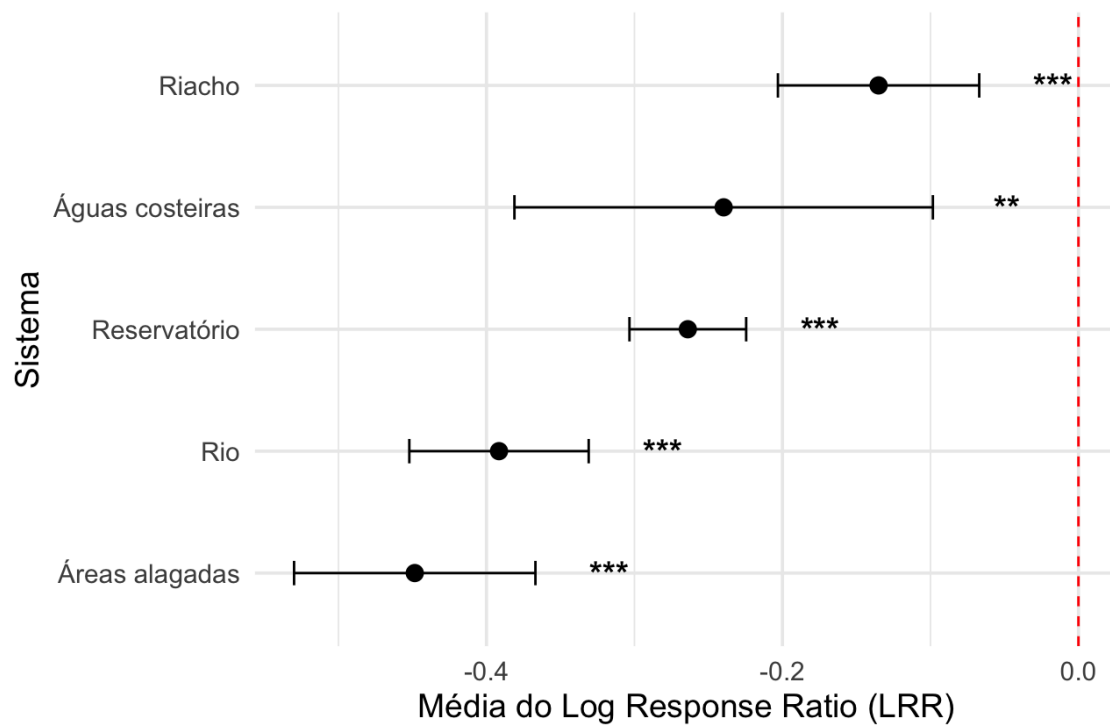


Figura 11 - Resposta média de LRR nos cinco sistemas aquáticos com maior significância estatística. As barras mostram os valores médios de Log Response Ratio (LRR), e as linhas pretas indicam os intervalos de confiança. A linha vermelha tracejada representa o valor zero da escala LRR.

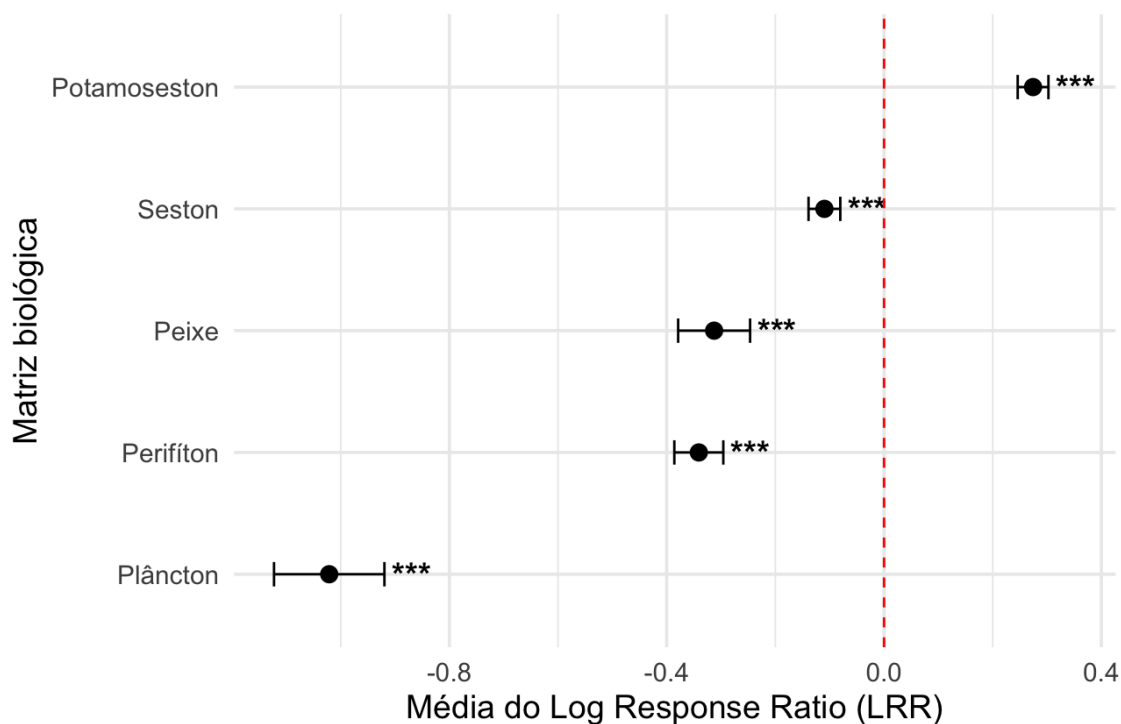


Figura 12 - Resposta média de LRR nos cinco sistemas aquáticos com menor significância estatística. As barras mostram os valores médios de Log Response Ratio (LRR), e as linhas pretas indicam os intervalos de confiança. A linha vermelha tracejada representa o valor zero da escala LRR.

A Figura 13 apresenta os FA com as respostas mais significativas dentro de cada combinação entre sistema aquático e matriz biológica amostrada. Para cada par sistema–matriz, foi selecionado o ácido graxo com o menor valor de p no teste t , desde que apresentasse diferença estatisticamente significativa. As barras representam os valores médios de Log Response Ratio (LRR) e as linhas pretas indicam os intervalos de confiança. A linha vermelha tracejada no eixo X marca o valor zero da escala LRR. Entre os resultados, observa-se uma predominância de valores negativos, indicando reduções na concentração dos compostos em contextos impactados. Determinadas combinações, como peixe em reservatórios e peixe em rios, concentram os maiores aumentos nas médias observadas, enquanto outras, como biofilme no riacho e seston no reservatório, apresentaram valores médios positivos menos intensos. Já em relação às combinações que apresentaram valores médios negativos, temos potamoseston nos rios e perifíton nos

rios com valores de redução mais próximos de zero. Os demais que apresentam média negativa maior, sendo a combinação plâncton nos reservatórios a que apresenta o menor valor dentre os que apresentam diminuição, e também a maior diferença de zero global, dentro da figura.

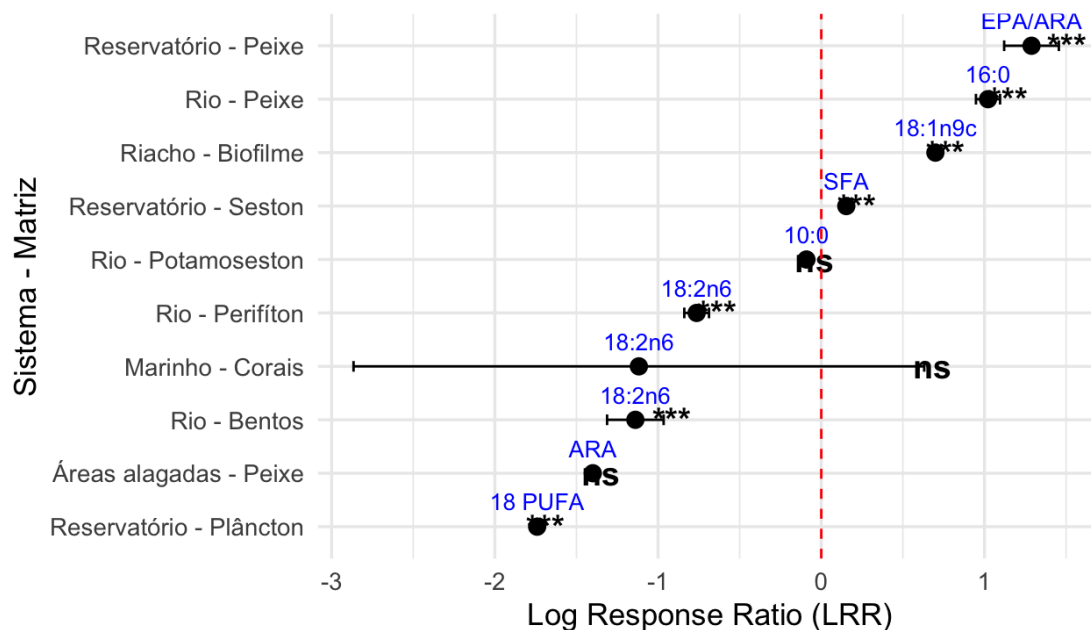


Figura 13 – Ácidos graxos mais significativos por combinação entre sistema aquático e matriz biológica. As barras representam os valores médios de LRR e as linhas pretas os intervalos de confiança. A linha vermelha tracejada indica o valor zero da escala LRR.

Para finalizar este bloco dos resultados, a Figura 14 exibe os valores de Log Response Ratio (LRR) dos FA mais responsivos em função dos impactos observados em cada sistema incluído na meta-análise. A linha tracejada representa o valor zero, servindo como referência para identificar se o impacto médio naquele sistema resulta em aumento (valores positivos) ou diminuição (valores negativos) na concentração do FA analisado. Os marcadores coloridos indicam o tipo de impacto associado a cada ponto, sendo que cada cor corresponde a uma categoria específica. Observa-se que em lagos e áreas alagadas há registro de apenas um tipo de impacto (carga de sedimentos e metais pesados, respectivamente). Riachos, águas costeiras e rios apresentam dois impactos cada,

sugerindo um volume de dados intermediário nesses sistemas. Todavia, reservatórios e ambientes marinhos exibem maior diversidade de impactos registrados, com múltiplos marcadores coloridos, o que indica que uma ampla representação de condições ambientais está associada a esses sistemas. Além disso, sobreposto a cada marcador colorido, é possível identificar o FA cujo a resposta foi mais expressiva naquele contexto.



