



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Cemaden
Centro Nacional de Monitoramento
e Alertas de Desastres Naturais

UNIDADE DE PESQUISA DO
MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

CRISTIANE MARINHO DE SOUZA

INFLUÊNCIA DO AUMENTO DA TEMPERATURA SOBRE A
TOXICIDADE DE AGROTÓXICOS PARA A BIOTA
AQUÁTICA: uma revisão sistemática com meta-análise sob a
perspectiva das mudanças climáticas

2021

CRISTIANE MARINHO DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DO AUMENTO DA TEMPERATURA SOBRE A TOXICIDADE DE
AGROTÓXICOS PARA A BIOTA AQUÁTICA: uma revisão sistemática com
meta-análise sob a perspectiva das mudanças climáticas**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE pelo Programa de Pós-Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais Linha de pesquisa: Desastres associados a eventos extremos, secas, estiagens, incêndios florestais e escassez de água

Orientador: Professora Doutora Suzelei Rodgher

São José dos Campos

2021

INFLUÊNCIA DO AUMENTO DA TEMPERATURA SOBRE A TOXICIDADE DE
AGROTÓXICOS PARA A BIOTA AQUÁTICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM
META-ANÁLISE SOB A PERSPECTIVA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

BANCA EXAMINADORA

Professora Doutora Suzelei Rodgher (Orientadora)

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Instituto de Ciência e Tecnologia
Campus de São José dos Campos

Professora Doutora Klécia Gili Massi

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Instituto de Ciência e Tecnologia
Campus de São José dos Campos

Professora Doutora Cleoni dos Santos Carvalho

Universidade Federal de São Carlos
Campus Sorocaba

São José dos Campos, 5 de outubro de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este estudo à minha doce mãe, Sônia Maria de Sousa, na qual devo muito, sempre me incentivando, principalmente nas dificuldades e não foi diferente neste. Ela é a razão do meu viver, por tudo que fez, e não somente por mim, mas por toda a família de um modo geral.

Sou grata pelos seus ensinamentos, valores, pela sua coragem e força, pela sua fé e espiritualidade, sua mansidão, serenidade, calma e tranquilidade, pelo seu querer, seu desbravamento em cuidar de nós todos, assumindo um lar, dando amor à família em todos os momentos. Uma mulher batalhadora e guerreira, sem igual, na qual eu tanto a admiro, mulher de muita fibra, em que eu sempre me inspirei e espero um dia poder ser 1% do que ela é.

Que Deus continue abençoando sempre.

Obrigada por todo o seu amor mamãe. Te Amo!

AGRADECIMENTOS

O mestrado foi um desafio, em boa parte, visto as adaptações ocasionadas pela pandemia do Covid-19, pois sempre tive em mente que nós alunos sempre temos que fazer distintas formas de aprendizado. Pela experiência de aprendizado deste momento, agradeço:

A minha orientadora, a Professora Dra. Suzelei Rodgher, que não me deixou desanimar, sempre me entusiasmou por todo este período, pela importância da temática proposta e contribuição a ser dada. Pelos seus ensinamentos, seu respeito, sua compreensão, seu profissionalismo em me ensinar os caminhos das pedras, pela formidável paciência, pela sua inteligência e sabedoria que muito me agregou e na qual sempre a admirei em muito. Jamais teria conseguido sem você. Muito obrigada por tudo que fez.

As minhas amigas de trabalho que tanto me incentivaram nos estudos e vem contribuindo desde a minha graduação, com os ensinamentos e a compreensão de cada uma: Karla Conceição Pereira, Sylvia Sanae Takishita, Euriluce Guimarães, todas me ajudando a formar um aprendizado permanente e enriquecedor que engrandece cada vez mais.

Aos meus professores da graduação que tanto admiro: Luiz Sérgio Gonçalves Aguiar, Sânzara Hassmann, Mário Sérgio Soléo Scalabrino, Renato Montini, Luiz Gustavo Galhardo Mendes e Eduardo O. Estiliano por proporcionar o estudo de Ictiofauna em iniciação científica no laboratório de ecologia da Fatec Jacareí – SP

Às professoras Dra. Cleoni dos Santos Carvalho e Dra. Klécia Gili Massi pelas suas importantes e imperativas contribuições no Exame Geral de Qualificação. Adicionalmente, agradeço a Profa. A Dra. Klécia Gili pelo importante auxílio na meta-análise, com a compreensão de expandir a temática do estudo para uma enriquecedora abordagem.

A minha mãe que sempre me incentivou e sempre me deu o exemplo de não desistir dos nossos sonhos ainda que eles não sejam fáceis de atingir.

Ao Professor Associado Enner Herenio de Alcântara, coordenador do Programa de Pós-graduação em Desastres Naturais

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Desastres Naturais que ministraram disciplinas: Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes, Dr. José Antonio Marengo Orsini, Dra. Regina Celia dos Santos Avala, Dr. Carlos Afonso Nobre, Dra. Luana Albertani Pampuch e Dr. Silvio Jorge Coelho Simões, juntamente com a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita

Filho”, Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus São José dos Campos, e ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden. Gratidão.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação: Bruno Shiguemitsu Marques Tanaka - Supervisor Técnico de Seção; Carolina Lourenço Rei – Assistente Técnico Administrativo I e Sandra Mara Cordeiro – Assistente Administrativo II, pelos atendimentos, orientações e gentilezas no decorrer do mestrado.

Agradeço a Deus por mais esta oportunidade que me destes.

“A sabedoria é um eflúvio do poder de Deus, uma emanção puríssima da glória do Onipotente, pelo que nada de impuro nela se introduz”. **A Bíblia de Jerusalém**

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
RESUMO	9
<i>ABSTRACT</i>	10
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Desastres naturais e poluição ambiental	16
1.2 Agrotóxicos nos ecossistemas e a questão do aquecimento global	18
2 ARTIGO	23
2.1 Souza, C M; Massi, K G. ; Rodgher, S Influência do Aumento da Temperatura sobre a Toxicidade de Agrotóxicos para a Biota Aquática: uma revisão sistemática com meta-análise sob a perspectiva das mudanças climáticas / <i>Influence of Temperature Increase on the Toxicity of Pesticides to Aquatic Biota: a systematic review with meta-analysis from the perspective of climate change</i>	24
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
COBRADE	Classificação e Codificação Brasileira de Desastres
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EM-DAT	The International Disasters Database
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAO	United Nations Food and Agriculture Organization
GAR	Global Assessment Report
GCC	Mudança Climática Global
GEE	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
USEPA	United States Environmental Protection Agency
DRR	Redução e Riscos de Desastres

SOUZA, CRISTIANE MARINHO DE **Influência do Aumento da Temperatura Sobre a Toxicidade de Agrotóxicos para a Biota Aquática**: uma revisão sistemática com meta-análise sob a perspectiva das mudanças climáticas 2021. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2021.

RESUMO

Desastre é considerado o resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo ser humano sobre um cenário vulnerável, causando perturbação ao funcionamento de uma comunidade envolvendo perdas e danos humanos, materiais, econômicos ou ambientais. Desastre meteorológico, subgrupo temperatura extrema, tipo ondas de calor, é definido por temperaturas extremas com ondas de calor onde as temperaturas fiquem acima de um valor normal esperado do planeta e é a principal previsão das mudanças climáticas globais. No cenário das mudanças globais do clima, degradação do solo, proliferação de espécies nocivas e perdas associadas na produção agrícola é provável que o uso de agrotóxicos se intensifique, bem como o transporte desses produtos químicos ao meio ambiente. Nesse contexto, estudos têm destacado a influência da temperatura nos efeitos tóxicos dos poluentes para a biota aquática. A presente pesquisa, por meio de uma revisão sistemática com meta-análise, levantou, comparou e analisou estudos sobre o aumento da temperatura e na toxicidade de pesticidas para a biota aquática. Foram pesquisados estudos experimentais que avaliaram efeitos do aumento nos valores de temperatura sobre a ação de pesticidas para organismos aquáticos de água doce (microalgas, invertebrados e vertebrados) em termos de alterações nas medidas de aptidão, respostas moleculares e regulação fisiológica. Os agrotóxicos foram classificados como levemente e moderadamente perigosos. As bases de dados disponíveis nos sites da Science Direct, Scielo e Web of Science foram utilizadas para a realização da revisão bibliográfica seguindo o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis 2009). Utilizou-se o pacote R (versão 2.15.1; R Development Core Team 2012) “Metafor” para a realização da meta-análise. Sessenta artigos que avaliaram respostas biológicas de organismos de água doce à exposição isolada e combinada de agroquímicos e temperatura foram revisados e seis estudos preencheram os critérios de inclusão desta pesquisa. Em geral, a meta-análise indicou efeitos mais negativos sobre os organismos na exposição combinada entre agroquímicos e elevados valores de temperatura. As variáveis respostas mais afetadas pelo estressor agrotóxico isolado, elevação de temperatura isolada e a combinação de ambos os estressores foram aptidão e alterações morfológicas. Microalga e invertebrados foram mais sensíveis aos estressores isolados e em associação em comparação aos vertebrados. Esta pesquisa contribuiu com maiores esclarecimentos sobre as interações do aumento de temperatura e a presença de agrotóxicos para a biota aos ecossistemas de água doce, relacionado às mudanças climáticas.

Palavras-chave: desastres, pesticidas, ecossistemas aquáticos, aquecimento.

SOUZA, CRISTIANE MARINHO DE ***Influence of Temperature on the Toxicity of Pesticides to Biota Aquatic: a systematic review with meta-analysis from the perspective of climate change 2021***. Dissertation (Master's degree in Natural Disaster) - São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2021.

ABSTRACT

Disaster is considered the result of adverse events, natural or manmade, in a vulnerable scenario, causing disturbance to the functioning of the community involving human, material, economic or environmental losses and damages. Meteorological disaster, subgroup extreme temperature, like heat waves, is defined by extreme temperatures with heat waves where temperatures are above a normal expected value of the planet is the main prediction of global climate change. In the context of global climate change, soil degradation, proliferation of harmful species and associated losses in agricultural production, it is likely that the use of pesticides will intensify, as well as the transport of these chemicals to the environment.

In this context, studies have highlighted the influence of temperature on the toxic effects of pollutants on aquatic biota. The present research, through a systematic review study with meta-analysis, raised, compared and analyzed studies on the evaluation of temperature increase in pesticide toxicity to aquatic biota. Experimental studies that evaluated the effects of increasing temperature values on the action of pesticides on freshwater aquatic organisms (microalgae, invertebrates and vertebrates) in terms of changes in fitness measures, molecular responses and physiological regulation were investigated. Pesticides were classified as mildly and moderately hazardous. The databases available on the Science Direct, Scielo and Web of Science websites were used to carry out the literature review following the PRISMA protocol (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis 2009). The R package (version 2.15.1; R Development Core Team 2012) "Metafor" was used to carry out meta-analysis. Sixty articles that evaluated biological responses of freshwater organisms to isolated and combined exposure to agrochemicals and temperature were reviewed and six studies met the inclusion criteria for this research. In general, the meta-analysis indicated more negative effects on organisms in the combined exposure between agrochemicals and high temperature values. Aptitude and morphological changes were the responses most affected by the isolated pesticide stressor, isolated temperature rise and the combination of both stressors. Microalgae and invertebrates were more sensitive to isolated and associated stressors compared to vertebrates. This research contributed further clarification on the interactions of temperature increase and the presence of pesticides for biota to freshwater ecosystems, related to climate change.