Figura 14 – Valores médios de Log Response Ratio (LRR) dos diferentes tipos de impactos em cada sistema aquático. Cada marcador colorido representa uma combinação entre sistema e tipo de impacto, sendo que a cor indica o tipo de impacto e o ácido graxo mais responsivo está indicado sobre o ponto. A barra vertical representa o valor médio de LRR observado para cada impacto naquele sistema específico. A linha tracejada indica o valor zero, servindo como referência para a interpretação do efeito sobre a média de LRR.

Com base nos padrões observados nas análises apresentadas até aqui, a seção a seguir se dedica a discutir esses achados à luz do referencial teórico e dos estudos empíricos incluídos na meta-análise, com o objetivo de identificar explicações possíveis, reconhecer limitações e explorar as implicações ecológicas dos efeitos detectados.

3.4 Discussão

De modo geral, os resultados obtidos revelam uma tendência consistente de redução nas concentrações dos FA em resposta aos impactos ambientais, evidenciada pela predominância de valores médios de LRR negativos nos diferentes sistemas aquáticos analisados (Figs. 3 e 4). Esse padrão sugere que os impactos antrópicos comprometem a disponibilidade de compostos lipídicos essenciais na base da cadeia trófica, particularmente aqueles originados em produtores primários, como microalgas e bactérias heterotróficas, e presentes na fração orgânica do seston. O seston, nesse contexto, representa a matéria particulada em suspensão na água, frequentemente utilizada como indicador da base trófica disponível para organismos filtradores, como o zooplâncton (LICHTI et al., 2017). Dentre os ácidos graxos mais afetados, destacam-se os poli-insaturados (PUFA) de cadeia longa, um grupo funcional que inclui compostos como o EPA (20:5n-3), o DHA (22:6n-3) e o ARA (20:4n-6). Esses ácidos graxos de cadeia longa (mais de 18C) são sintetizados principalmente por microalgas e são reconhecidos por seu papel essencial em processos fisiológicos de consumidores aquáticos, além de estarem associados a fontes autotróficas de alta qualidade nutricional (LICHTI et al., 2017). A redução desses compostos pode indicar uma queda na qualidade nutricional da matéria orgânica particulada, o que repercute negativamente sobre os processos fisiológicos e reprodutivos dos consumidores primários e, conseqüentemente, sobre os processos de transferência de energia ao longo da cadeia trófica (PERGA et al., 2006; BRETT; MÜLLER-NAVARRA, 1997).

Ainda que a redução dos FA em resposta aos impactos ambientais seja predominante, alguns compostos exibiram padrões opostos, com valores médios de LRR positivos e estatisticamente significativos (Figura 9). Dentre eles, destacam-se BAFA/EFA e 16:0 (ácido palmítico), cujas concentrações aumentaram em contextos impactados. Esses compostos são frequentemente associados à maior contribuição bacteriana na base da cadeia trófica, especialmente em ambientes com presença de esgoto doméstico, aquicultura ou matéria orgânica degradada. Esse padrão é consistente com estudos que mostram aumento de BAFA e SFA em condições eutróficas ou com maior

aporte de carbono alóctone, indicando uma mudança nas principais fontes lipídicas (PERGA et al., 2006).

Além disso, a presença do ácido graxo monoinsaturado (MUFA) 18:1n9c como composto mais responsivo à drenagem ácida (Figura 8) reforça a ideia de que certos impactos específicos podem promover respostas direcionadas a fontes lipídicas distintas, possivelmente oriundas de processos fermentativos, degradação orgânica ou alteração da microbiota. Tais condições têm sido associadas à produção de ácidos graxos voláteis e compostos lipídicos derivados da atividade de comunidades microbianas anaeróbias, tanto em intestinos de peixes sob condições fermentativas quanto durante a decomposição de matéria orgânica em lodos e ambientes anóxicos (SMITH et al., 1996; ZHU et al., 2015). Esses aumentos, embora menos frequentes que os declínios observados em PUFA, revelam que a resposta lipídica aos impactos ambientais não se limita a perdas, mas pode incluir substituições bioquímicas com implicações para a qualidade da energia que flui pela cadeia trófica dos ecossistemas.

Mesmo com o padrão geral de declínio nas concentrações de ácidos graxos frente aos impactos ambientais, conforme indicado pelos valores médios de LRR, as Figuras 8 e 10 revelam uma alta variabilidade associada a diversos agrupamentos, expressa pelas extensas barras de erro. Em alguns casos, como os efeitos da acidificação e da pesca (Fig. 8), as barras ultrapassam a linha de referência (LRR = 0) e, somadas aos baixos valores médios de LRR, resultam em efeitos estatisticamente não significativos. Esse padrão não necessariamente reflete a ausência de dados, mas pode decorrer de uma dispersão elevada entre os valores observados, possivelmente associada a diferenças metodológicas, variações entre os sistemas amostrados ou ao fato de que, mesmo em agrupamentos com grande número de medições, como pesca, os dados podem estar concentrados em poucos contextos ecológicos ou espécies, limitando sua generalização. Essa amplitude elevada de respostas sugere que, embora haja uma direção média observável no gráfico, a intensidade e até o sentido do efeito podem variar substancialmente entre os estudos, o que torna necessário uma certa cautela na formulação de generalizações.

A situação do ácido araquidônico (ARA) ilustra um ponto importante: apesar de apresentar uma tendência média negativa clara (Figuras 9 e 10), o seu desvio padrão é

considerável, embora não ultrapasse a linha de referência do $LRR = 0$. Na verdade, diversos outros PUFA, como o EPA, DHA e LIN, apresentam desvios padrão ainda mais amplos, o que indica que a variabilidade não é exclusiva do ARA, mas sim um padrão recorrente entre os compostos analisados. Essa ampla dispersão observada entre os PUFA sugere que, embora exista uma direção média de efeito aparente, a consistência e a estabilidade da resposta variam substancialmente entre os estudos. Portanto, a interpretação dos efeitos observados deve considerar não apenas os valores centrais, mas também a incerteza associada a esses dados, o que reforça a necessidade de considerar as particularidades ecológicas antes de propor conclusões generalizadas, especialmente em agrupamentos com alta dispersão.

A resposta dos FA aos impactos ambientais também apresentou variação conforme o tipo de sistema aquático analisado (Figura 14). Em sistemas como os reservatórios, que concentram o maior número de medições (Figura 7) e uma das maiores diversidades de impactos, foram identificados diferentes compostos como os mais responsivos, a exemplo de n3/n6 (razão entre PUFA ômega e ômega 6), 28:0 e 16:4n1. Já em ambientes marinhos, apesar da diversidade de impactos e de compostos detectados (Figura 14), o número de medições é relativamente baixo. O fato de certos ácidos graxos se destacarem em sistemas específicos não implica, por si só, que sejam passíveis de generalização. Em muitos casos, esse padrão pode refletir respostas bioquímicas pontuais, associadas a condições ambientais locais.

Por outro lado, chama atenção a recorrência do ácido araquidônico (ARA) como o composto mais responsivo em riachos, águas costeiras e áreas alagadas, três sistemas distintos entre si (Figura 14). Esse padrão sugere que o ARA pode desempenhar um papel funcional relevante em contextos submetidos a estresses ambientais diversos, possivelmente por estar envolvido na estruturação de membranas celulares, na mediação de respostas inflamatórias e em ajustes fisiológicos frente a condições adversas (KIM et al., 2021). A repetição desse composto em diferentes sistemas pode indicar sua utilidade como marcador lipídico de sensibilidade ecológica, especialmente quando interpretado sob a luz das características ambientais e biológicas locais.

A força da evidência empírica também variou consideravelmente entre os diferentes tipos de impacto ambiental analisados. Alguns agrupamentos, como metais pesados e aquicultura, concentraram grande número de medições (Figura 7), o que confere maior robustez estatística às estimativas de LRR associadas a esses contextos. No caso dos metais pesados, essa predominância pode estar relacionada à alta recorrência desses poluentes em sistemas aquáticos continentais (MAHBOOB et al., 2019) e à ampla gama de organismos analisados, como peixes, perifíton e zoobentos. Para a aquicultura, a atenção científica se justifica pelo interesse em compreender os efeitos das rações artificiais sobre a qualidade lipídica de peixes selvagens agregados a fazendas marinhas (GONZALEZ-SILVERA et al., 2020). Em contraste, impactos como acidificação, pesca e carga de sedimentos, apresentaram um número substancialmente menor de medições, o que limita o poder de inferência e denota cautela na interpretação dos efeitos observados. No caso da carga de sedimentos, os desafios metodológicos decorrem do caráter intermitente e da dificuldade de padronizar a quantificação desse tipo de impacto (FABRICIUS, 2005). Além disso, esses agrupamentos também estão associados a altas dispersões nas estimativas de LRR (Figuras 8 e 10), o que dificulta a detecção de padrões estatisticamente consistentes, mesmo quando há uma tendência média aparente. Essa variabilidade também pode decorrer de diferenças ecológicas ou metodológicas entre os estudos, como a influência de fatores tróficos, térmicos e analíticos sobre a interpretação dos perfis de FA (WANG et al., 2019).

A distribuição das medições entre as diferentes matrizes biológicas (Fig. 6) também influencia a interpretação dos padrões observados. A predominância de dados oriundos de peixes e seston, que juntos concentram a maior parte das medições na base de dados, confere maior robustez estatística às estimativas de LRR obtidas para esses grupos. Os peixes, em especial, vêm sendo amplamente utilizados em estudos ambientais com FA, tanto por sua maior biomassa disponível para análise quanto pela possibilidade de investigar respostas fisiológicas e metabólicas associadas à digestão, à fermentação intestinal e à modulação de vias lipídicas específicas (SMITH et al., 1996). Além disso, diversos estudos têm destacado o potencial dos peixes como bioindicadores lipídicos em função da sensibilidade de seus perfis de FA a contaminantes, estressores fisiológicos e variações tróficas (OLIVARES-RUBIO; VEGA-LÓPEZ, 2016). Por outro lado, a baixa

representatividade de outras matrizes, como moluscos, corais, crustáceos e zooplâncton, limita a possibilidade de generalizar os resultados obtidos para esses grupos. No caso dos corais, por exemplo, a separação entre tecido do hospedeiro e simbiontes, aliada à necessidade de controlar processos oxidativos durante a extração lipídica, representa uma limitação metodológica relevante (KIM et al., 2021). Já o zooplâncton apresenta desafios associados ao seu pequeno tamanho corporal, fragilidade estrutural e alta variabilidade na composição lipídica em função da dieta e da sazonalidade, o que pode dificultar tanto a obtenção de biomassa suficiente quanto a padronização das análises (KRYLOV et al., 2011). Assim, embora os padrões identificados para peixes e seston sejam mais estatisticamente confiáveis, é importante reconhecer que a resposta dos FA em outros componentes da comunidade aquática permanece pouco explorada.

A Figura 10 destaca um conjunto de FA selecionados com base na sua relevância ecológica, frequência de medição e consistência de resposta aos impactos ambientais. Dentre eles, os PUFA de cadeia longa EPA e DHA merecem atenção especial por estarem associados à produção primária de alta qualidade e por desempenharem funções fisiológicas fundamentais em consumidores aquáticos, como regulação de membranas e desenvolvimento larval. Em estudos experimentais, reduções significativas de EPA foram observadas em condições de contaminação orgânica e eutrofização (HASEGAWA et al., 2020; VREDE et al., 2011), enquanto a concentração de DHA diminuiu em ambientes aquecidos artificialmente (SYVÄRANTA et al., 2011). O ácido araquidônico (ARA), por sua vez, embora também esteja incluído entre os PUFA de cadeia longa, apresentou padrão distinto de resposta, demonstrando redução acentuada em ambientes sujeitos a estresse térmico (SCHULZ et al., 2012) e acúmulo de nutrientes (KAINZ et al., 2008).

Ácidos graxos como o linoleico (LIN) e o oleico foram incluídos por apresentarem resposta significativa e por estarem associados a fontes autotróficas distintas, como cianobactérias e algas verdes. Em riachos tropicais impactados por uso agrícola, observou-se aumento nas concentrações de LIN e ALA, sugerindo maior contribuição autotrófica nos biofilmes (BOËCHAT et al., 2011). Além disso, os autores identificaram a presença elevada de MUFA como o 16:1n7 associada a cianobactérias e diatomáceas, o que reforça o papel funcional desses compostos como indicadores da composição da

base trófica. A classe dos PUFA, considerada de forma agregada, também revelou tendência negativa sob impacto, reforçando a hipótese de que perturbações ambientais reduzem a disponibilidade de FA essenciais na base da cadeia alimentar (FANTA et al., 2020). Por outro lado, o aumento relativo dos SFA em diversos tipos de impacto sugere uma substituição por lipídios estruturais menos vulneráveis à oxidação, o que já foi observado em sistemas contaminados por metais e esgoto doméstico (FERREIRA et al., 2016; RODRIGUES et al., 2021).

A decisão de incluir também classes amplas, como SFA, MUFA e PUFA, reflete a intenção de identificar padrões generalizáveis de resposta, complementando os resultados de FA específicos. Quase todos os compostos representados na Figura 10 apresentaram efeitos estatisticamente significativos, com exceção do EPA, que mostrou elevada dispersão entre os estudos e valores médios próximos de zero. Esse resultado não invalida sua inclusão na figura, dada sua reconhecida importância ecológica, mas reforça a necessidade de cautela ao interpretá-lo como um indicador consistente. Além disso, embora o número de medições associadas a cada um desses compostos seja elevado (variando de 93 a 283), a dispersão ampla das estimativas de efeito sugere que os padrões observados podem estar sujeitos à influência de fatores contextuais, como o tipo de ambiente, o organismo amostrado ou o desenho experimental adotado nos estudos originais. Essas variações devem ser consideradas ao propor o uso desses compostos como marcadores funcionais em estudos ambientais baseados na análise de lipídios. Ainda assim, apesar da alta variabilidade, o valor médio absoluto de LRR obtido neste estudo fornece uma estimativa relevante da direção e da intensidade da resposta média, especialmente quando considerado em conjunto com a frequência de medição e a significância estatística.

A Figura 11 e a Figura 12 sintetizam os resultados dos testes t aplicados às médias de LRR para diferentes sistemas aquáticos e matrizes biológicas, permitindo identificar onde os efeitos ambientais foram estatisticamente mais consistentes. Em ambos os casos, foram selecionadas as cinco categorias com os menores valores de p, ou seja, aquelas cujas médias diferiram de zero com maior nível de confiança estatística. Entre os sistemas, destacam-se os riachos, reservatórios e áreas alagadas, que apresentaram médias

negativas e altamente significativas ($p < 0,001$), sugerindo que esses ambientes respondem de forma mais sensível às perturbações ambientais quanto à composição de ácidos graxos. Da mesma forma, as matrizes biológicas plâncton, perifíton e peixe também exibiram reduções significativas de LRR, o que pode estar relacionado à sua maior exposição ou sensibilidade a alterações na base trófica. O caso do potamoseston é particularmente interessante, pois apresenta um efeito positivo, também significativo ($p < 0,001$), indicando possível acúmulo ou aumento relativo de certos ácidos graxos sob impacto.

As Figuras 13 e 14 ampliam a compreensão dos resultados ao explorar a interação entre sistemas, matrizes biológicas e ácidos graxos individuais, revelando padrões de resposta mais específicos. A Figura 13 mostra o ácido graxo mais significativo em cada combinação sistema–matriz, evidenciando que os compostos mais responsivos variam substancialmente conforme o contexto ecológico. O ácido graxo 18:2n6 (linoleico), se destacou como o composto mais frequentemente afetado, com respostas negativas significativas em diferentes matrizes, incluindo rio - perifíton, marinho - corais e rio - bentos. Por outro lado, respostas positivas e significativas foram registradas em peixes, especialmente nos reservatórios e rios, com destaque para EPA/ARA, 16:0 e 18:1n9c, indicando possíveis efeitos tróficos ou fisiológicos distintos nessas matrizes. Nem todos os efeitos foram estatisticamente significativos — os casos de ARA em áreas alagadas - peixe, 18:2n6 em marinho - corais e 10:0 em rio - potamoseston, o que reforça a ideia de que a sensibilidade lipídica é modulada por múltiplos fatores, como tipo de organismo, natureza do impacto e compartimento ecológico avaliado.

Já a Figura 14, organiza os ácidos graxos mais responsivos por tipo de sistema aquático, permitindo comparar a direção e a variação das respostas lipídicas em diferentes contextos ecológicos. Em áreas alagadas e águas costeiras, todos os valores de LRR foram negativos, sugerindo um padrão relativamente consistente de perda de ácidos graxos sob estresse ambiental. Em contraste, os rios exibiram ampla dispersão de respostas, com LRRs que variam de valores negativos acentuados até respostas positivas, indicando a presença de diferentes compostos afetados em sentidos opostos. Essa diversidade pode refletir tanto a variedade de impactos ambientais registrados nesse tipo de sistema (como

poluição orgânica, térmica e por nutrientes), quanto a presença de múltiplas matrizes biológicas analisadas nesse contexto, como peixes, perifiton e bentos (Figura 13).

O sistema marinho aparece com quatro pontos na Figura 14, todos com valores negativos de LRR, indicando uma tendência consistente de redução nos ácidos graxos mais responsivos. No entanto, um desses efeitos não foi estatisticamente significativo, provavelmente devido à alta dispersão dos dados. Esse padrão se alinha ao que se observa na Figura 13, em que o sistema marinho está representado apenas por corais — uma matriz reconhecidamente difícil para a análise de FA, o que pode contribuir para a variabilidade e limitar a detecção de efeitos significativos. Apesar de ocupar a quarta posição em número total de medições na base de dados (Figura 5), a representação do sistema marinho nas análises mais específicas é limitada, o que sugere a necessidade de mais estudos com outras matrizes nesse ambiente para melhorar a interpretação dos padrões lipídicos sob estresse ambiental.

No caso dos reservatórios, os três pontos representados na Figura 14 correspondem a duas respostas positivas em peixes (associadas aos compostos EPA/ARA e SFA) e uma resposta negativa em plâncton (18PUFA). Essa configuração indica que diferentes matrizes dentro de um mesmo sistema podem responder de forma oposta ao impacto ambiental, o que reforça a importância de analisar as respostas dos FA considerando a matriz biológica e não apenas o sistema como unidade. A frequência relativamente alta de medições em reservatórios (Fig. 5) contribui para a robustez desses padrões.

Riachos e lagos aparecem com apenas um ou dois pontos na Figura 14, o que dificulta qualquer inferência mais segura sobre a consistência dos padrões lipídicos nesses ambientes. Ainda assim, a presença de respostas negativas, mesmo com poucos dados, aponta para possíveis sensibilidades que merecem investigação mais aprofundada. De modo geral, a Figura 14 reforça a importância de considerar o tipo de sistema como uma dimensão analítica essencial para compreender as respostas lipídicas a distúrbios ambientais.

Juntas, as Figuras 13 e 14 oferecem uma visão integrada e ao mesmo tempo detalhada da variação lipídica em diferentes contextos ecológicos, destacando a importância de considerar simultaneamente o tipo de sistema, a matriz biológica e o FA específico. Essa abordagem contribui para uma compreensão mais refinada dos efeitos ambientais e para o aprimoramento do uso de lipídios como ferramentas funcionais em programas de biomonitoramento.

De maneira geral, os resultados desta meta-análise revelam que os FA respondem de forma sensível e ecologicamente informativa aos impactos ambientais em sistemas aquáticos. Apesar da variabilidade observada entre compostos, sistemas e matrizes, foi possível identificar padrões consistentes de redução em FA essenciais, especialmente PUFA de cadeia longa, em ambientes submetidos a estresses antrópicos. Essa tendência, associada à reorganização das fontes lipídicas e à substituição por compostos bacterianos ou mais saturados, aponta para potenciais alterações na qualidade nutricional da base trófica. Embora a heterogeneidade metodológica e ecológica dos estudos analisados imponha limites à generalização de alguns resultados, o conjunto de evidências obtidas demonstra que a análise de perfis lipídicos pode contribuir substancialmente para o entendimento dos efeitos ambientais sobre os ecossistemas aquáticos. O reconhecimento dessas respostas permite avanços tanto no uso dos FA como indicadores funcionais em programas de monitoramento quanto na formulação de estratégias de manejo com enfoque nas alterações promovidas na base da cadeia trófica.

4. DISCUSSÃO GERAL

Esta dissertação combinou duas abordagens analíticas complementares — a modelagem de tópicos e a meta-análise — com o objetivo de compreender como os FA têm sido utilizados em estudos ambientais aquáticos e quais padrões surgem dessa aplicação nesses ecossistemas. Enquanto a modelagem de tópicos permitiu identificar tendências temáticas na literatura científica, elucidando sobre as discussões associadas aos FA nos estudos ecológicos, a meta-análise proporcionou uma avaliação quantitativa das respostas lipídicas frente a diferentes tipos de impacto ambiental, organismos e sistemas aquáticos. A integração dessas duas estratégias oferece uma perspectiva abrangente e crítica sobre o papel dos lipídios como ferramentas ecológicas de monitoramento ambiental.