Keywords: *disasters, ecotoxicology, pesticides, aquatic ecosystems, heating.*

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Defesa Civil (2000) define desastre como resultado de eventos adversos naturais ou provocados pelo ser humano sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos materiais ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. Já os desastres naturais estão relacionados ao impacto de corpos oriundos do espaço sideral sobre a superfície da Terra, aos fenômenos atmosféricos, hidrológicos e/ou meteorológicos que ocorrem na atmosfera terrestre, às forças atuantes nas camadas superficiais e profundas da litosfera, à ruptura do equilíbrio dinâmico entre os biótopos e a biocenose dos ecossistemas e na própria biocenose.

Vivemos em uma sociedade de risco, onde as ameaças se multiplicam à medida que enfrentamos mais tipos de perigos – não apenas os riscos naturais ‘usuais’, mas também o crescente número de perturbações naturais induzidas pelo ser humano. Cada vez mais, pessoas e bens estão expostos ao risco, à medida que a população cresce os assentamentos se expandem, ainda que melhorias sociais e tecnológicas existam, elas não conseguem reduzir as vulnerabilidades de países, regiões ou cidades (BANICA *et al.*, 2020).

Segundo o Global Assessment Report on Disasters Risk Reduction – GAR (2019) a Terra é um sistema de sistemas e o pensamento sistêmico é essencial para criar o futuro consagrado na Agenda 2030. A interação sistêmica entre humanos e o ambiente que consiste nas entrada, saída e estoque de materiais e energia necessárias para sustentar as necessidades fisiológicas de alimento, ar, água e abrigo, bem como outros bens e serviços, nos força a refletir sobre grande número de seres humanos, mudança do clima e dinâmica e conexão global dos mundos biológico e físico, indivíduos e comunidades a gerir o risco para salvaguardar com planejamento e resiliência a todos.

Segundo o The International Disasters Database (EM-DAT, 2020) o número de pessoas afetadas por desastres sofrendo danos e perturbações dos meios de subsistência especialmente na agricultura e os danos econômicos associados está crescendo. Os impactos estão sendo sentidos no aumento da frequência de condições de eventos climáticos extremos: ondas de calor, secas, inundações, tempestades de inverno, furacões e incêndios florestais. Ações de alertas precoces e a organização para respostas aos desastres à natureza estão cada vez mais intrínsecas aos riscos sistêmicos de desastres, sobrepondo a fatores de risco como:

mudança climática, perda da biodiversidade, pobreza, poluição, crescimento populacional de pessoas em área de risco, urbanização descontrolada e, requerendo maior fortalecimento de governança dos riscos de desastres.

Esta base de dados relata que desastres já atingiram aproximadamente 1,23 milhões de vidas, uma média de 60.000 por ano, e afetaram um total de mais de 4 bilhões de pessoas em mais de uma ocasião. As perdas econômicas ficaram em torno de aproximadamente US \$2.97 trilhões em todo o mundo. Esses dados representam um aumento do número de registros dos eventos de desastre em comparação com os vinte anos anteriores.

Entre 1980 e 1999, o EM DAT registrou 4.212 desastres ligados a riscos naturais em todo o mundo que afetaram mais de 3 bilhões de pessoas e as perdas econômicas totalizaram US \$1.63 trilhões. Os registros demonstraram que parte do aumento dos eventos de desastres está relacionada ao clima e, entre 2000 e 2019, houve 510.837 mortes e 3.9 bilhões de pessoas afetadas por desastres. Isso se compara a 3.656 eventos relacionados ao clima que foram responsáveis por 995.330 mortes (47% devido à seca/fome), em relação ao período 1980-1999 (EM-DAT, 2020).

Dentro desta diversidade e complexas situações envolvendo a questão de desastres, a United Nations Office for Disasters Risk Reduction – UNDRR (2020) apresenta através de países como Bangladesh Iraque, Sudão que o conceito de Redução de Riscos de Desastres (DRR) foi ampliado para o abranger o meio ambiente e desafios climáticos, econômicos, sociais e políticos, incluindo conflito, fragilidade ambiental e mudança climática, convulsão política, deslocamento humano, crises econômicas e saúde.

O Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2003) apresenta a análise de dez eventos incidentes no país e suas causas e intensidade que possam contribuir para a construção de uma cultura de proteção civil a distintos danos suportados pelo país, ocorrentes e recorrentes, consequentes de fenômenos globais e regionais, tais como: estiagem e seca; inundação brusca e alagamento; inundação gradual; vendaval e/ou ciclone; tornado; granizo; geada; incêndio florestal; movimento de massa; erosão fluvial; erosão linear e erosão marinha. A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2016), desenvolvida pela Defesa Civil Nacional e considerada referência para uniformizar a base de dados de desastres ocorridos no Brasil, classifica desastres naturais em cinco grupos: geológico, hidrológico, meteorológico, climatológico e biológico. COBRADE (2016) também classifica desastres

oriundos das atividades humanas como desastres tecnológicos: desastres relacionados a substâncias radioativas, produtos perigosos, incêndios urbanos, obras civis e transportes de passageiros e cargas perigosas.

De acordo com o COBRADE (2016), no grupo meteorológico, subgrupo temperaturas extremas, tipo ondas de calor, consta a seguinte definição “é um período prolongado de tempo excessivamente quente e desconfortável, onde as temperaturas ficam acima de um valor normal esperado para aquela região em determinado período do ano e geralmente é adotado um período mínimo de três dias com temperaturas de 5°C acima dos valores máximos médios”.

Nos últimos dois séculos, as mudanças dos valores de temperatura registradas na Terra são sem precedentes e a taxa de mudança no clima é mais rápida agora do que em qualquer outro período nos últimos mil anos (ROSSATI, 2017). Globalmente, com relação às mudanças de temperaturas extremas e ondas de calor, projeta-se que 50 a 80% da superfície terrestre experimentem condições de extremos quentes significativamente mais intensos do que os registrados historicamente (INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE – IPCC, 2019). De acordo com Marengo (2014), no IPCC –AR4 consta um aumento de temperatura global entre 2°C a 4,5°C a mais do que os níveis registrados antes da Era Pré-industrial. Outra estimativa projeta um aumento médio de 3°C, assumindo que níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45% acima da taxa atual. Ainda de acordo com o autor, no terceiro relatório de avaliação do IPCC, publicado em 2001, uma elevação de 1,4°C a 4,8°C para 2100 está descrita.

O aumento da temperatura média pode acarretar em consequências que se manifestam através de eventos em curto prazo como os desastres naturais (furacões, secas e ondas de calor) ou ao longo do tempo através da redução de disponibilidade de água alteração da umidade do solo, perda de produtividade de terras agrícolas, desertificação, perda de biodiversidade, degradação de ecossistemas, aumento da proliferação e transmissão de patógenos em humanos e animais e acidificação dos oceanos (ROSSATI, 2017). Ainda segundo o autor, desde meados do século 19, as atividades humanas aumentaram os gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, metano e óxido nitroso na atmosfera da Terra, que resultaram em aumento da temperatura média. Nesse sentido, lidar com as questões relacionadas à elevação das temperaturas se tornará cada vez mais importante sob a

perspectiva das mudanças climáticas, uma vez que as ondas de calor se tornarão mais intensas, mais frequentes e de maior duração (CHRISTIDIS *et al.*, 2019).

De acordo com Klug *et al.* (2016), mudança climática é definida como uma mudança atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altere a composição da atmosfera global e que seja adicional à variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis de tempo. A mudança climática, como mencionada no registro observacional do clima, ocorre devido às mudanças internas dentro do sistema climático ou na interação de seus componentes, ou por causa de mudanças no forçamento externo por razões naturais ou ainda devido às atividades humanas.

O Panel Intergovernmental of Climate Change - IPCC aponta que as mudanças climáticas poderão reduzir a qualidade da água devido às interações entre altas temperaturas e variações de precipitação (MARENGO, 2014). Impactos poderão ocorrer, por exemplo, pela redução da diluição dos poluentes provenientes do esgoto durante os períodos de estiagem ou elevação da turbidez e contaminação fecal da água, em decorrência do aumento de sedimentos e detritos arrastados por chuvas mais pesadas. Em relação aos impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas terrestres, o aquecimento global irá exacerbar ainda mais os processos de degradação da terra em curso por meio de inundações crescentes, frequência e gravidade da seca, ciclones intensificados e aumento do nível do mar (IPCC, 2019).

Aliado a crise climática, o aumento das atividades antropogênicas devido ao incremento populacional acarretará em elevada liberação de compostos químicos no ambiente. Entre a ampla variedade de contaminantes liberados, os agrotóxicos podem ser encontrados em todos os compartimentos ambientais e devido a sua alta toxicidade representam um risco para os ecossistemas (JARDIM *et al.*, 2009). Agroquímicos são amplamente utilizados nas atividades agrícolas em todo o mundo (FAO, 2019). Segundo Alan Bojanic, Representante da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) no Brasil (2017), em 2050, a população mundial será de 9,8 bilhões, 29% a mais do número atual e o crescimento maior será nos países em desenvolvimento. 70% da população será urbana e os níveis de renda serão maiores do que os atuais. “Para alimentar essa população maior, urbana e rica, a produção de alimentos deverá aumentar em 70%”, assinalou Bojanic que ainda apresentou um cenário futuro: “O Brasil se tornará o principal fornecedor para atender ao aumento da demanda global de importações de commodities

agrícolas”. Neste cenário, a demanda pelo uso de agrotóxicos no Brasil poderá ser intensificada, aumentando a concentração desses compostos nos ecossistemas.

Na perspectiva das mudanças climáticas, é fundamental antecipar os efeitos do aumento da temperatura particularmente em combinação com outros estressores sobre a biota dos ambientes aquáticos a fim de aprimorar estratégias de monitoramento, gestão e proteção ambiental (PEREIRA *et al.*, 2017, SILVA *et al.*, 2018). De acordo com Delnat *et al.* (2019), o efeito do aquecimento global sobre a toxicidade de contaminantes tem se tornado um tema prioritário de pesquisas em biodiversidade e ecotoxicologia. Neste sentido, a Ecotoxicologia estabelece-se nas ciências ambientais como produtora de conhecimento básico e essencial que auxiliará na elaboração de normas e programas para lidar com questões de risco ecotoxicológico ocasionadas pela liberação de agentes químicos nos compartimentos ambientais (AZEVEDO & CHASIN, 2005).

Com o intuito de reunir e discutir dados científicos sobre a influência do aumento da temperatura sobre a toxicidade de agrotóxicos, revisões sistemáticas são consideradas métodos adequados para contribuir para avanços científicos nesta temática. A revisão de dados junto à meta-análise permite uma avaliação ampla sobre os efeitos simultâneos da elevação da temperatura e do potencial tóxico dos agrotóxicos para diferentes organismos, fornecendo resultados que reforçarão a necessidade do monitoramento frente às mudanças climáticas e a poluição ambiental.

A meta-análise é uma técnica estatística utilizada para combinar resultados provenientes de diferentes estudos, e com isto produzir estimativas que resumem o todo, denominadas estimativas metanalíticas (ROEVER, 2020). A área da Ecologia tem necessidade de uma visão ampla sobre os processos que se desenvolvem sobre extensos ambientes levando, naturalmente, a procura por métodos que permitam a síntese de conclusões e dados independentes em análises mais gerais. Assim, a meta-análise tem tido uma crescente utilização nessa área (LUIZ *et al.*, 2002). A meta-análise, projetada para analisar múltiplos estudos independentes, possui alto grau de objetividade por se basear em um conjunto padronizado de procedimentos estatísticos (GORANARNQVIST *et al.*, 1995). Técnicas estatísticas são utilizadas na meta-análise para resumir quantitativamente as informações de diferentes estudos e são altamente aplicadas nas práticas científicas contemporâneas. Para realizar uma meta-análise, um investigador reúne estatísticas resumidas

de cada estudo para calcular um tamanho de efeito, consequente a isso com o objetivo de calcular um tamanho de efeito geral (e sua incerteza) e explorar os fatores que contribuem para a variação nos tamanhos de efeito (PAPPALARDO *et al.*, 2020).