Os resultados revelam que há uma forte presença temática de termos relacionados à ecologia trófica, metabolismo, fisiologia e saúde ambiental nos artigos analisados, refletindo o uso tradicional dos FA como indicadores da origem da matéria orgânica e da qualidade nutricional da base trófica. No entanto, a meta-análise mostrou que esses compostos também respondem de maneira sistemática a uma ampla gama de distúrbios ambientais, incluindo poluição orgânica, aquecimento, eutrofização e contaminação por metais. Essa responsividade, evidenciada por declínios consistentes em PUFA de cadeia longa (como EPA, DHA e ARA), sugere que os FA possuem também potencial como indicadores da condição ambiental, especialmente em matrizes como seston, plâncton e perifiton. Esse aspecto, embora presente em alguns dos tópicos identificados na modelagem, ainda ocupa uma posição periférica no conjunto mais estruturante da literatura, indicando uma defasagem entre os potenciais empíricos e as tradições de pesquisa consolidadas.

A visibilidade online, especialmente no contexto do acesso aberto, tem um impacto mensurável e substancial no alcance das publicações científicas. Estudos mostram que artigos disponíveis gratuitamente na internet recebem significativamente mais citações do que aqueles restritos a versões impressas, mesmo quando comparados dentro de uma mesma conferência ou periódico (LAWRENCE, 2001). Essa tendência foi confirmada por análises posteriores que demonstraram que o aumento de impacto ocorre

mesmo quando o depósito dos artigos é mandatário, o que indica um efeito causal da visibilidade online sobre a disseminação do conhecimento (GARGOURI et al., 2010). Esses resultados reforçam a hipótese de que a produção científica digital tende a favorecer determinados temas mais acessíveis ou populares, enquanto outros, apesar de empiricamente relevantes, permanecem sub-representados no discurso científico dominante.

A articulação entre os dois blocos analíticos revela convergências e desvios entre os padrões empíricos observados e os temas mais recorrentes na literatura. Compostos como EPA e DHA, tradicionalmente associados à qualidade nutricional da base trófica, aparecem com destaque em alguns dos tópicos estruturantes identificados pela modelagem, especialmente em contextos de metabolismo, fisiologia e aquicultura (VREDE et al., 2011; HASEGAWA et al., 2020). Na meta-análise, no entanto, ambos apresentaram respostas variáveis e, no caso do EPA, ausência de significância estatística, sugerindo alta heterogeneidade entre os estudos. Por outro lado, compostos como o ARA, que exibiram respostas negativas significativas em múltiplos sistemas aquáticos, não se destacaram nos tópicos mais frequentes da literatura, indicando uma possível sub-representação discursiva frente à sua relevância ecológica observada nos dados. Essa comparação direta entre o que é mais frequentemente investigado e o que se mostra mais responsivo pode ajudar a orientar futuras agendas de pesquisa, alinhando as perguntas formuladas na literatura às evidências acumuladas em análises quantitativas.

Embora cada abordagem adotada nesta dissertação envolva limitações próprias — como a simplificação semântica na modelagem de tópicos ou a heterogeneidade metodológica entre os estudos incluídos na meta-análise —, a combinação entre elas amplia a capacidade de interpretar os padrões emergentes. Ao mesmo tempo em que os tópicos apontam para temas consolidados e recorrentes, a síntese quantitativa mostra nuances, exceções e variabilidade dentro dos agrupamentos convencionais. Essa leitura cruzada permite identificar lacunas na literatura, alinhar potenciais empíricos a novos usos aplicados e propor caminhos para o fortalecimento dos lipídios como ferramentas de diagnóstico ecológico.

A combinação entre modelagem de tópicos e meta-análise contribuiu para revelar não apenas os compostos mais responsivos aos impactos ambientais, mas também os temas que vêm sendo priorizados na literatura. Embora cada abordagem envolva limitações próprias — como a simplificação semântica nos tópicos ou a heterogeneidade entre os estudos da meta-análise —, sua integração permitiu uma leitura mais abrangente dos padrões atuais e das lacunas existentes. Ao cruzar discussões científicas com evidências quantitativas, esta dissertação fornece um panorama mais completo do uso dos FA na ecologia aquática e aponta caminhos para investigações futuras mais alinhadas entre prática e teoria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo compreender de que forma os FA vêm sendo utilizados em estudos ecológicos e ambientais, e quais padrões de resposta essas moléculas apresentam diante de diferentes tipos de impacto em sistemas aquáticos. Para isso, foram combinadas duas abordagens complementares: a modelagem de tópicos, aplicada ao corpo textual de artigos científicos, e uma meta-análise quantitativa baseada em dados primários de estudos experimentais e observacionais.

Os resultados revelaram que os FA são amplamente utilizados como marcadores tróficos e fisiológicos, especialmente em contextos ligados à nutrição de consumidores aquáticos, metabolismo lipídico e aquicultura. No entanto, a meta-análise mostrou que esses compostos também respondem de forma sistemática a pressões ambientais, com destaque para a redução recorrente de PUFA de cadeia longa em matrizes como seston, plâncton e perifíton. Compostos como ARA, 18:2n6 e EPA/ARA se mostraram particularmente sensíveis em contextos de estresse, reforçando sua utilidade como marcadores bioquímicos de alteração ambiental.

A principal contribuição deste trabalho está na identificação de padrões de resposta lipídica que funcionam como impressões digitais ("*fingerprints*") de impactos antrópicos. Essa evidência amplia o escopo funcional dos FA, não apenas como indicadores da qualidade da base trófica, mas como ferramentas moleculares capazes de

distinguir tipos de distúrbio ambiental em diferentes sistemas e matrizes. Além disso, a integração entre tendências temáticas da literatura e padrões ecológicos medidos contribui para aproximar o discurso científico dos dados empíricos, oferecendo uma leitura mais crítica sobre o campo.

Como qualquer síntese baseada em dados secundários, este estudo está sujeito a limitações, especialmente no que se refere à heterogeneidade dos métodos analíticos, à concentração de medições em algumas matrizes (como peixe e seston) e à baixa representatividade de certos sistemas e impactos. Ainda assim, a consistência dos padrões observados entre diferentes agrupamentos sugere que a abordagem proposta é robusta e replicável.

O conjunto de resultados aqui apresentado pode contribuir para o avanço do uso de FA em programas de biomonitoramento, além de abrir caminhos para pesquisas voltadas à caracterização molecular de estressores ambientais. Estudos futuros podem explorar com maior profundidade as respostas lipídicas em organismos pouco representados, bem como testar experimentalmente o valor diagnóstico de perfis lipídicos específicos em condições controladas. Ao propor uma síntese entre estrutura discursiva e evidência ecológica, esta dissertação reforça o potencial dos FA como ferramentas sensíveis, versáteis e informativas no estudo dos impactos ambientais sobre ecossistemas aquáticos.

6. REFERÊNCIAS

- AHIGREN, G. et al. Fatty acid content of some freshwater fish in lakes of different trophic levels—a bottom-up effect?. *Ecology of Freshwater Fish*, v. 5, n. 1, p. 15-27, 1996.
- AHLGREN, Gunnel; VREDE, Tobias; GOEDKOP, Willem. Fatty acid ratios in freshwater fish, zooplankton and zoobenthos—are there specific optima?. **Lipids in aquatic ecosystems**, p. 147-178, 2009.
- ALIYU, Muhammad Bello. Efficiency of Boolean search strings for Information retrieval. **American Journal of Engineering Research**, v. 6, n. 11, p. 216-222, 2017.
- ARAI, Takaomi; AMALINA, Razikin; BACHOK, Zainudin. Diverse feeding ecology and habitat use in coral reef fishes in the Malaysian South China Sea, as revealed by liver fatty acid composition. **Oceanological and Hydrobiological Studies**, v. 44, n. 1, p. 120-126, 2015.
- Arts, M. T., Brett, M. T. & Kainz, M. J. 2009: *Lipids in aquatic ecosystems*. **Springer**, New York.
- AZEROUAL, Otmane et al. Quality of research information in RIS databases: A multidimensional approach. In: **International Conference on Business Information Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 337-349.
- BECKER, Claes; BOERSMA, Maarten. Resource quality effects on life histories of *Daphnia*. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 2, p. 700-706, 2003.
- BÉLANGER, Amélie et al. Apparent digestibility of macronutrients and fatty acids from microalgae (*Schizochytrium* sp.) fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): A potential candidate for fish oil substitution. **Animals**, v. 11, n. 2, p. 456, 2021.
- BERG, J. M., TYMOCZKO, J. L., GATTO-JR., G. J. & STRYER, L. 2019: **Biochemistry**. 9th edn. W.H. Freeman, New York.

BERGÉ, Jean-Pascal; BARNATHAN, Gilles. Fatty acids from lipids of marine organisms: molecular biodiversity, roles as biomarkers, biologically active compounds, and economical aspects. **Marine biotechnology I**, p. 49-125, 2005.

BOËCHAT, I. G. et al. Fatty acids reveal aquaculture and drought effects on a large tropical reservoir. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142660, 2021.

BOËCHAT, I. G. et al. Land-use impacts on fatty acid profiles of suspended particulate organic matter along a larger tropical river. **Science of the Total Environment**, v. 482, p. 62-70, 2014.

BOËCHAT, Iola G. et al. Agricultural land-use affects the nutritional quality of stream microbial communities. **FEMS microbiology ecology**, v. 77, n. 3, p. 568-576, 2011.

Boëchat, I. G., Weithoff, G., Krüger, A., Gücker, B. & Adrian, R. 2007: A biochemical explanation for the success of mixotrophy in the flagellate *Ochromonas* sp. **Limnology and Oceanography** 52, 1624–1632. Doi: 10.4319/lo.2007.52.4.1624

BOËCHAT, Iola G.; ADRIAN, Rita. Evidence for biochemical limitation of population growth and reproduction of the rotifer *Keratella quadrata* fed with freshwater protists. **Journal of plankton research**, v. 28, n. 11, p. 1027-1038, 2006.

BOËCHAT, Iola G.; GIANI, Alessandra. Seasonality affects diel cycles of seston biochemical composition in a tropical reservoir. **Journal of plankton research**, v. 30, n. 12, p. 1417-1430, 2008.

BOËCHAT, Iola G.; SCHURAN, Sebastian; ADRIAN, Rita. Supplementation of the protist *Chilomonas paramecium* with a highly unsaturated fatty acid enhances its nutritional quality for the rotifer *Keratella quadrata*. **Journal of plankton research**, v. 27, n. 7, p. 663-670, 2005.

BOERSMA, Maarten; SCHÖPS, Claudia; MCCAULEY, Edward. Nutritional quality of seston for the freshwater herbivore *Daphnia galeata* × *hyalina*: biochemical versus mineral limitations. **Oecologia**, v. 129, p. 342-348, 2001.