No presente estudo, avaliamos as respostas biológicas de organismos aquáticos de água doce aos efeitos de um estressor químico (agrotóxico) e físico (temperatura), de forma isolada e combinada através de uma abordagem meta-analítica. As seguintes etapas foram realizadas: revisão bibliográfica de artigos científicos, leitura dos resumos e dos artigos em sua totalidade, extração dos dados e aplicação de análises estatísticas.

1.1 Desastres naturais e poluição ambiental

O entendimento do potencial de poluição nos sistemas ambientais devido à ocorrência de desastres naturais é um fator importante para a mitigação de riscos ambientais e para o planejamento de ações contra impactos, pois esses eventos podem ocasionar danos à saúde humana e ambiental (KNAP & RUSYN, 2016). No entanto, desde que há uma grande variação entre os desastres, por tipo e magnitude de evento, ao longo do tempo, e em diferentes localizações geográficas, os impactos podem variar (PEACOCK *et al.*, 2001).

A maior parte das cidades e suas redes industriais e tecnológicas desenvolveram-se próximas aos rios, nos quais oferecem condições de desenvolvimento, como disponibilidade de terras férteis e água doce. Contudo, o custo da localização favorável é o aumento da exposição às enchentes, além de forças motrizes mais amplas, como as mudanças climáticas, que ao alcançarem infraestruturas críticas como aterros sanitários, estação de tratamento de esgoto (ETE) e estação de tratamento de água (ETA) podem ser responsáveis pela poluição do solo, águas superficiais e subterrâneas e, de modo geral, do meio ambiente (ARRIGHI *et al.*, 2018).

As inundações são um dos tipos de desastres e a água proveniente de inundações pode se misturar a detritos, fezes e urina de animais, animais mortos, chorume e outros poluentes e toda a mistura pode ser transportada através do escoamento superficial para casas, rios, lagos, reservatórios e pode também atingir aquíferos e unidades de tratamento de água. Os problemas decorrentes deste processo incluem os setores de saúde (aumento na incidência de doenças), ambiente (piora da qualidade da água) e econômico (aumento nos custos de

tratamento de serviços de suprimento de água potável e de limpeza de espaços públicos) (LONDE *et al.*, 2014).

O desastre natural, ocorrido pelo grande terremoto do leste do Japão em março de 2011, desencadeou ondas de tsunami de até 40,5 m de altura, resultando em vítimas e em danos catastróficos ao longo da costa da região de Tohoku. Estimou-se que vinte milhões de toneladas de destroços tenham sido gerados, entre eles, detritos marinhos, materiais de construção, equipamentos domésticos, veículos e sedimentos do tsunami. Os sedimentos do tsunami ainda continham: solo terrestre, lodo e resíduos sólidos (por exemplo: metal, plástico, tecido, madeira) e outros produtos perigosos analisados posteriormente, entre eles a poeira derivada dos sedimentos do tsunami e metais (MATSUO *et al.*, 2019).

A mobilização de contaminantes (metais e pesticidas organoclorados) em amostras de água e solo foi demonstrada em Houston, no Texas, 2017, após a ocorrência do furacão Harvey com fortes chuvas e inundações (BERA *et al.*, 2019). Segundo os autores, embora o furacão Harvey tenha sido responsável pela redistribuição de muitos contaminantes, o grande volume de chuva provavelmente transportou os contaminantes das áreas terrestres para áreas costeiras da Baía de Gasvelton.

Ondas de calor e temperaturas extremamente altas estão relacionadas com a ocorrência de desastres naturais relacionados com temperaturas extremas (MANUAL DE DESASTRES NATURAIS, 2003; COBRADE, 2016). De acordo com Conti *et al.* (2000), a elevação da temperatura global, vem efetivamente, ocorrendo, mas é indispensável avaliar as causas com base numa investigação abrangente, que leve em conta, não apenas a ação antrópica, representada pela liberação intensa de gases de efeito estufa e presença de material particulado, derrubada das florestas tropicais, superexploração da natureza, e outras práticas predatórias, mas, também, os processos naturais de macroescala, incluindo os da esfera geológica e astronômica.

É consenso que o aumento da temperatura oriunda da mudança climática é uma ameaça global e um desafio para o século 21. Durante as últimas décadas, as emissões de gases de efeito estufa aumentaram notavelmente devido à industrialização global e há tendência prevista para continuar aumentando (GONZÁLEZ-ALCARAZ & VAN GESTEL, 2016).

O aumento da temperatura do planeta é a principal previsão das Mudanças

Climáticas Globais (MARENGO, 2007; HOEGH-GHULDBERG *et al.*, 2018). Prevê-se que as ondas de calor aumentem em frequência, intensidade e duração durante o século XXI. Até o final do século, em cenário de altas emissões de principais gases de efeito estufa (GEE, como monóxido de carbono e metano), as ondas de calor podem se tornar extremamente longas (atingindo mais de 60 dias consecutivos) e frequentes (uma vez a cada dois anos), na Europa, América do Norte, América do Sul, África, Indonésia, Oriente Médio, Sul e Sudeste Asiático e Austrália (IPCC, 2019). Com o resultado das mudanças climáticas, prevê-se um aumento de 3°C na temperatura de sistemas de água doce, incluindo aqueles localizados em regiões tropicais (VAN VLIET *et al.*, 2013).

A mudança climática é um estressor adicional para os ecossistemas naturais, afetando não apenas o valor da temperatura da água e solo como também a biodiversidade (GOMES & JUNEAU, 2015; HOSSAIN *et al.*, 2017). Para lagos e reservatórios, as alterações decorrentes das mudanças climáticas também incluem maiores entradas de poluentes decorrentes do aumento do escoamento superficial devido à intensificação das precipitações (BOXALL *et al.*, 2009; CHAPRA *et al.*, 2017). Contaminação química da água devido ao arraste de poluentes presentes no solo e atmosfera pela ação da chuva e os efeitos nas redes alimentares são outras consequências das atividades humanas decorrentes das mudanças climáticas (TUNDISI, 2013).

Após 2050, o risco de perda de rendimento nas áreas agrícolas aumentará como resultado das mudanças climáticas em combinação com outros fatores e esses riscos aumentarão drasticamente se as temperaturas médias globais aumentarem cerca de 4°C (IPCC, 2019). Neste contexto, é provável que o uso de agrotóxicos aumente como consequência da proliferação das espécies nocivas, extensão da estação de desenvolvimento das pragas agrícolas (MALHI *et al.*, 2021), particularmente em regiões temperadas, com perdas associadas à produção agrícola (BLOOMFIELD *et al.*, 2006; CUCO *et al.*, 2016), acarretando na maior exposição do meio ambiente a esses produtos químicos (DABROWSKI *et al.*, 2002; BENITEZ *et al.*, 2006).

1.2 Agrotóxicos nos ecossistemas e a questão do aquecimento global

Segundo a Embrapa (2003), os agrotóxicos são os produtos e agentes de processos

físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento dos produtos agrícolas. Estudos mostram que menos de 0,1% da quantidade de agrotóxicos aplicados nas lavouras alcançam os organismos alvos, enquanto o restante 99,9% tem potencial para se mover para outros compartimentos ambientais, tais como águas superficiais e subterrâneas, causando efeitos tóxicos para organismos não-alvos. O impacto por agrotóxicos na qualidade da água subterrânea, por exemplo, tem sido assunto relevante e de discussão em todo o mundo (SILVA *et al.*, 2013).

Os países tropicais estão entre os maiores consumidores de agroquímicos no mundo, alguns dos quais com regulamentação e aplicação deficientes, usando compostos que são proibidos na maioria dos países temperados (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016). O Brasil é considerado um produtor global de commodities agrícolas e o maior consumidor de agroquímicos, sendo que, em 2018, 549.280 toneladas de agrotóxicos foram utilizadas no Brasil (DISNER *et al.*, 2020).

A produção de alimentos e de commodities agrícolas, que são afetadas em mais de 30% em sua produção devido às pragas agrícolas, despertam preocupação no cenário mundial, sendo a aplicação de vários tipos de agrotóxicos um dos métodos para o controle desses organismos. Porém o uso excessivo de agrotóxicos acaba sendo prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana devido a seus potenciais efeitos tóxicos. De acordo com a FAO (2021), China foi o maior produtor de pesticidas com um consumo de 1.404.166 toneladas de seus ingredientes ativos, seguido pelo Estados Unidos com consumo de 406.684 toneladas em 2018, Brasil com 221.582t, Argentina com 126.001t, URSS 89.200t, França 82.957t, Itália 76.686t, Japão 67.163t, Colômbia 5.207t, e o Canadá com 5.037t (Singh *et al.*, 2021).

Os agrotóxicos podem afetar todos os compartimentos ambientais, especialmente a litosfera, sendo que sua distribuição pela atmosfera e hidrosfera pode ser influenciada pela temperatura devido à volatilização e deriva dos compostos (OGA *et al.*, 2008). Agrotóxicos lançados no solo se acumulam na cadeia trófica, poluem os sistemas aquáticos de água doce superficiais e subterrâneos e podem ser facilmente transportados pela atmosfera (ANDRÉA, 2010). Em ecossistemas terrestres, por exemplo, maiores taxas de volatilização devido às temperaturas mais elevadas têm sido associadas à distribuição de agrotóxicos na atmosfera e hidrosfera, bem como redistribuição do químico pelos ecossistemas terrestres (DAAM *et al.*, 2019).

A toxicidade dos contaminantes nos sistemas naturais pode ser alterada devido ao aquecimento global. O padrão geral emergente de uma maior toxicidade de muitos agrotóxicos sob elevação da temperatura foi formalizado na “sensibilidade ao tóxico induzida pelo clima”, ou seja, a interação entre a temperatura e agrotóxicos, com um fator considerável para efeitos negativos nos ecossistemas. Conceito que desafia a avaliação de risco de contaminantes em um mundo em aquecimento (DELNAT *et al.*, 2019).

O incremento da produção agrícola global através do uso intenso de agrotóxicos torna necessário um conhecimento amplo de seu impacto na biodiversidade. O uso de pesticidas deve aumentar no âmbito do aquecimento global (KATTWINKEL *et al.*, 2011). Além disso, temperaturas mais elevadas podem incrementar a proliferação de patógenos e seus vetores que resultam na necessidade crescente de aplicação de agrotóxicos para o controle desses organismos (ROSSATI *et al.*, 2017; FAO, 2019).

Vários estudos já indicaram toxicidade de agrotóxicos para organismos aquáticos, tais como inseticida fibronil para a microalga *Raphidocelis subcapitata* (MOREIRA *et al.*, 2019), inseticida malation para os cladóceros *Daphnia pulex* e *Diaphanosoma birgei* (BRAVO-HERNANDÉZ *et al.*, 2014), herbicidas roundup e glifosato para os peixes *Prochilodus lineatus* (MODESTO *et al.*, 2010) e *Danio rerio* (LOPES *et al.*, 2017), e anfíbio *Lithobates catesbeianus* (AMARAL *et al.*, 2018; VASCONCELOS *et al.*, 2017). Entretanto, ainda é necessário ampliar o conhecimento sobre os efeitos tóxicos da ação conjunta entre elevação da temperatura e agrotóxicos sobre a biota dos ambientes naturais mediante ao aquecimento associado às mudanças climáticas.