BOUCHET-VALAT, Milan; BOUCHET-VALAT, Maintainer Milan. Package 'SnowballC'. **R package version** 0.7. 0, 2020.

BOURAOUI, F. & GRIZZETTI, B. 2011: Long term change of nutrient concentrations of rivers discharging in European seas. *Science of the Total Environment* 409(23), 4899–4916. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.08.015.

BOYD, C. E., MCNEVIN, A. A. & DAVIS, R. P. 2022: The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. **Food Security** 14, 805–827. Doi: 10.1007/s12571-021-01246-9.

BORISOVA, E. V., MAKHUTOVA, O. N., GLADYSHEV, M. I. & SUSHCHIK, N. N. 2016: Fluxes of biomass and essential polyunsaturated fatty acids from water to land via chironomid emergence from a mountain lake. **Contemporary Problems of Ecology** 9, 446–457. Doi: 10.1134/S199542551604003X.

BRETT, Michael T.; MÜLLER-NAVARRA, Dörthe C.; PERSSON, Jonas. Crustacean zooplankton fatty acid composition. **Lipids in aquatic ecosystems**, p. 115-146, 2009.

BRETT, Michael; MÜLLER-NAVARRA, Dörthe. The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic foodweb processes. **Freshwater biology**, v. 38, n. 3, p. 483-499, 1997.

BREWSTER, Jasmine D. et al. Ecological niche of coastal Beaufort Sea fishes defined by stable isotopes and fatty acids. **Marine Ecology Progress Series**, v. 559, p. 159-173, 2016.

BUKOLA, Dawodu et al. Consequences of anthropogenic activities on fish and the aquatic environment. **Poultry, Fisheries & Wildlife Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1-12, 2015.

BURNS, Carolyn W.; BRETT, Michael T.; SCHALLENBERG, Marc. A comparison of the trophic transfer of fatty acids in freshwater plankton by cladocerans and calanoid copepods. **Freshwater Biology**, v. 56, n. 5, p. 889-903, 2011.

CALDER, P. C. 2018: Very long-chain n-3 fatty acids and human health: fact, fiction and the future. **Proceedings of the Nutrition Society** 77, 52–72. Doi: 10.1017/S0029665117003950.

CARBONERA, Fabiana et al. Distinguishing wild and farm-raised freshwater fish through fatty acid composition: Application of statistical tools. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 116, n. 10, p. 1363-1371, 2014.

CASHMAN, Matthew J.; WEHR, John D.; TRUHN, Kam. Elevated light and nutrients alter the nutritional quality of stream periphyton. **Freshwater Biology**, v. 58, n. 7, p. 1447-1457, 2013.

CASTRO GONZÁLEZ, María Isabel; MAAFS RODRÍGUEZ, Ana Gabriela; GALINDO GÓMEZ, Carlos. Fatty acids in different edible fish species from Mexico. **Revista de Biología Tropical**, v. 61, n. 4, p. 1981-1998, 2013.

CHRISTEN, Felix et al. Thermal tolerance and fish heart integrity: fatty acids profiles as predictors of species resilience. **Conservation Physiology**, v. 8, n. 1, p. coaa108, 2020.

COLOMBO, Stefanie M. et al. A fundamental dichotomy in long-chain polyunsaturated fatty acid abundance between and within marine and terrestrial ecosystems. **Environmental Reviews**, v. 25, n. 2, p. 163-174, 2017.

COX, Kieran et al. Sound the alarm: A meta-analysis on the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology. **Global Change Biology**, v. 24, n. 7, p. 3105-3116, 2018.

DAI, Huancheng et al. Research on the Characteristics of Heavy Metal Pollution in Lake and Reservoir Sediments in China Based on Meta-Analysis. **Sustainability**, v. 17, n. 12, p. 5489, 2023.

DE LOS RÍOS, Carolina; WATSON, James EM; BUTT, Nathalie. Persistence of methodological, taxonomical, and geographical bias in assessments of species' vulnerability to climate change: A review. **Global Ecology and Conservation**, v. 15, p. e00412, 2018.

DEMOTT, WILLIAM; MÜLLER-NAVARRA, DÖRTHE. The importance of highly unsaturated fatty acids in zooplankton nutrition: evidence from experiments with *Daphnia*, a cyanobacterium and lipid emulsions. **Freshwater Biology**, v. 38, n. 3, p. 649-664, 1997.

DESVILETTES, Christian; BEC, Alexandre. Formation and transfer of fatty acids in aquatic microbial food webs: role of heterotrophic protists. In: **Lipids in aquatic ecosystems**. New York, NY: Springer New York, 2009. p. 25-42.

DÍAZ-GIL, Carlos et al. Ocean acidification increases fatty acids levels of larval fish. **Biology Letters**, v. 11, n. 7, p. 20150331, 2015.

DIRAMAN, Harun; DIBEKLIOGLU, Hamdi. Chemometric characterization and classification of selected freshwater and marine fishes from Turkey based on their fatty acid profiles. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 86, n. 3, p. 235-246, 2009.

DRERUP, Samuel A.; VIS, Morgan L. Responses of stream biofilm phospholipid fatty acid profiles to acid mine drainage impairment and remediation. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 227, p. 1-10, 2016.

DROKIN, Sergey I. Phospholipid distribution and fatty acid composition of phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine in sperm of some freshwater and marine species of fish. **Aquatic Living Resources**, v. 6, n. 1, p. 49-56, 1993.

EBM, N., GUO, F., BRETT, M. T. BUNN, S. E. & KAINZ, M. J. 2021: Polyunsaturated fatty acids in fish tissues more closely resemble algal than terrestrial diet sources. **Hydrobiologia** 848, 371–383. Doi: 10.1007/s10750-020-04445-1.

FEINERER, Ingo; HORNIK, Kurt; MEYER, David. Text mining infrastructure in R. **Journal of statistical software**, v. 25, p. 1-54, 2008

FERNANDEZ-JOVER, Damian et al. Changes in body condition and fatty acid composition of wild Mediterranean horse mackerel (*Trachurus mediterraneus*, Steindachner, 1868) associated to sea cage fish farms. **Marine Environmental Research**, v. 63, n. 1, p. 1-18, 2007.

FLORES, Pedro A. et al. Fatty acid extraction from sewage sludge using a porous polyethylene sorbent obtained from agricultural covers. **Waste Management**, v. 78, p. 532-540, 2018.

FOKINA, N. N. et al. Fatty Acids Distribution in Seston, Tissues, and Faecal Pellets of Blue Mussels *Mytilus edulis* L. In: **Doklady Biochemistry and Biophysics**. Pleiades Publishing, 2020. p. 311-318

FOLEY, Carolyn J. et al. A meta-analysis of the effects of exposure to microplastics on fish and aquatic invertebrates. **Science of the total environment**, v. 631, p. 550-559, 2018.

FOLEY, Jonathan A. et al. Global consequences of land use. **science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

GALLOWAY, A. W. E. & BUDGE, S. M. 2020: The critical importance of experimentation in biomarker-based trophic ecology. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 375(1804), 20190638. Doi: 10.1098/rstb.2019.0638.

GAO, Qin-Feng et al. Stable isotope and fatty acid evidence for uptake of organic waste by green-lipped mussels *Perna viridis* in a polyculture fish farm system. **Marine Ecology Progress Series**, v. 317, p. 273-283, 2006.

GARGOURI, Yassine et al. Self-selected or mandated, open access increases citation impact for higher quality research. **PloS one**, v. 5, n. 10, p. e13636, 2010.

GOEDKOOOP et al. Fatty acid biomarkers show dietary differences between dominant chironomid taxa in Lake Erken. **Freshwater Biology**, v. 40, n. 1, p. 135-143, 1998.

GOEDKOOOP, Willem; PETTERSSON, Kurt. Seasonal changes in sediment phosphorus forms in relation to sedimentation and benthic bacterial biomass in Lake Erken. **Hydrobiologia**, v. 431, n. 1, p. 41-50, 2000.

GOMES, Aline D. et al. Fatty acid composition of tropical fish depends on reservoir trophic status and fish feeding habit. **Lipids**, v. 51, n. 10, p. 1193-1206, 2016.

GOMES, Aline Dal'Olio et al. Eutrophication effects on fatty acid profiles of seston and omnivorous fish in tropical reservoirs. **Science of The Total Environment**, v. 781, p. 146649, 2021.

GONZALEZ-SILVERA, Daniel et al. Influence of aquaculture waste on fatty acid profiles and gonad maturation of wild fish aggregations at fish farms. **Marine environmental research**, v. 156, p. 104902, 2020.

GRAMES, Eliza M. et al. An automated approach to identifying search terms for systematic reviews using keyword co-occurrence networks. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 10, n. 10, p. 1645-1654, 2019.

GRELA, Eugeniusz R. et al. Content of nutrients and minerals, and fatty acid profile in some fish flesh depending on fishing period. **Zywnosc Nauka Technologia Jakosc (Poland)**, 2010.

GRIFFITHS, T. L. & STEYVERS, M. 2004: Finding scientific topics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101, 5228–5235. Doi: 10.1073/pnas.0307752101.

GRÜN, Bettina; HORNIK, Kurt. topicmodels: An R package for fitting topic models. **Journal of statistical software**, v. 40, p. 1-30, 2011.

GUECKER, Bjoern; BOECHAT, Iola G.; GIANI, Alessandra. Impacts of agricultural land use on ecosystem structure and whole-stream metabolism of tropical Cerrado streams. **Freshwater Biology**, v. 54, n. 10, p. 2069-2085, 2009.

GUEST, M. A. et al. Trophic effects of fishing southern rock lobster *Jasus edwardsii* shown by combined fatty acid and stable isotope analyses. **Marine Ecology Progress Series**, v. 388, p. 169-184, 2009.

GULATI, RAMESH; DEMOTT, WILLIAM. The role of food quality for zooplankton: remarks on the state-of-the-art, perspectives and priorities. **Freshwater Biology**, v. 38, n. 3, p. 753-768, 1997.

GUNASEKERA, Rasanthi M.; DE SILVA, Sena S.; INGRAM, Brett A. Early ontogeny-related changes of the fatty acid composition in the Percichthyid fishes trout cod, *Maccullochella macquariensis* and Murray cod, *M. peelii peelii*. **Aquatic Living Resources**, v. 12, n. 3, p. 219-227, 1999.

GUO, Ganlin et al. Fatty acid composition of plankton and bighead carp (*Aristichthys nobilis*) in freshwater ponds. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 36, n. 2, p. 209-215, 2008.