Segundo o IPCC (2021), com a intensificação do aquecimento global, conjectura-se que diferentes regiões sofram mudanças simultâneas e múltiplas nos fatores climáticos. A mudança climática global é considerada uma grande ameaça à biodiversidade global que colocará muitas espécies em risco. Compreender as respostas das espécies aos efeitos combinados entre mudanças climáticas globais e o aumento do uso de agentes químicos requer uma perspectiva interdisciplinar, combinando abordagens moleculares, fisiológicas e ecológicas (HASENBEIN *et al.*, 2019).

No ambiente natural, os organismos estão expostos simultaneamente às perturbações físicas e químicas. Exposições a temperaturas mais extremas e a agrotóxicos estão se tornando mais frequentes e intensas sob o cenário das mudanças climáticas (DINH *et al.*, 2016). O

aquecimento global, junto a estressores locais oriundos da agricultura, afeta os ecossistemas aquáticos ao influenciar as taxas metabólicas dos organismos, bem como a sensibilidade aos estressores, e todos estes estressores podem ter efeitos interativos, mas determinar como vários estressores interagem é um desafio, especialmente em sistemas complexos onde as interações bióticas levam a efeitos indiretos (ALLEN *et al.*, 2021).

A temperatura é um fator físico que influencia fortemente nos processos fisiológicos dos organismos (ODUM, 2010). As variações de temperatura também afetam a toxicidade dos poluentes nos sistemas ambientais, entretanto as respostas toxicológicas dos organismos diferem porque cada indivíduo tem seu próprio nível de resistência aos poluentes (PEREIRA *et al.*, 2017) e à variação da temperatura (ODUM, 2010). Em termos biológicos, temperaturas elevadas tendem a acelerar o metabolismo dos organismos, afetando suas taxas de respiração, crescimento e desenvolvimento, juntamente com um aumento nas taxas de absorção e excreção de químicos (CATARINA *et al.*, 2018), incluindo a relação entre absorção e a concentração de agentes tóxicos e a interação do tóxico com os sítios de ação nos indivíduos (OGA *et al.*, 2008).

Entretanto, as interações entre temperatura, poluentes e organismos são complexas para prever os efeitos nas populações ou comunidades aquáticas na medida em que a elevação da temperatura também estimula os processos de destoxificação e excreção de certos químicos pelos indivíduos e, dessa maneira, contribuir para redução da toxicidade do agente químico no organismo (SOKOLOVA & LANNING, 2008).

A literatura científica carece de uma compilação de informações sobre efeitos combinados do aumento da temperatura e da presença de agrotóxicos para as espécies dos ecossistemas, constituindo exatamente o foco desta pesquisa. Até o momento, não há revisões sistemáticas com meta-análise publicadas sobre o efeito decorrente da exposição simultânea às elevadas temperaturas e agrotóxicos na biota aquática de água doce no contexto das mudanças climáticas e dos riscos sistêmicos em desastres naturais e tecnológicos associados. Nesta perspectiva, estudos de revisão sistemática com meta-análise representam um modo de reunir e discutir evidências científicas acerca de ação conjunta de estressores ambientais em ambientes aquáticos. Estressores ambientais impactam processos biológicos, modificam as funções dos ecossistemas e diminuem a biodiversidade através de relações complexas como interações sinérgicas ou antagônicas (CARRIER-BELLEAU *et al.*, 2021).

Os resultados e a discussão da presente dissertação foram redigidos no formato de um artigo científico para facilitar a publicação da pesquisa. Como a revista que escolhemos para publicá-lo exige sua redação em inglês, o artigo foi redigido neste idioma e formatado de acordo com a norma da revista científica a que foi submetido.

2 ARTIGO

2.1 Souza, C M; Massi, K G; Rodgher, S. Meta-análise revela respostas negativas para organismos de água doce aos efeitos interativos de pesticidas e aquecimento

Meta-analysis reveals negative responses of freshwater organisms to the interactive effects of pesticides and warming

Revista: Ecotoxicology

Meta-analysis reveals negative responses of freshwater organisms to the interactive effects of pesticides and warming

Cristiane Marinho de Souza ¹, Klécia Gili Massi¹, Suzelei Rodgher¹

¹Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Câmpus de São José dos Campos. Rodovia Presidente Dutra km 137,8, 12.247-004, São José dos Campos, SP, Brazil

Abstract

Among the pollutants present in aquatic bodies are pesticides. In addition, due to climate change and land degradation, harmful species may become more abundant, with consequent losses in agricultural production and, thus, pesticide use is likely to intensify. Temperature variations and thermal extremes caused by climate change may have profound implications for pesticide toxicity in aquatic organisms. Using a meta-analytical approach to the peer-reviewed literature, we assessed the impacts of warming and pesticides in isolation and combination on the biological responses of freshwater biota (microalgae, invertebrates and vertebrates). Meta-analysis of the whole dataset revealed that the fitness measurements and physiological regulation were negatively affected by the combination of pesticides and warming. In contrast, the independent effect of pesticides affected negatively only the fitness measurements, while molecular responses were positively influenced by temperature, and physiological regulation was negatively influenced by temperature increase. Microalgae and invertebrates were the groups most negatively affected by the interaction of pesticides and temperature. Additional studies must consider other biotic and abiotic stressors in freshwater

that can presumably interact with warming and chemicals, to make more exact generalizations about chemical contamination and climatic events.

Keyword: climate change, aquatic biota, pollutant, statistical method

1. Introduction

Extreme events, global warming and environmental pollution are fundamental environmental issues (Woodward et al. 2010; European Environment Agency 2018; Van den Brink et al. 2018). According to the last report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR6 2021), between 2081-2100, the temperature change may remain below 2°C in 2100, in a scenario of low greenhouse gas emissions, and the largest increase projected will be between 3.3 °C to 5.7 °C in the high gas emissions scenario. In this sense, dealing with temperature increases will become increasingly important from the perspective of climate change, as heatwaves may become more intense, more frequent, and of longer duration in Europe, North America, South America, Africa, Indonesia, Middle East, South and Southeast Asia and Australia (IPCC 2021).

In a changing climate with a tendency related to rising air temperature, the water temperature of continental aquatic systems has been increasing as a result of heat exchange with the atmosphere (Vliet et al. 2013; Kędra and Wiejaczka 2018). Climate change can reduce water quality due to the interactions between high temperatures and precipitation variations, reduced dilution of pollutants in sewage discharge during dry periods and increased turbidity, and higher pollutant inputs in periods of intense precipitation (Boxall et al. 2009; Chapra et al. 2017).

Among the pollutants present in aquatic bodies are pesticides. Pesticides are chemicals synthesized to manage a specific range of biological agents (viruses, bacteria, fungi, plants and invertebrates) (Salako et al. 2020). These compounds are classified according to chemical compositions of the active ingredients (e.g., carbamates, pyrethrin, pyrethroids, organochlorine and organophosphorus) and to the risk (slightly, moderately, highly, and extremely dangerous) to human health (WHO 2020). The intense use of pesticides, especially

in a scenario of increasing crop production and global demand for food, is already showing effects on biodiversity and human health (Nicolopoulou-Stamat et al. 2016). The occurrence of pesticides in water bodies is derived from agricultural crop runoff and industrial wastewater, and the pesticide effect on live organisms depends on solubility, half-life, adsorption capacity, and biodegradability of pesticide compounds (Syafudin et al. 2021). In addition, due to climate change and land degradation, harmful species may become more abundant through increased seasonal activity, with consequent losses in agricultural production and, thus, pesticide use is likely to intensify (Bloomfield et al. 2006; Cuco et al. 2016), as well as transport of these chemicals to the environment (Dabrowski et al. 2002; Bailey, 2004; Benitez et al. 2006). According to Tang et al. (2021), 64% of global agricultural land (approximately 24.5 million km²) is endangered by pesticide pollution, and regions of high biodiversity and water limitations, such as watersheds in South Africa, China, India, Australia and Argentina, are at risk of pollution by pesticides.

Temperature variations and thermal extremes caused by climate change may have profound implications for pesticide toxicity to aquatic organisms (Wang et al. 2016; Niinemets et al. 2017; Wang et al. 2019). In this sense, pesticide toxicity may increase or decrease with an increase in temperature value (Larras et al. 2013). Environmental factors associated to climate change can alter the susceptibility of organisms to contaminants, the so-called “climate-induced toxic sensitivity” (Delnat et al. 2019). From another perspective, exposure to chemical agents can increase the susceptibility of biota to climate change, the “sensitivity to toxic-induced climate change” (Noyes and Lema 2015; Delnat et al. 2019). Both possibilities challenge contaminant risk assessment in a warming world (Delnat et al. 2019).

Exposure to more extreme temperatures and pesticides is becoming more frequent and intense under climate change scenarios (Dinh et al. 2016; Silva et al. 2018). Studies have pointed out temperature effects on pesticide toxicity to freshwater species (Lau et al. 2015; De Beeck et al. 2017; Giroux et al. 2019; Li et al. 2020) highlighting the importance of understanding the ecological aspects of interactive effect of these variables. Literature on the impact of climate change and effects of rising temperature on productivity, biogeochemical cycles, cycling processes of persistent organic pollutants, biotic communities and ecosystems (Meyer et al. 1999; Mooij et al. 2005; Paerl and Huisman 2009; Sorte et al. 2013; Wang et al. 2016; Hossain et al. 2016; Ummenhofer and Meehl 2017) of freshwater ecosystems have been reported. One of the few studies that explored the effects of temperature rise on chemical toxicity to freshwater organisms was Wang et al. (2019), where the authors employed acute toxicity endpoints as a response to the toxicity of a total of 13 chemical agents. However, there are no studies that compare and discuss the interactive effects of warming and pesticide exposure for different taxonomic groups of freshwater environments using different biological responses.

Meta-analysis is considered a potent approach for quantitative data synthesis in ecological investigation (Hays et al. 2005) and provides synthesis of the outcomes of research with the same issue (Gurevitch et al. 1992). Using a meta-analytical approach of the peer-reviewed literature, we assessed the impacts and interactions of pesticides and warming on freshwater biological responses. Given that variability in the strength and direction of responses was expected, we classified data according to taxonomic groups (invertebrates, microalgae and vertebrates) in terms of changes in fitness measurements, molecular responses and physiological regulation. Specifically, we aimed to address three questions:

- (i) How do freshwater organisms respond to warming and pesticides in isolation?

- (ii) How do freshwater organisms respond to the combined effects of warming and pesticides?
- (iii) How do warming and pesticides impacts interact?

We expect that pesticide exposure perturbs biological response of freshwater organisms, while elevated association between temperature and pesticides will influence organisms more negatively.

2. Methods

2.1 Data selection and suitability criteria

Searches for peer-reviewed articles in which studies explicitly investigated climate change using either elevated temperature, pesticide pollution, or elevated temperature and pesticide pollution, were carried out using ISI Web of Science [v. 5.8], Science Direct and Scientific Electronic Library Online (SciELO) using the following keywords: agrochemical, pesticide, climatic change, organisms, temperature, toxicity and freshwater. We used the protocol of PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis 2009). We found sixty studies that quantified the biological responses to pesticides and warming.

We did not limit our analysis to any specific timing and locality. Only controlled manipulative experiments were used for analysis. There was a control group, or a treatment assumed by the authors to be non-stressful circumstances for any stressors. The experimental organisms had to be subjected to pesticide pollution alone, elevated temperature alone, or both warming and pesticides. Finally, only studies that reported a measurable biological response were included (the final dataset was comprised of only six studies).

A number of articles included more than one species, response, or treatment level, and

all were included in the analysis if they met the suitability criteria. This ensured that a broad range of responses could be fully explored, despite lessening the independence of the data from that particular study (Gurevitch et al. 1992). To investigate inherent biological variability, records were categorized according to taxonomy (invertebrates, microalgae, and vertebrates: Table S1).