GUREVITCH, Jessica et al. Meta-analysis and the science of research synthesis. **Nature**, v. 555, n. 7695, p. 175-182, 2018.

HADDAWAY, N. R., PAGE, M. J., PRITCHARD, C. C. & McGuinness, L. A. 2022: PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. **Campbell Systematic Reviews** 18, e1230. Doi: 10.1002/cl2.1230.

HAHN, Meike Anika; VON ELERT, Eric. The impact of diel vertical migration on fatty acid patterns and allocation in *Daphnia magna*. **PeerJ**, v. 8, p. e8809, 2020.

HÅKANSON, Lars. On the relationship between lake trophic level and lake sediments. **Water research**, v. 18, n. 3, p. 303-314, 1984.

HARTWICH, Melanie; MARTIN-CREUZBURG, Dominik; WACKER, Alexander. Seasonal changes in the accumulation of polyunsaturated fatty acids in zooplankton. **Journal of Plankton Research**, v. 35, n. 1, p. 121-134, 2013.

HEDGES, Larry V.; GUREVITCH, Jessica; CURTIS, Peter S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. **Ecology**, v. 80, n. 4, p. 1150-1156, 1999.

HESSEN, Dag O.; LEU, E. V. A. Trophic transfer and trophic modification of fatty acids in high Arctic lakes. **Freshwater Biology**, v. 51, n. 11, p. 1987-1998, 2006.

HILL, Walter R.; RINCHARD, Jacques; CZESNY, Sergiusz. Light, nutrients and the fatty acid composition of stream periphyton. **Freshwater Biology**, v. 56, n. 9, p. 1825-1836, 2011.

HIRAVE, P., NELSON, D. B., GLENDELL, M. & ALEWELL, C. 2023: Land-use-based freshwater sediment source fingerprinting using hydrogen isotope compositions of long-chain fatty acids. **Science of the Total Environment** 875, 162638. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162638.

HONEYFIELD, Dale C.; MALONEY, Kelly O. Seasonal patterns in stream periphyton fatty acids and community benthic algal composition in six high-quality headwater streams. **Hydrobiologia**, v. 744, n. 1, p. 35-47, 2015.

HUSSAIN, Bilal et al. Influence of habitat degradation on the fatty acid profiles of fish, microalgae, and zoobenthos in a river ecosystem. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 123, p. 24-32, 2019.

IBAÑEZ, E. et al. Determination of β -hydroxy fatty acids in sewage sludge by using selected ion monitoring. **Journal of Chromatography A**, v. 775, n. 1-2, p. 287-293, 1997.

IRISARRI, Jade et al. Fatty acids as tracers of trophic interactions between seston, mussels and biodeposits in a coastal embayment of mussel rafts in the proximity of fish cages. **Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology**, v. 172, p. 105-115, 2014.

IVERSON, Sara J. et al. Quantitative fatty acid signature analysis: a new method of estimating predator diets. **Ecological monographs**, v. 74, n. 2, p. 211-235, 2004.

IVERSON, Sara J. Tracing aquatic food webs using fatty acids: from qualitative indicators to quantitative determination. In: Lipids in aquatic ecosystems. **Springer**, New York, NY, p. 281-308, 2009

IVERSON, Sara J.; FROST, Kathryn J.; LANG, Shelley LC. Fat content and fatty acid composition of forage fish and invertebrates in Prince William Sound, Alaska: factors contributing to among and within species variability. **Marine Ecology Progress Series**, v. 241, p. 161-181, 2002.

JARDÉ, Emilie; MANSUY, Laurence; FAURE, Pierre. Organic markers in the lipidic fraction of sewage sludges. **Water research**, v. 39, n. 7, p. 1215-1232, 2005.

JOHNSEN, Rita Iren. Effects of antibacterial agents on transformation of fatty acids in sediment from a marine fish farm site. **Science of the total environment**, v. 152, n. 2, p. 143-152, 1994.

JÓNASDÓTTIR, Sigrún Huld. Fatty acid profiles and production in marine phytoplankton. **Marine drugs**, v. 17, n. 3, p. 151, 2019.

JU, Se-Jong et al. Lipid accumulation and fatty acid composition during maturation of three pelagic fish species in Lake Baikal. **Journal of Great Lakes Research**, v. 23, n. 3, p. 241-253, 1997.

KAINZ, M., ARTS, M. T. & MAZUMDER, A. 2004: Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels. **Limnology and Oceanography** 49, 1784–1793. Doi: 10.4319/lo.2004.49.5.1784.

KAUR, Navpreet; BARRAICH, Onkar Singh. Impact of industrial effluents on physico-chemical parameters of water and fatty acid profile of fish, *Labeo rohita* (Hamilton), collected from the Ramsar sites of Punjab, India. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-19, 2022.

KHEIRI, Aghakhan; ALIAKBARLU, Javad; TAHMASEBI, Rahele. Antioxidant potential and fatty acid profile of fish fillet: Effects of season and fish species. In: **Veterinary Research Forum**. Faculty of Veterinary Medicine, Urmia University, Urmia, Iran, 2022. p. 91.

KIM, Taihun et al. Modification of fatty acid profile and biosynthetic pathway in symbiotic corals under eutrophication. **Science of the Total Environment**, v. 771, p. 145336, 2021.

KOBAYASHI, Nobusuke et al. Recovery of Higher Fatty Acid from Sewage Sludge by a Thermochemical Treatment-A Prospective. **Kagaku Kogaku Ronbunshu**, v. 39, n. 4, p. 384-390, 2013.

KOCATEPE, Demet; ALTAN, C.; TURAN, Hülya. Comparison of fatty acids, lipid quality index and amino acid profiles of whiting (*Merlangius merlangus euxinus* Nordman, 1840) meat and roe during fishing season in Black Sea. **Ukrainian food journal**, n. 8, Issue 3, p. 470-486, 2019.

- KOUSSOROPLIS, Apostolos-Manuel et al. From aquatic to terrestrial food webs: decrease of the docosahexaenoic acid/linoleic acid ratio. **Lipids**, v. 43, p. 461-466, 2008.
- KRYLOV, A. V. et al. Small lake plankton and its essential polyunsaturated fatty acids content as affected by a colony of the common heron (*Ardea cinerea* L.). **Contemporary Problems of Ecology**, v. 4, p. 42-49, 2011.
- KUMAR, Neeraj et al. Omega-3 fatty acids effectively modulate growth performance, immune response, and disease resistance in fish against multiple stresses. **Aquaculture**, v. 547, p. 737506, 2022.
- KWETEGYEKA, Justus; MPANGO, George; GRAHL-NIELSEN, Otto. Variation in fatty acid composition in muscle and heart tissues among species and populations of tropical fish in Lakes Victoria and Kyoga. **Lipids**, v. 43, p. 1017-1029, 2008.
- LANCAR, I. T. et al. Analysis of hydrocarbons and fatty acids in superficial sediments collected near the El Jadida industrial sewage (Moroccan Atlantic Coastal). **JOURNAL DE CHIMIE PHYSIQUE ET DE PHYSICO-CHIMIE BIOLOGIQUE**, v. 96, n. 3, p. 352-363, 1999.
- LAU, Danny CP et al. Fatty acid composition of consumers in boreal lakes—variation across species, space and time. **Freshwater Biology**, v. 57, n. 1, p. 24-38, 2012.
- LAWRENCE, Steve. Free online availability substantially increases a paper's impact. **Nature**, v. 411, n. 6837, p. 521-521, 2001.
- LICHTI, Deborah A.; RINCHARD, Jacques; KIMMEL, David G. Changes in zooplankton community, and seston and zooplankton fatty acid profiles at the freshwater/saltwater interface of the Chowan River, North Carolina. **PeerJ**, v. 5, p. e3667, 2017.
- LILLIS, David. Use R for data analysis and research. **New Zealand Science Review**, v. 68, n. 2, p. 73-79, 2011.

LITZ, Marisa NC et al. Effects of variable oceanographic conditions on forage fish lipid content and fatty acid composition in the northern California Current. **Marine Ecology Progress Series**, v. 405, p. 71-85, 2010.

LIU, Mengtan; LI, Chaolun; SUN, Song. Seasonal variation in fatty acid composition of seston and the copepod *Calanus sinicus* (Brodsky, 1962) in Jiaozhou Bay and its trophic implications. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, v. 29, n. 6, p. 1164-1173, 2011.

LIU, Xiaoling et al. Effects of organic matter and initial carbon–nitrogen ratio on the bioconversion of volatile fatty acids from sewage sludge. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology**, v. 83, n. 7, p. 1049-1055, 2008.

LUIZ, Osmar J. et al. Trait-based ecology of fishes: A quantitative assessment of literature trends and knowledge gaps using topic modelling. **Fish and Fisheries**, v. 20, n. 6, p. 1100-1110, 2019.

MAAZOUZI, Chafik et al. Midsummer heat wave effects on lacustrine plankton: variation of assemblage structure and fatty acid composition. **Journal of thermal Biology**, v. 33, n. 5, p. 287-296, 2008.

MAECHLER, Martin et al. Package ‘Rmpfr’. 2023.

MAHBOOB, Shahid et al. Impact of water pollution on trophic transfer of fatty acids in fish, microalgae, and zoobenthos in the food web of a freshwater ecosystem. **Biomolecules**, v. 9, n. 6, p. 231, 2019.

MAKHUTOVA, Olesia N. et al. Content of polyunsaturated fatty acids essential for fish nutrition in zoobenthos species. **Freshwater Science**, v. 35, n. 4, p. 1222-1234, 2016.

MARCARELLI, Amy M. et al. Quantity and quality: unifying food web and ecosystem perspectives on the role of resource subsidies in freshwaters. **Ecology**, v. 92, n. 6, p. 1215-1225, 2011.