To enable a calculation of effect size, studies that met our initial criteria could only be used if they reported a mean response value, some form of variance (standard deviation, standard error, or confidence interval), and a sample size. Two researchers performed the extraction of data, and any disagreement was decided by discussion.

2.2 Data analysis

Biological responses to warming and pesticides were measured for each experiment to establish the proportional change between the control and treatments, and between the control and interaction between warming and pesticides. Effect size was calculated as means using Cohen's *d* criterion, which is used to describe the standardized mean difference of an effect. This value can be used to compare effects across studies, even when the dependent variables are measured in different ways (Lakens 2013).

Analyses were carried out using the R package "Metafor" (version 2.15.1; R Development Core Team 2012). We selected a weighted random-effects model to estimate a summary effect size. Random-effects analysis assumes that the true effect size differs between experiments. Statistical significance was attributed to each mean effect size by calculating a bias-corrected 95% confidence interval (CI). If the summary effect size did not overlap zero then it was considered to be significantly different. A total heterogeneity statistic (*Q*) was used to confirm that the variation verified was a combination of both true variation (between

studies: Q) and random error (within studies) (Borenstein et al. 2009), using the null hypothesis that observations shared a common effect size.

The categorical moderators used were the different taxonomic groups (invertebrates, microalgae and vertebrates). As response variables, we used fitness measurements, molecular responses and physiological regulation. We also categorized pesticides as slightly and moderately hazardous according to WHO (2020). To formally test for differences between these categories, a test for heterogeneity (QM) was used; this identified total heterogeneity explained by that particular categorical moderator (Gurevitch et al. 1992). A significant QM indicated that there was a difference between the categories. We did not perform analysis with less than three studies. The publication bias in the meta-analyses were assessed by using funnel plots (Borenstein et al. 2009) and this analysis was carried out using the R package “Metafor” (version 2.15.1; R Development Core Team 2012).

3. Results

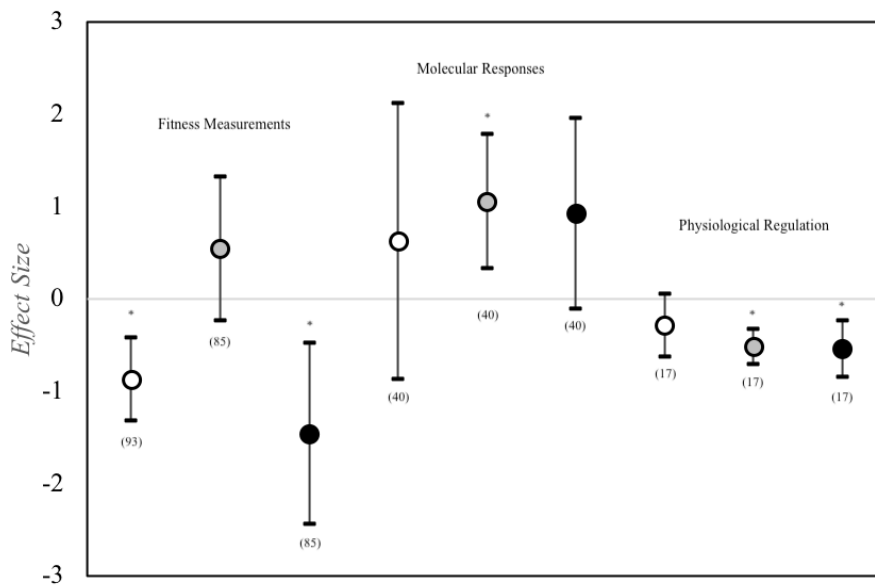
3.1 Overall biological responses

Only six studies met inclusion criteria in this study, representing 151 unique experiments (see Table S1).

Meta-analysis of the whole dataset revealed that the fitness measurements and physiological regulation were negatively affected by the combination of pesticides and warming (Fig. 1A). In contrast, the independent effect of pesticides affected negatively only the fitness measurements, while molecular responses were positively influenced by warming, and physiological regulation was negatively influenced by temperature increase (Fig. 1A). Significant within-group heterogeneity was observed in all the responses, except for physiological regulation (Table S2). However, the effect of pesticides ($QM = 0.216$, d.f. = 2, P

= 0.897), warming (QM= 0.605, d.f. = 2, P = 0.739) and the combination of warming and pesticides (QM= 0.641, d.f. = 2, P = 0.726) on trait class did not vary. The association between pesticides and temperature (-1.46) was significantly more negative than pesticides only (-0.97) for fitness measurements.

Additionally, pesticides alone and in combination with warming negatively affected responses of invertebrates and microalgae, but no effect was verified on vertebrates (Fig. 1B). Significant within-group heterogeneity was observed in all the responses (Table S2). However, the effect of pesticides (QM= 0.357, d.f. = 2, P = 0.836), warming (QM= 0.177, d.f. = 2, P = 0.915), and the combination of warming and pesticides (QM= 0.111, d.f. = 2, P = 0.739) on organisms did not vary. The association between pesticides and temperature was significantly more negative than pesticides in isolation for microalgae (-2.74 and -1.47, respectively).



A

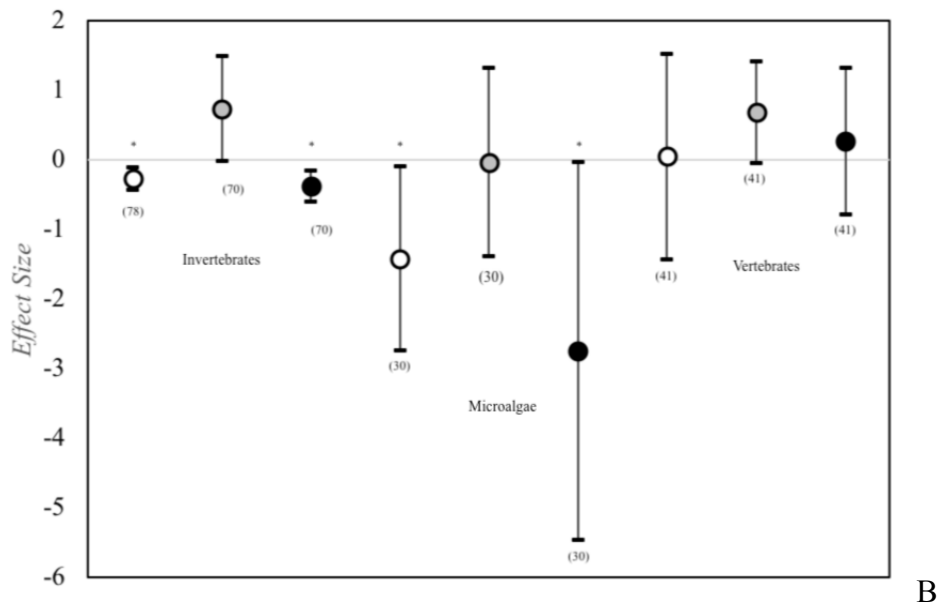


Figure 1. Shows the mean effect of pesticides (clear circles), warming (gray circles), and combined pesticides and warming (black circles) on fitness measurements, molecular responses and physiological regulation for all organisms (A) and on invertebrates, microalgae and vertebrates for all trait classes (B). The number of observations in each analysis is shown in parentheses. The zero line indicates no effect, and significance (*) of mean effects is determined when the $\pm$ 95% confidence interval does not overlap zero.

3.2 Fitness Measurements

Pesticides alone and in combination with warming negatively affected fitness measurement responses of invertebrates, microalgae and vertebrates (Fig. 2; Table S2). Warming positively affected fitness of invertebrates (Fig. 2). Significant within-group heterogeneity was observed in all the responses (except for temperature effect on vertebrates: Table S2). However, the effect of pesticides ($QM = 0.202$, d.f. = 2, $P = 0.904$), warming ($QM = 1.847$, d.f. = 2, $P = 0.397$) and the combination of warming and pesticides ($QM = 2.256$, d.f. = 2, $P = 0.324$) on fitness measurement did not vary among organisms. The association between

pesticides and temperature was significantly more negative than pesticides in isolation for invertebrate (-0.65 for the interactive effect and -0.63 for pesticides only), microalgae (-2.74 and -1.47, respectively), vertebrates (-1.53 and -1.30, respectively).

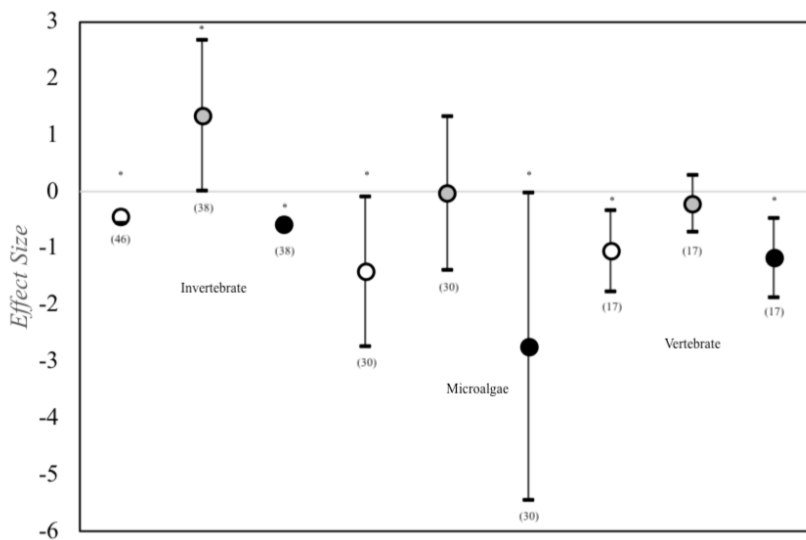


Figure 2. Shows the mean effect of pesticides (clear circles), warming (gray circles), and combined pesticides and warming (black circles) on fitness measurements of invertebrates, microalgae and vertebrates. The number of observations in each analysis is shown in parentheses. The zero line indicates no effect, and significance (*) of mean effects is determined when the $\pm$ 95% confidence interval does not overlap zero.

3.3 Molecular Responses

Warming positively affected molecular responses of invertebrates and of vertebrates (Fig. 3). Pesticides and the combination of pesticides and warming did not affect molecular responses of vertebrates and invertebrates (Fig. 3). Significant within-group heterogeneity was observed in half of the responses: the combination of pesticides and warming on invertebrates and vertebrates and the effect of pesticides on vertebrates (Table S2). However,

the effect of pesticides (QM= 0.017, d.f. = 1, P = 0.896), warming (QM= 0.026, d.f. = 1, P = 0.872) and the combination of warming and pesticides (QM= 0.038, d.f. = 1, P = 0.845) on molecular response did not vary between vertebrates and invertebrates.

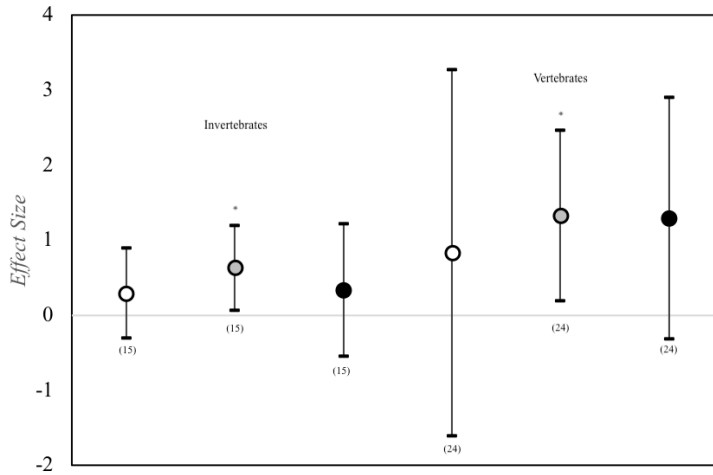


Figure 3. Shows the mean effect of pesticides (clear circles), warming (gray circles), and combined pesticides and warming (black circles) on molecular response of invertebrates and vertebrates. The number of observations in each analysis is shown in parentheses. The zero line indicates no effect, and significance (*) of mean effects is determined when the $\pm$ 95% confidence interval does not overlap zero.

3.4 Pesticides

Slightly hazardous pesticides alone and in combination with warming did have a negative effect on microalgae, while moderately hazardous pesticides negatively affected invertebrates (Fig. 4). Invertebrates were positively influenced by slightly hazardous pesticides and temperature, while vertebrates were not affected by moderately hazardous ones (Fig. 4). Significant within-group heterogeneity was observed in all the responses (exception was effect of slightly hazardous pesticides, warming and combination of slightly hazardous

pesticides and warming on invertebrates: Table S2). However, the effect of slightly hazardous pesticides (QM= 0.429, d.f. = 1, P = 0.512), warming (QM= 0.018, d.f. = 1, P = 0.894) and the combination of warming and slightly hazardous pesticides (QM= 1.605, d.f. = 1, P = 0.205) on general response did not vary between invertebrates and macroalgae. There is a tendency for more severe effects on organisms in the association between pesticides and temperature. Similarly, the effect of moderately hazardous pesticides (QM= 0.007, d.f. = 1, P = 0.934), warming (QM= 0.0002, d.f. = 1, P = 0.990) and the combination of warming and moderately hazardous pesticides (QM= 0.028, d.f. = 1, P = 0.867) on general response did not vary between invertebrates and vertebrates.

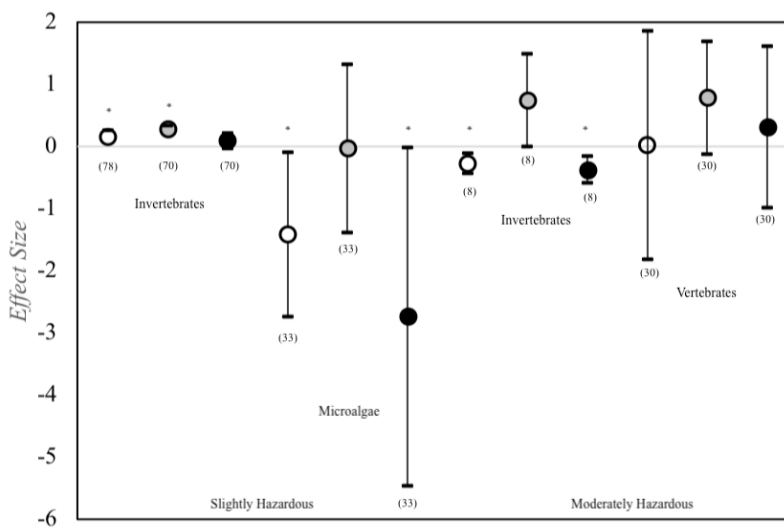


Figure 4. Shows the mean effect of pesticides (clear circles), warming (gray circles), and combined pesticides and warming (black circles) on general response of invertebrates, macroalgae and vertebrates, according to pesticide toxicity (slightly and moderately hazardous). The number of observations in each analysis is shown in parentheses. The zero line indicates no effect, and the significance (*) of mean effects is determined when the $\pm$ 95% confidence interval does not overlap zero.

The significant results found in the meta-analyses were generally robust against publication bias according to the symmetry observed in Rank Correlation Test for Funnel Plot Asymmetry (see electronic supplementary material S3).

4. Discussion

In the present work, the meta-analysis revealed: 1) in general, temperature has neutral or positive effect on biological response, while pesticides affected negatively or have a neutral effect on response variables of three taxonomic groups; 2) the association between pesticides and temperature showed more negative effects on the fitness and physiological regulation of organisms than to the isolated effects of stressors, with microalgae and invertebrates being the most negatively affected groups, and; 3) the combination of pesticides and warming seems to be synergic, whereas both of the individual effect sizes of two stressors were negative, or one was positive/neutral and the other negative, and interaction effect size was inferior than zero (Crain et al. 2008).

Previous studies have shown the harmful results of pesticides (atrazine, chlorpyrifos, diazinon, fipronil, glufosinate ammonium, methomyl, tebuconazole) due to increased temperature on fitness measurements for microalgae *Navicula pelliculosa* and *Pseudokirchneriella subcapitata* (reduced growth with a rise of 5°C, Chalifour and Juneau 2011; Yeo et al. 2018), zooplankton *Daphnia magna* (reduction in reproduction and survival with an increase of 3°C and 5°C, respectively, Cuco et al. 2018; Pino-Otín et al. 2021), insect *Copea annulata* (damage to larval development at an elevation of 5°C, Chang et al. 2007), fish *Danio rerio* (decreased survival of larvae at an elevation of 2-3°C; Osterauer and Kohler 2008), fish *Bidyanus bidyanus* (increase in mortality at an elevation of 5°C, Patra et al. 2015), amphibians *Rana clamitans*, *Duttaphrynus melanostictus*, *Polypedates megacephalus* and

Microhyla pulchra (decreased survival at an elevation of 5°C, Boone and Bridges 1999; Lau et al. 2015). The mentioned studies and those employed in the meta-analysis verified that increasing temperatures, predicted by the IPCC (2021), associated with pesticides, result in disturbance to the fitness of freshwater organisms.

Sensibility of freshwater microalgae, invertebrates and vertebrates can vary in relation to different types of pesticide (Fochtman 2000). When analyzing the sensitivity differences for the pesticides alone and in combination with warming among the three taxonomic groups, we can see that microalgae and invertebrates were more sensitive than vertebrates. Freshwater vertebrates are thought to have adequate mechanisms to tolerate pesticide stress, as observed in fish *Cyprinus carpio* and dimethoate (Shah et al. 2019), amphibian *Rana pipiens* and clothianidin (Robison et al. 2021), frog *Lithobates sylvaticus* and chlorpyrifos (Cothran et al. 2013). Earlier studies have highlighted the sensibility of freshwater microalgae and invertebrates to pesticides are markedly higher in comparison to vertebrates. Moore et al. (1998) reported that invertebrate *Hyalella azteca*, *Chironomus tentans*, and *Daphnia magna* were more sensitive than fish *Pimephales promelas* to chlorpyrifos. Similarly, ecotoxicity tests with *D. magna* respond to malathion, parathion, and methyl parathion with a higher sensitivity than the acute toxicity tests with fish *Danio rerio* (Martins et al. 2007). Microalgae *Raphidocelis subcapitata* and invertebrate *D. similis* were more susceptible to metal-based pesticides in comparison with *D. rerio* (Oliveira-Filho et al. 2004). *D. magna* was more sensitive than fish to pesticides acting through cholinesterase inhibition (Kienzler et al. 2017). The sensitivity of crustaceans (*D. magna* and *Thamnocephalus platyurus*) was lower for herbicides than *R. subcapitata* (Pereira et al. 2000). The present study suggests that microalgae are among the most susceptible taxonomic group to the combination action of pesticides and temperature. Some considerations can be made: 1) adverse effect of pesticides

on non-target aquatic organisms (De Souza et al. 2020); 2) importance of evaluating the effects of chemical and physical stress for organisms from different trophic levels (Rand et al. 1995); 3) negative effects on microalgae and herbivorous invertebrates could result in detrimental consequences for the food web and important repercussions for the structure and function of the aquatic ecosystem (Odum 2010).

The present study showed that physiological regulation was negatively impacted by temperature and by the pesticide-temperature association. Various physical and chemical parameters in the aquatic system can be affected by temperature. The decline of oxygen solubility in aquatic environments at high temperatures (Wetzel 2001) causes physiological damage in biota, and can lower the tolerance of aquatic animals to other stressors (Roman et al. 2019). Additionally, high temperatures influence the solubility of chemicals in the environment, increasing the uptake rate and bioaccumulation of chemicals because of increased metabolic rate and, consequently, stimulates the manifestation of toxicity in organisms (Oga et al. 2008; Silva et al. 2018).

The species of organisms differ according to their preferences and thermal tolerances, thus expressing their degree of adaptation (Odum 2010). The ability of an organism or a population to withstand temperature changes can be a decisive factor in its survival under heat stress (Campbell and Reece 2008). Most representatives of aquatic biota are ectothermic, making temperature a highly important factor for the maintenance of species (Sokolova and Lanning 2008), for the metabolism of aquatic systems as it controls productivity, respiration and nutrient retention (Wetzel 2011). Generally, aquatic organisms that live in conditions close to their thermal tolerance limits appear to be more vulnerable to chemical stress as they are unable to cope with the additional stress of the contaminant (Heugens et al. 2001; Broomhall 2002; Bao et al. 2008). Physiological change (decrease in energy content of the

liver) in goldfish *Carassius auratus* was demonstrated when the organism was exposed to both high temperature and pesticides (Jacquin et al. 2019). Reduction of water content and lipid reserve in insects exposed to high temperatures (Wang et al. 2009) and to combined treatment with pesticides and temperature (Janssens et al. 2014) have already been observed. Such results may be related to costly defense mechanisms against heat stress, including increased levels of stress proteins in invertebrates (Sørensen 2010). At high temperature, energy reserves in organisms can also decrease due to physiological dysfunctions in response to a stressful thermal condition (Wang et al. 2019), and higher sensitivity to pesticides is expected (Arambourou and Stoks 2015).

The present study demonstrated that the molecular response of invertebrates and vertebrates was positively affected by temperature, reinforcing the influence of temperature on the biochemical processes of organisms. Our results are in line with research of those who have found a positive effect of temperature elevation on the production of glutathione S transferase enzymes in amphibians (Freitas et al. 2017) and fish (Kaur et al. 2011), and of phenoloxidase and Hp70 stress proteins in insects (Janssens et al. 2014). In contrast, no effects of pesticides alone and in association with temperature were observed on molecular response. Some studies have failed to find the induction of molecular response on aquatic organisms after pesticide exposure due to the impairment of the antioxidant defense system by pesticides (Tu et al. 2012). Additionally, differences among life stages have been verified in response to pesticides, and the lack of significant effect on molecular endpoint could also be related to different levels of biological complexity within individual taxa, as well as a diversity of strategies to cope with pesticides and warming stresses (Albinati et al. 2020). In addition, pesticides and abiotic variables (pH, temperature, nutrients) can interact, increasing

the accumulation of toxins which alters the capacity of organisms to provide an efficient stress response (Cerezer et al. 2020).

The WHO classification (WHO 2020) of pesticides identifies the less and the more hazardous forms of each pesticide in that it is based on the toxicity of the technical compost and on its formulations of human health. However, there are important environmental risks that can also be observed if pesticides are selected from a slightly hazardous class. The meta-analysis showed that microalgae were adversely affected by slightly hazardous forms of pesticide in isolation and association with temperature. With this approach, it is important to establish a classification of pesticide groups meeting the criteria of lower risk to human and environmental health to better protection of human, terrestrial and aquatic life (Jepson et al. 2020). However, we detected a beneficial response to invertebrates in exposure to slightly hazardous forms of pesticide. The positive effects observed on invertebrates could be explained as a hormetic response, especially an increase in animal performance at low (sublethal) toxicant dose related to the induction of stress-resisting/adjusting mechanism (Calabrese and Baldwin 2003; Cutler 2013). Some studies have treated the increases in fitness in crustaceans *D. carinata* (Zalizniak and Nugegoda 2006) and *Ceriodaphnia silvestrii* (Mansano et al. 2018), rotifers *Philodina roseola* (Moreira et al. 2015) and *Brachionus calyciflorus* (Guo et al. 2012), and midge *Chironomus riparius* (Goedkoop et al. 2010) exposed to a sublethal concentration of pesticide as the hormesis process. Of special interest is that hormesis has been related to pest insect resistance increase (Guedes and Cluter 2013) with important ecological consequences for pesticide applications in the global warming scenario.