- MÁRQUEZ-FERNÁNDEZ, P. M. et al. Nutritional value of fatty acids of the Neotropical freshwater fishes *Prochilodus magdalenae*, *Pseudoplatystoma magdaleniatum* and *Ageneiosus pardalis*. **Grasas y Aceites**, v. 71, n. 1, p. e342-e342, 2020.
- MCCALLEN, E., KNOTT, J., NUNEZ-MIR, G., Taylor, B., Jo, I. & Fei, S. 2019: Trends in ecology: Shifts in ecological research themes over the past four decades. **Frontiers in Ecology and the Environment** 17, 109–116. Doi: 10.1002/fee.1993.
- MCFADDEN, I. R., SENDEK, A., BROSSE, M., BACH, P. M., Baity-Jesi, M., Bolliger, J. et al. 2023: Linking human impacts to community processes in terrestrial and freshwater ecosystems. **Ecology Letters** 26, 203–218. Doi: 10.1111/ele.14153.
- MEKONNEN, Mesfin M.; HOEKSTRA, Arjen Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water. **Environmental science & technology**, v. 49, n. 21, p. 12860-12868, 2015.
- MEYERS, Morgan et al. No evidence of altered relationship between diet and consumer fatty acid composition in a natural plankton community under combined climate drivers. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 551, p. 151734, 2022.
- MUHAMAD, Nur Airina; MOHAMAD, Jamaludin. Fatty acids composition of selected Malaysian fishes. **Sains Malaysiana**, v. 41, n. 1, p. 81-94, 2012.
- MÜLLER-NAVARRA, D. C., BRETT, M. T., LISTON, A. M. & Goldman, C. R. 2000: A highly unsaturated fatty acid predicts carbon transfer between primary producers and consumers. **Nature** 403, 74–77. Doi: 10.1038/47469.
- MÜLLER-NAVARRA, Dörthe C. et al. Unsaturated fatty acid content in seston and tropho-dynamic coupling in lakes. **Nature**, v. 427, n. 6969, p. 69-72, 2004.
- MÜLLER-NAVARRA, Dörthe C. Food web paradigms: the biochemical view on trophic interactions. **International Review of Hydrobiology**, v. 93, n. 4-5, p. 489-505, 2008.
- MURAKAMI, Akira et al. ‘What is this corpus about?’: using topic modelling to explore a specialised corpus. **Corpora**, v. 12, n. 2, p. 243-277, 2017.

MURZINA, S. A. et al. Daily Dynamics of Lipids and Fatty Acids and the Activity of Enzymes of Energy and Carbohydrate Metabolism in Young Fish of the Daubed Shanny *Leptoclinus maculatus* (Fries, 1838) at Different Stages of Development in Polar Night Conditions. **Russian Journal of Developmental Biology**, v. 51, p. 125-134, 2020.

NAPOLITANO, Guillermo E. Fatty acids as trophic and chemical markers in freshwater ecosystems. In: Lipids in freshwater ecosystems. New York, NY: **Springer New York**, 1999. p. 21-44.

NICHOLS, David S. et al. Fatty acid composition of Antarctic and temperate fish of commercial interest. **Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry**, v. 107, n. 2, p. 357-363, 1994.

NIKITA, M.; CHANEY, N. Tuning of the Latent Dirichlet allocation Models Parameters [R Package Ldatuning Version 1.0. 2]. **Comprehensive R Archive Network (CRAN)**, 2020.

OLIVARES-RUBIO, Hugo F.; VEGA-LÓPEZ, Armando. Fatty acid metabolism in fish species as a biomarker for environmental monitoring. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 297-312, 2016.

O'MARA, K., VENARSKY, M., STEWART-KOSTER, B., MCGREGOR, G., SCHULZ, C., MARSHALL, J., BUNN, S. E. & KAINZ, M. J. 2022: Trophic transfer of lipids and fatty acids across habitats in tropical river food webs. **Freshwater Biology** 67, 893–911. Doi: 10.1111/fwb.13889.

ÖZPARLAK, Haluk et al. Effect of seasons on fatty acid composition and n-3/n-6 ratios of muscle lipids of some fish species in Apa Dam Lake, Turkey. **Pakistan Journal of Zoology**, v. 45, n. 4, p. 1027-1033, 2013.

PARRISH, Christopher C.; WHITICAR, Michael; PUVANENDRAN, Velmurugu. Is ω 6 docosapentaenoic acid an essential fatty acid during early ontogeny in marine fauna?. **Limnology and Oceanography**, v. 52, n. 1, p. 476-479, 2007.

- PEDRO, Sara et al. Limited effects of changing prey fish communities on food quality for aquatic predators in the eastern Canadian Arctic in terms of essential fatty acids, methylmercury and selenium. **Chemosphere**, v. 214, p. 855-865, 2019.
- PERGA, MARIE-ELODIE et al. Carbon pathways to zooplankton: insights from the combined use of stable isotope and fatty acid biomarkers. **Freshwater Biology**, v. 51, n. 11, p. 2041-2051, 2006.
- PERHAR, Gurbir; ARHONDITSIS, George B.; BRETT, Michael T. Modelling the role of highly unsaturated fatty acids in planktonic food web processes: sensitivity analysis and examination of contemporary hypotheses. **Ecological Informatics**, v. 13, p. 77-98, 2013.
- PERSSON, Jonas et al. Food quantity and quality regulation of trophic transfer between primary producers and a keystone grazer (*Daphnia*) in pelagic freshwater food webs. **Oikos**, v. 116, n. 7, p. 1152-1163, 2007.
- PHLEGER, Charles F.; NICHOLS, Peter D.; VIRTUE, Patti. The lipid, fatty acid and fatty alcohol composition of the myctophid fish *Electrona antarctica*: high level of wax esters and food-chain implications. **Antarctic Science**, v. 9, n. 3, p. 258-265, 1997.
- PICHÉ, Jacinthe et al. Characterization of forage fish and invertebrates in the Northwestern Hawaiian Islands using fatty acid signatures: species and ecological groups. **Marine Ecology progress series**, v. 418, p. 1-15, 2010.
- PAGE, M. J., MCKENZIE, J. E., BOSSUYT, P. M., BOUTRON, I., HOFFMANN, T. C., MULROW, C. D. et al. 2021: The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372, n71. Doi: 10.1136/bmj.n71.
- PILECKY, Matthias et al. Assessment of compound-specific fatty acid $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^2\text{H}$ values to track fish mobility in a small sub-alpine catchment. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 15, p. 11051-11060, 2022.
- PIMM, Stuart L.; LAWTON, John H.; COHEN, Joel E. Food web patterns and their consequences. **Nature**, v. 350, n. 6320, p. 669-674, 1991.

POMMIER, Julien et al. Seston fatty acid composition and copepod RNA: DNA ratio with respect to the underwater light climate in fluvial Lac Saint-Pierre. **Aquatic sciences**, v. 74, p. 539-553, 2012.

QUÉMÉNEUR, Michelle; MARTY, Yanic. Fatty acids and sterols in domestic wastewaters. **Water Research**, v. 28, n. 5, p. 1217-1226, 1994.

QUEMENEUR, Michelle; MARTY, Yanic. Sewage influence in a macrotidal estuary: fatty acid and sterol distributions. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 34, n. 4, p. 347-363, 1992.

R Core Team. 2020: R: A Language and Environment for Statistical Computing (3.6.3) [Computer Software]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

RADNAEVA, Larisa D. et al. Fatty acid composition in the white muscle of Cottoidei fishes of Lake Baikal reflects their habitat depth. **Environmental Biology of Fishes**, v. 100, p. 1623-1641, 2017.

RAVET, Joseph L.; BRETT, Michael T.; ARHONDITSIS, George B. The effects of seston lipids on zooplankton fatty acid composition in Lake Washington, Washington, USA. **Ecology**, v. 91, n. 1, p. 180-190, 2010.

RUDE, Neil P.; TRUSHENSKI, Jesse T.; WHITLEDGE, Gregory W. Fatty acid profiles are biomarkers of fish habitat use in a river-floodplain ecosystem. **Hydrobiologia**, v. 773, p. 63-75, 2016.

SABATER, Sergi et al. Effects of human-driven water stress on river ecosystems: a meta-analysis. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 11462, 2018.

SALIMON, Jumat; RAHMAN, Nurasyikin Abdul. Fatty acids composition of selected farmed and wild freshwater fishes. **Sains Malaysiana**, v. 37, n. 2, p. 149-153, 2008.

SALIOT, A. et al. Evolutionary trends in the lipid biomarker approach for investigating the biogeochemistry of organic matter in the marine environment. **Marine Chemistry**, v. 36, n. 1-4, p. 233-248, 1991.

SAWYER, Jennifer M. et al. A general model of polyunsaturated fatty acid (PUFA) uptake, loss and transformation in freshwater fish. **Ecological Modelling**, v. 323, p. 96-105, 2016.

SCHNURR, Peter J. et al. Peak abundance of fatty acids from intertidal biofilm in relation to the breeding migration of shorebirds. **Frontiers in Marine Science**, v. 7, p. 63, 2020.

SCHNURR, Peter J. et al. Seasonal changes in fatty acid composition of estuarine intertidal biofilm: implications for western sandpiper migration. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 224, p. 94-107, 2019.

SEMENCHENKO, V. P. Assessment of ecological risk in change of content of essential polyunsaturated fatty acids in plankton of lakes during global warming. **Contemporary Problems of Ecology**, v. 5, n. 4, p. 386-390, 2012.

SHAMSUDIN, L. Lipid and fatty acid contents in red tides from tropical fish ponds of the coastal water of South China Sea. **Archives of physiology and biochemistry**, v. 104, n. 1, p. 36-42, 1996.

SHI, Wei et al. Variability in the distribution of lipid biomarkers and their molecular isotopic composition in Altamaha estuarine sediments: implications for the relative contribution of organic matter from various sources. **Organic Geochemistry**, v. 32, n. 4, p. 453-467, 2001.

SHIN, K. H. et al. Dynamics of fatty acids in newly biosynthesized phytoplankton cells and seston during a spring bloom off the west coast of Hokkaido Island, Japan. **Marine Chemistry**, v. 70, n. 4, p. 243-256, 2000.

SILGE, Julia; ROBINSON, David. tidytext: Text mining and analysis using tidy data principles in R. **Journal of Open Source Software**, v. 1, n. 3, p. 37, 2016.

SMITH, T. B.; WAHL, D. H.; MACKIE, R. I. Volatile fatty acids and anaerobic fermentation in temperate piscivorous and omnivorous freshwater fish. **Journal of fish Biology**, v. 48, n. 5, p. 829-841, 1996.

SUÁREZ, María Dolores et al. Discarded fish on the Spanish Mediterranean coast: influence of season on fatty acids profiles. 2021.

SUSHCHIK, N. N. et al. Comparison of fatty acid composition in major lipid classes of the dominant benthic invertebrates of the Yenisei river. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: **Biochemistry and Molecular Biology***, v. 134, n. 1, p. 111-122, 2003.

SUSHCHIK, N. N. et al. Comparison of fatty acid composition in major lipid classes of the dominant benthic invertebrates of the Yenisei river. ***Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology***, v. 134, n. 1, p. 111-122, 2003.

SUSHCHIK, N. N. et al. Content of highly unsaturated fatty acids in fish from rivers of contrasting temperature. ***River Research and Applications***, v. 34, n. 6, p. 565-574, 2018.