Meta-analyses are particularly effective for an integration of data from multiple sources; quantitative evaluation of effect sizes and meta-analytic results can be understood in

relation to biological importance, since studies of good quality are used (Sun et al. 2021). We researched and consolidated the available literature regarding pesticide toxicity and warming that met our inclusion criteria. Several experimental studies included in our literature review did not report the type of error that was present or sample size, given the low number of studies in our meta-analysis. In this sense, we recommend that researchers include that information in their manuscript. Additionally, scientific literature evidences are limited in that they have considered standard experimental condition and ignored the temperature increase based on global warming. In this sense, studies conducted to research the simultaneous exposure of freshwater biota to warming and chemical stressors should take into account the climate change scenario predicted by the IPCC to contribute to finding relevant effects of contamination and climate change interaction on the aquatic community.

5. Conclusion

The meta-analysis conducted in this research demonstrated that different endpoints and freshwater taxa may be variably sensitive to pesticides and warming, alone or in combination. Synergic effects of pesticides and temperature and their negative influence on fitness and morphological regulation of freshwater taxa were demonstrated. This research highlights that freshwater biodiversity is negatively impacted by pesticide pollution and warming. Particularly, further studies must consider other abiotic stressors (e.g, pH and dissolved oxygen) in freshwater that are presumed to interact with warming in order to make more exact generalizations about chemical contamination and climatic events.

Conflict of interest

None declared

Reference

- Albinati ACL, Soares PC, Moreira ELT et al (2020). Parâmetros bioquímicos de tilápia do Nilo exposta ao tiametoxam. *Research, Society and Development* 9(11). <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10475>
- Arambouroua H, Stoks R (2015) Warmer winters modulate life history and energy storage but do not affect sensitivity to a widespread pesticide in an aquatic insect. *Aquat Toxicol* 167:38–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.07.018>
- Bailey SW (2004) Climate change and decreasing herbicide persistence. *Pest Manag Sci* 60(2):158-62. <https://doi.org/10.1002/ps.785>.
- Bao VW, Koutsafitis A, Kenneth MYL (2008) Temperature-dependent toxicities of chlorothalonil and copper pyrethrin to the marine copepod *Tigriopus japonicus* and dinoflagellate *Pyrocystis lunula*. *Australasian Journal of Ecotoxicol.* 14:45-54
- Bloomfield JP, Williams RJ, Gooddy DC, Cape JN, Guha P (2006) Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater--A UK perspective. *Sci Total Environ* 369(1-3):163-177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.019>
- Boone MD, Bridges CM (1999) The effect of temperature on the potency of carbaryl for survival of tadpoles of the green frog (*Rana clamitans*). *Environ Toxicol Chem* 18(7):1482–1484. <https://doi.org/10.1002/etc.5620180720>
- Borenstein M, Hedges LV, Higgins JPT, Rothstein HR (2009) Introduction to meta-analysis. John Wiley & Sons, Chichester
- Boxall ABA, Hardy AS, Sabine BT et al (2009) Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture. *Environmental Health Perspectives* 117(4):508-514. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800084>

Benitez JF, Real FJ, Acero JL, Garcia C (2006) Photochemical oxidation processes for the elimination of phenylurea herbicides in waters. *J Hazard Mater* B138:278–287. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.07>

Broomhall S (2002). The effects of endosulfan and variable water temperature on survivorship and subsequent vulnerability to predation in *Litoria citropa* tadpoles. *Aquat Toxicol* 61:243-250. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(02\)00061-9](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(02)00061-9)

Calabrese EJ, Baldwin LA (2003) Toxicology rethinks its central belief. *Nature* 421:691–692. doi: 10.1038/421691a.

Campbell NA, Reece JB, Urry LA, Cain ML, Wassermann SA, Minor PV (2010). *Biologia*. Benjamin Cummings, San Francisco

Casali-Pereira M P, Daam MA, de Resende JC et al (2015) Toxicity of Vertimec 18 EC (active ingredient abamectin) to the neotropical cladoceran *Ceriodaphnia silvestrii*. *Chemosphere* 13:558–564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.006>

Cambroner MC, Marshall H, De Meester L et al (2018). Predictability of the impact of multiple stressors on the keystone species *Daphnia*. *Sci Rep* 8:17572. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35861-y> |

Cerezer C, Marins AT, Cerezer FO et al (2020) Influence of pesticides and abiotic conditions on biochemical biomarkers in *Aegla aff. longirostri* (Crustacea, Anomura): Implications for conservation. *Ecotoxicol Environ Saf* 203:110982. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110982>

Chalifour A, Juneau P (2011) Temperature-dependent sensitivity of growth and photosynthesis of *Scenedesmus obliquus*, *Navicula pelliculosa* and two strains of *Microcystis aeruginosa* to the herbicide atrazine. *Aquat Toxicol* 103, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.01.016>

- Chang X, Zhai B, Liu X, Wang M (2007) Effects of temperature stress and pesticide exposure on fluctuating asymmetry and mortality of *Copera annulata* (selys) (Odonata: Zygoptera) larvae. *Ecotoxicol Environ Saf* 67:120–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.04.004>
- Chapra SC, Boehlert B, Fant C et al (2017) Climate change impacts on harmful algal blooms in U.S. freshwaters: a screening-level assessment. *Environ Sci Technol* 51:8933–8943. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01498>
- Cothran RD, Brown JM, Relyea RA (2013) Proximity to agriculture is correlated with pesticide tolerance: evidence for the evolution of amphibian resistance to modern pesticides *Evolutionary Applications* 6:832-84 doi: 10.1111/eva.12069
- Cuco AP, Abrantes N, Gonçalves F, Wolinska J, Castro BB (2016). Toxicity of two fungicides in *Daphnia*: is it always temperature dependent? *Ecotoxicology* 25:1376–1389. <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1689-8>
- Cutler GC (2013) Insects, insecticides and hormesis: evidence and considerations for study. *Dose-Response* 11:154–177. doi: 10.2203/dose-response.12-008.Cutler
- Dabrowski JM, Peall SKC, Reinecke AJ, Liess M, Schulz R (2002) Runoff-related pesticide input into the Lourens River, South Africa: basic data for exposure assessment and risk mitigation at the catchment scale. *Water Air and Soil Pollution* 135(1):265-283. <https://doi.org/10.1023/A:1014705931212>
- De Beeck LO, Verheyen J, Olsen K, Stoks R (2017) Negative effects of pesticides under global warming can be counteracted by a higher degradation rate and thermal adaptation. *J Appl Ecol* 54:1847–1855. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12919>
- De Souza RM, Seibert D, Quesada HB, Bassetti FJ, Fagundes-Klen MR, Bergamasco R (2020) Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: a review.

Process Safety and Environmental Protection 135:22-37.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.035>.

Delnat V, Tran TT, Verheyen J, Van Dinh K, Janssens L, Stoks R (2019) Temperature variation magnifies chlorpyrifos toxicity differently between larval and adult mosquitoes. *Sci Total Environ* 690:1237–1244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.030>

Dinh Van K, Janssens Li, Debecker S, Stoks R (2014) Temperature- and latitude-specific individual growth rates shape the vulnerability of damselfly larvae to a widespread pesticide. *J Appl Ecol* 51:919–928. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12269>

European Environment Agency's EEA (2018) EEA Signals 2018 – Water is life'

Freitas JS, Teresa FB, De Almeida EA (2017) Influence of temperature on the antioxidant responses and lipid peroxidation of two species of tadpoles (*Rhinella schneideri* and *Physalaemus nattereri*) exposed to the herbicide sulfentrazone (Boral 500SC®). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* 197:32–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.04.005>

Fochtman P (2000) Acute toxicity of nine pesticides as determined with conventional assays and alternative microbiotests. In: Persoone G, Janssen C, De Coen W (ed) *Routine Toxicity Screening and Biomonitoring*, Springer Science+Business, New York, pp.233-241

Giroux M, Gan J, Schlenk D (2019) The effects of bifenthrin and temperature on the endocrinology of juvenile chinook salmon. *Environ Toxicol Chem* 38(4):852–861. <https://doi.org/10.1002/etc.4372>

Goedkoop W, Spann N, Åkerblom N (2010) Sublethal and sex-specific cypermethrin effects in toxicity tests with the midge *Chironomus riparius* Meigen. *Ecotoxicology* 19:1201–1208. <https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10646-010-0505-0>

Gomes MP, Juneau P (2017) Temperature and light modulation of herbicide toxicity on algal and cyanobacterial physiology. *Frontiers in Environmental Science* 5:50.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00050>

Guedes RN, Cutler GC (2014) Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. *Pest Manag Sci* 70: 690–697. doi: 0.1002/ps.3669

Guo R, Ren X, Ren H (2012) Effects of dimethoate on rotifer *Brachionus calyciflorus* using multigeneration toxicity tests. *Journal of Environmental Science and Health, Part B. Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes* 47(9):883-890. <https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1080/03601234.2012.693869>

Gurevitch J, Morrow LL, Wallace A, Walsh AJS (1992) A meta-analysis of competition in field experiments. *The American Naturalist* 140(4). <https://doi.org/10.1086/285428>

Hays GC, Richardson AJ, Robinson C (2005) Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology and Evolution* 20(6). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.03.004>

Heugens EHW, Hendriks AJ, Dekker T, van Straalen NM, Admiraal W (2001) A review of the effects of multiple stressors on aquatic organisms and analysis of uncertainty factors for use in risk assessment. *Critical Reviews in Toxicology* 31:247–284. <https://doi.org/10.1080/20014091111695>

Hossain K, Yadav S, Quaik S, Pant G, Maruthi AY, Ismail N (2017) Vulnerabilities of macrophytes distribution due to climate change. *Theoretical and Applied Climatology* 129:1123–1132. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1837-3>

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2019) Special and Methodology Reports. *Climate Change and Land*. Agosto 2019. <https://www.ipcc.ch/srccl/>.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al. (eds.). Cambridge University Press. In Press

- Jacquín L, Gandar A, Aguirre-Smith M, Perrault A, Hénaff MIE, Jong LDE, Paris-Palcios S, Lafaille P, Jean S (2019) High temperature aggravates the effects of pesticides in goldfish. *Ecotoxicol Environmental Saf* 172:255–264. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.085>.
- Janssens L, Dinh Van K, Stoks R (2014) Extreme temperatures in the adult stage shape delayed effects of larval pesticide stress: a comparison between latitude. *Aquat Toxicol* 148:74–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.01.002>
- Jepson PC, Murray K, Bach O, Bonilla MA, Neumeister L (2020) Selection of pesticides to reduce human and environmental health risks: a global guideline and minimum pesticides list. *The Lancet Planet* 4(2): E56-E63. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30266-](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30266-)
- Kaur M, Atif F, Ansari RA, Ahmad F, Raisuddin S (2011) The interactive effect of elevated temperature on deltamethrin-induced biochemical stress responses in *Channa punctata* Bloch. *Chemico-Biological Interactions* 193:216–224. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2011.06.011>
- Kattwinkel M, Kuehne J-V, Foit K, Liess M (2011) Climate change, agricultural insecticide exposure, and risk for freshwater communities. *Ecological Applications* 21:2068–2081. doi 10.1890 / 10-1993.1.
- Kędra M, Wiejaczka Ł (2018) Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: assessment and management implications. *Sci Total Environ* 626, 1474–1483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.044>
- Kienzler A, Halder M, Worth A (2017) Waiving chronic fish tests: possible use of acute-to-chronic relationships and interspecies correlations. *Toxicological & Environmental Chemistry* 99:7-8, 1129-1151. <https://doi.org/10.1080/02772248.2016.1246663>
- Lakens D (2013) Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs *Frontiers in Psychology* 4:863. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>