SUSHCHIK, Nadezhda N.; RUDCHENKO, Anastasia E.; GLADYSHEV, Michail I. Effect of season and trophic level on fatty acid composition and content of four commercial fish species from Krasnoyarsk Reservoir (Siberia, Russia). ***Fisheries research***, v. 187, p. 178-187, 2017.

TAIPALE, Sami J.; KAINZ, Martin J.; BRETT, Michael T. A low ω -3: ω -6 ratio in *Daphnia* indicates terrestrial resource utilization and poor nutritional condition. ***Journal of Plankton Research***, v. 37, n. 3, p. 596-610, 2015.

TANAMATI, Augusto et al. Fatty acid composition in wild and cultivated pacu and pintado fish. ***European Journal of Lipid Science and Technology***, v. 111, n. 2, p. 183-187, 2009.

TEAM, R. Core. R: a language and environment for statistical computing and graphics. ***Foundation for Statistical Computing***, 2022.

TEAM, R. Development Core. R: A language and environment for statistical computing. (No Title), 2010.

THORP, J. H. & BOWES, R. E. 2017: Carbon sources in riverine food webs: new evidence from amino acid isotope techniques. **Ecosystems** 20, 1029–1041. Doi: 10.1007/s10021-016-0091-y.

TOCHER, Douglas R. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. **Reviews in fisheries science**, v. 11, n. 2, p. 107-184, 2003

TORRES-RUIZ, M., WEHR, J. D. & PERRONE, A. A. 2007: Trophic relations in a stream food web: importance of fatty acids for macroinvertebrate consumers. **Journal of the North American Benthological Society** 26, 509–522.

TORRES-RUIZ, M., WEHR, J. D. & PERRONE, A. A. 2010: Are net-spinning caddisflies what they eat? An investigation using controlled diets and fatty acids. **Journal of the North American Benthological Society** 29, 803–813. Doi: 10.1899/09-162.1.

TWINING, C. W., TAIPALE, S. J., RUESS, L., BEC, A., MARTIN-CREUZBURG, D. & KAINZ, M. J. 2020: Stable isotopes of fatty acids: current and future perspectives for advancing trophic ecology. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** 375, 20190641. Doi: 10.1098/rstb.2019.0641.

VAN BIESEN, Geert; PARRISH, Christopher C. Long-chain monounsaturated fatty acids as biomarkers for the dispersal of organic waste from a fish enclosure. **Marine environmental research**, v. 60, n. 3, p. 375-388, 2005.

VASCONI, Mauro et al. Fatty acid composition of freshwater wild fish in subalpine lakes: a comparative study. **Lipids**, v. 50, n. 3, p. 283-302, 2015.

VOLK, Carol; KIFFNEY, Peter. Comparison of fatty acids and elemental nutrients in periphyton, invertebrates, and cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki*) in conifer and alder streams of western Washington state. **Aquatic Ecology**, v. 46, p. 85-99, 2012.

VOLKMAN, J. K., BARRETT, S. M., BLACKBURN, S. I., MANSOUR, M. P., SIKES, E. L. & GELIN, F. 1998: Microalgal biomarkers: a review of recent research developments. **Organic Geochemistry** 29, 1163–1179. Doi: 10.1016/S0146-6380(98)00062-X.

VORONIN, Viktor P. et al. Lipids and fatty acids in some mesopelagic fish species: General characteristics and peculiarities of adaptive response to deep-water habitat. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 7, p. 949, 2022.

WALKER, Alexander; BRAGLIA, Luca. Package 'openxlsx'. 2018.

WANG, Fuqiang et al. Trophic interactions of mesopelagic fishes in the South China Sea illustrated by stable isotopes and fatty acids. **Frontiers in Marine Science**, v. 5, p. 522, 2019.

WANG, Fuqiang et al. $\delta^{13}\text{C}$ and fatty acid composition of mesopelagic fishes in the South China Sea and their influence factors. **Chemistry and Ecology**, v. 35, n. 9, p. 788-804, 2019.

WANG, Xing et al. Composition and indication of plankton fatty acids under the influence of environmental factors in the Hongfeng Reservoir, Southwest China. **Aquatic Ecology**, v. 56, n. 3, p. 653-666, 2022.

WICKHAM, Hadley et al. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.7. 6. **Computer software**]. [https://CRAN.R-project.org/package= dplyr](https://CRAN.R-project.org/package=dplyr), 2018.

WICKHAM, Hadley; BRYAN, Jennifer. readxl: Read excel files. **R package version**, v. 1, n. 1, p. 785, 2019.

WILLIAMS, Meghan CW et al. Variation in the essential fatty acids EPA and DHA in fillets of fish from the Great Lakes region. **Journal of Great Lakes Research**, v. 43, n. 3, p. 150-160, 2017.

WÜRZBERG, Laura et al. Demersal fishes from the Antarctic shelf and deep sea: A diet study based on fatty acid patterns and gut content analyses. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, n. 19-20, p. 2036-2042, 2011.

XU, Houguo et al. Are fish what they eat? A fatty acid's perspective. **Progress in lipid research**, v. 80, p. 101064, 2020.

ZENEBE, Tadesse; AHLGREN, Gunnel; BOBERG, M. Fatty acid content of some freshwater fish of commercial importance from tropical lakes in the Ethiopian Rift Valley. **Journal of fish biology**, v. 53, n. 5, p. 987-1005, 1998.

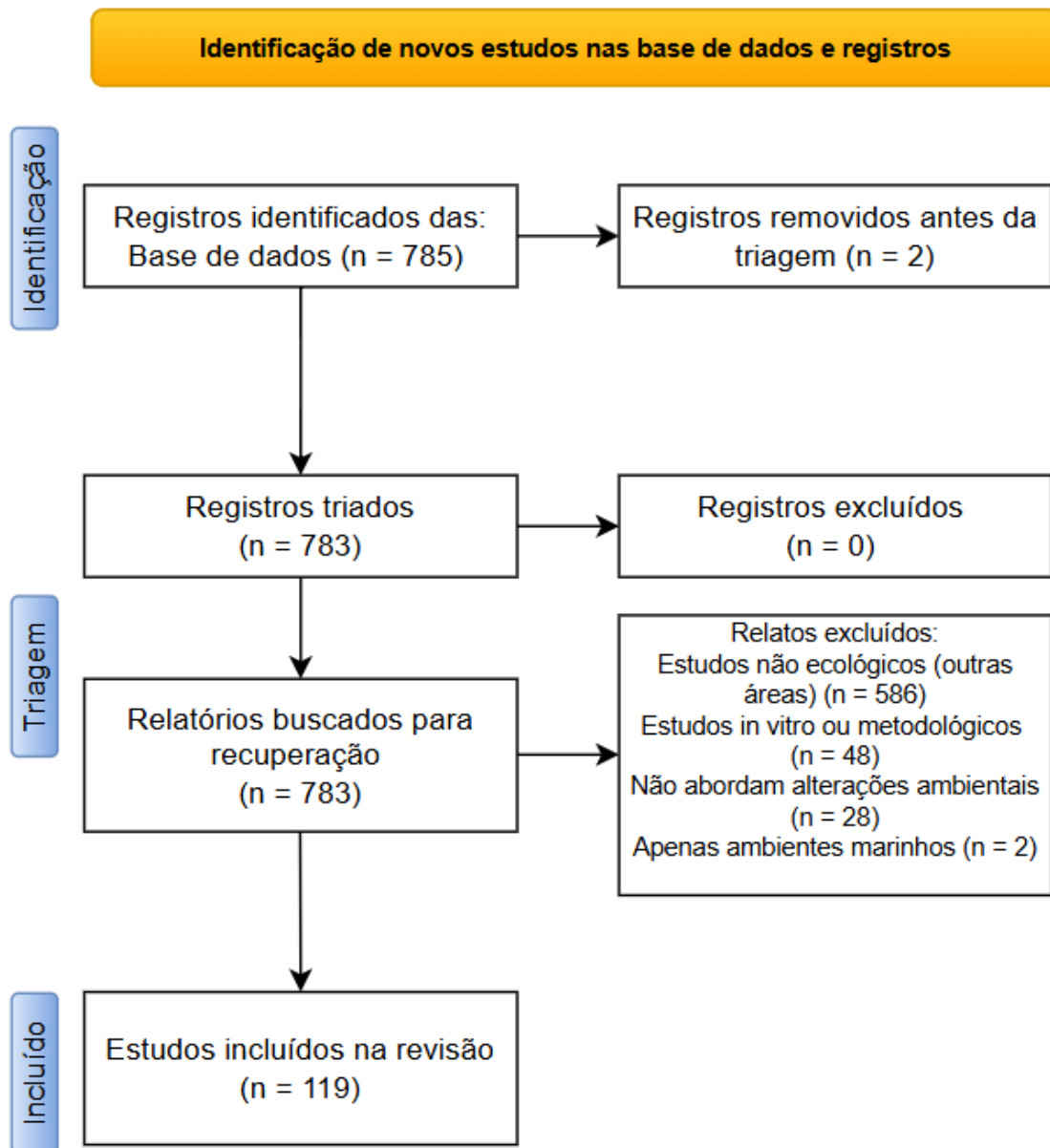
ZHANG, Kexin et al. The correlation study between fatty acids and organochlorine pesticides or $\delta^{15}\text{N}$ values in fish tissues from Dongting Lake, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 182, p. 109358, 2019.

ZHANG, Zisha et al. Medium-chain fatty acids production from carbohydrates-rich wastewater through two-stage yeast biofilm processes without external electron donor addition: Biofilm development and pH impact. **Science of the Total Environment**, v. 828, p. 154428, 2022.

ZHU, Y. F. et al. Filtration characteristics of anaerobic fermented sewage sludge for fatty acids production. **Separation and Purification Technology**, v. 142, p. 8-13, 2015.

ZOTOS, Anastasios; VOUZANIDOU, M. Seasonal changes in composition, fatty acid, cholesterol and mineral content of six highly commercial fish species of Greece. **Food science and technology international**, v. 18, n. 2, p. 139-149, 2012.

ANEXO 1: Diagrama de fluxo da revisão sistemática PRISMA (HADDAWAY et al., 2022), contendo resumos dos números de registros incluídos ou excluídos em cada etapa, e setas indicando o fluxo dos registros desde as fontes até o conjunto final de estudos incluídos



ANEXO 2: Base de dados bibliográfica utilizada na análise de modelagem de tópicos

Disponível em:

https://drive.google.com/file/d/1EoA6ITI3_l38jaNSMbUGcfSJQrPuQpk6/view?usp=drivesdk

ANEXO 3: Planilha com dados brutos utilizada nos cálculos da meta-análise

Disponível em:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1fQA5tSY8VNHHLFlafavQKa0GV44Yz7TE/edit?gid=43669859#gid=43669859>