- Larras F, Lambert AS, Pesce S, Rimet F, Bouchez A, Montuelle B (2013) The effect of temperature and a herbicide mixture on freshwater periphytic algae. *Ecotoxicol Environ Saf* 98:162–170. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.007>
- Lau ETC, Karraker NE, Leung KMY (2015) Temperature-dependent acute toxicity of methomyl pesticide on larvae of 3 asian amphibian species. *Environ Toxicol Chem* 34(10): 2322–2327. <https://doi.org/10.1002/etc.3061>
- Li Y, Dou Y, An J, Tu X, Lv H, Pan W, Dang Z, Gao Z (2020) Temperature-dependent variations in toxicity of diamide insecticides against three lepidopteran insects. *Ecotoxicology* 29:607–612. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02181-9>
- Lydy MJ, Lohner TW, Fisher SW (1990) Influence of pH, temperature and sediment type on the toxicity, accumulation and degradation of parathion in aquatic systems. *Aquat Toxicol* 17:27–44. [https://doi.org/10.1016/0166-445X\(90\)90010-M](https://doi.org/10.1016/0166-445X(90)90010-M)
- Mansano AS, Moreira RA, Dornfeld HC et al (2018) Acute and chronic toxicity of diuron and carbofuran to the neotropical cladoceran *Ceriodaphnia silvestrii*. *Environ Sci Pollut Res* 25:13335–13346. <https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11356-016-8274-9>
- Martins J, Teles LO, Vasconcelos V (2007) Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology. *Environment International* 33:414–425. doi:10.1016/j.envint.2006.12.006
- Meyer JL, Sale MJ, Muiholland PJ, Poff NL (1999) Impacts of climate change on aquatic ecosystem functioning and health'. *J. American Water Resour.* 36(6):1373-1384. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04222.x>
- Mooij WM, Hülsmann S, Domis LNDS, Nolet BA, Bodelier PLE, Boers PCM, Lammens EHRR (2005) The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquatic Ecology* 39:381–400. <https://doi.org/10.1007/s10452-005-9008-0>

- Moore MT, Huggett D B, Gillespie WBJr, Rodgers JHJr, Cooper CM (1998) Comparative toxicity of chlordane, chlorpyrifos, and aldicarb to four aquatic testing organisms. *Arch Environ Contam Toxicol* 34:152–157. <https://doi.org/10.1007/s002449900299>
- Moreira RA, Mansano AS Rocha O (2015) The toxicity of carbofuran to the freshwater rotifer, *Philodina roseola*. *Ecotoxicology* 24:604–615. <https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10646-014-1408-2>
- Nicolopoulou-Stamat P, Maipas S, Kotampasi C, Stamatis P, Hens L (2016) Chemical pesticides and human health: the urgent need for a new concept in agriculture. *Frontiers Public Health* 4:148. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Niinemets Ü, Kahru A, Mander Ü, Nõges P, Nõges T, Tuvikene A, Vasemägi A (2017) Interacting environmental and chemical stresses under global change in temperate aquatic ecosystems: stress responses, adaptation, and scaling. *Regional Environmental Change* 17:2061–2077. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1196-3>
- Noyes PD, Lema SC (2015) Forecasting the impacts of chemical pollution and climate change interactions on the health of wildlife. *Current Zoology* 61(4):669–689. <https://doi.org/10.1093/czoolo/61.4.669>
- Osterauer R, Köhler HR (2008) Temperature-dependent effects of the pesticides thiacloprid and diazinon on the embryonic development of zebrafish (*Danio rerio*). *Aquat Toxicol* 86:485–494, doi: 10.1016/j.aquatox.2007.12.013 <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.12.013>
- Patra RW, Chapman JC, Lim RP, Gehrke PC, Sunderam RM (2015) Interactions between water temperature and contaminant toxicity to freshwater fish. *Environ Toxicol Chem* 34(8):1809–1817. <https://doi.org/10.1002/etc.2990>
- Paerl HW, Huisman J (2009) Climate change: a catalyst for global expansion of harmful

cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports* 1(1):27–37.

<https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>.

Pereira T, Cerejeira MJ, Brito MF, Morbey MA (2000) Laboratory studies with microbiotests to evaluate the acute toxicity to aquatic biota of herbicides used in Portuguese paddy fields. In: Persoone G, Janssen C, De Coen W (ed) *Routine Toxicity Screening and Biomonitoring*, Springer Science+Business, New York, pp.495-500

Pino-Otín MR, Ballester D, Navarro E, Mainar AM, Val J (2021) Effects of the insecticide fipronil in freshwater model organisms and microbial and periphyton communities. *Sci Total Environ* 764, 142820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142820>

Odum E P (2010) *Fundamentos de Ecologia*. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro

Oga S, Camargo MAC, Batistuzzo JAO (2008) *Fundamentos de Toxicologia*. Atheneu Editora, São Paulo

Oliveira-Filho EC, Lopes RM, Paumgarten FJ (2004) Comparative study on the susceptibility of freshwater species to copper-based pesticides. *Chemosphere* 56: 369–374. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.04.026>

Rand GM, Wills PG, Mc Carty LS (1995) *Fundamentals of aquatic toxicology: effects, environmental fate, and risk assessment*. Taylor & Francis, Washington

Robinson SA, Chlebak RJ, Young SD et al (2021) Clothianidin alters leukocyte profiles and elevates measures of oxidative stress in tadpoles of the amphibian, *Rana pipiens*. *Environ Pollut* 284. 117149. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117149>

Roman MR, Brandt SB, Houde ED, Pierson JJ (2019) Interactive effects of hypoxia and temperature on coastal pelagic zooplankton and fish. *Frontiers Marine Science* 6:139. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00139>

Rossati A (2017) Global warming and its health impact. *International J. Occupational and*

Salako AF, Amaeze NH, Shobajo HM, Osuala FI (2020) Comparative acute toxicity of three pyrethroids (deltamethrin, cypermethrin and lambda-cyhalothrin) on guppy fish (*Poecilia reticulata* Peters, 1859). Scientific African 9: e00504.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00504>

Saskia K, Stampfli NC, Noskov YA, Beketov MA, Liess M (2013) Elevated temperature prolongs long-term effects of a pesticide on *Daphnia* spp. due to altered competition in zooplankton communities. *Global Change Biology* 19(5):1598–1609.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12151>

Shah ZU, Parveen S, Bhat BN (2019) Hormonal response of freshwater fish *Cyprinus carpio* (Linnaeus) to dimethoate exposure. World Journal of Environmental Biosciences. 8(3):1-7

Silva V, Marques CR, Campos I, Vidal T, Keizer JJ, Gonçalves F, Abrantes N (2018) Combined effect of copper sulfate and water temperature on key freshwater trophic levels – approaching potential climatic change scenarios. *Ecotoxicol Environ Saf* 148:384–392.

<https://doi.org/10.1016> / Sokolova IM, Lanning G (2008) Interactive effects of metal pollution and temperature on metabolism in aquatic ectotherms: implications of global climate change. *Climate Research* 37:181–201. <https://doi.org/10.3354/cr00764>.

j.ecoenv.2017.10.035

Sørensen JG (2010) Application of heat shock protein expression for detecting natural adaptation and exposure to stress in natural populations. *Current Zoology* 56(6):703–713

Sorte C, Ibáñez I, Blumenthal DM et al (2013) Poised to prosper? A cross-system comparison of climate change effects on native and non-native species performance. *Ecology Letters* 16(2):261–270. doi:10.1111/ele.12017

- Sun T, Zhan J, Li F, Ji C, Wu H (2021) Evidence-based meta-analysis of the genotoxicity induced by microplastics in aquatic organisms at environmentally relevant concentrations. *Sci Total Environ* 783:147076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147076>.
- Syafrudin M, Kristanti RA, Yuniarto A et al (2021) Pesticides in drinking water—a review. *International Journal Environmental Research* 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020468>
- Tang HMF, Manfred L, McBratney A, Magg F (2021) Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience* 14(206):206–210. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5> |
- Tu HT, Silvestre F, De Meulder B, Thome J-P, Phuong NT, Kestemont P (2012) Combined effects of deltamethrin, temperature and salinity on oxidative stress biomarkers and acetylcholinesterase activity in the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). *Chemosphere* 86(1): 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.022>.
- Ummenhofer CC, Meehl GA (2017) Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 372:20160135. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>
- Van den Brink PJ, Boxall ABA, Maltby L et al (2018) Toward sustainable environmental quality: priority research questions for Europe. *Environ Toxicol Chem* 37:2281–2295. <https://doi.org/10.1002/etc.4205>
- Vliet MThV, Franssen WHp, Yearsley JR et al (2013) Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23(2):450–464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>
- Wang XG, Johnson MW, Daane KM, Opp S (2009). Combined effects of heat stress and food supply on flight performance of olive fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Entomological Society of America* 102: 727–734. doi: 10.1603/008.102.0418
- Wang XP, Sun DC, Yao TD (2016) Climate change and global cycling of persistent organic

pollutants: a critical review. *Science China Earth Sciences* 59:1899–1911, <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5073-0>

Wang Z, Lui GCS, Burton Jr GA, Leung KMY (2019) Thermal extremes can intensify chemical toxicity to freshwater organisms and hence exacerbate their impact on the biological community. *Chemosphere* 224:256-264. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.103>

Wetzel RG (2001) *Limnology: lake and river ecosystems*. Academic Press, San Diego

World Health Organization WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification, 2019. (2020). Geneva: World Health Organization.

Woodward G, Perkins DM, Brown LE (2010) Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 365(1549):2093–2106. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0055>

Yeo BS, Chu WL, Wong CY et al (2018) Combined effects of glufosinate ammonium and temperature on the growth, photosynthetic pigment content and oxidative stress response of *Chlorella* sp. and *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Journal of Applied Phycology* 30:3043–3055. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1613-0>

Zalizniak L, Nugagoda D (2006) Effect of sublethal concentrations of chlorpyrifos on three successive generations of *Daphnia carinata*. *Ecotoxicol Environ Saf* 64(2): 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.03.015>

S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	23.9	NA	NA	26.6	11				10.8	69	NA	NA	6.7
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	2.24	2.26	2.3	2.44	0.5	0.3	0.3	0.53	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	89.3	89.1	89.1	89.3	0.78	0.78	0.78	0.82	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	7.94	7.16	6.99	8.15	1.19	1.19	1.19	1.2	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	7.99	7.69	7.92	7.49	0.79	0.8	0.8	0.8	13	12	12	11	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	11.3	11.2	10.5	11.9	3.44	3.53	3.53	3.41	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	21.7	NA	NA	21.5	10.9				11	68	NA	69	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	2.7	2.84	2.67	2.76	0.5	0.55	0.54	0.53	21	21	20	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	89	88.4	88.6	89	0.78	0.76	0.76	0.82	21	20	20	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	9	8.96	8.52	8.89	1.19	1.19	1.16	1.17	21	21	20	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	8.66	8.65	8.97	7.99	0.8	0.8	0.83	0.8	12	11	12	12	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	11.7	10.9	10.1	15	3.39	3.48	3.4	3.36	21	21	20	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	23.9	NA	NA	26.6	11				10.8	70	NA	67	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	2.31	2.26	2.24	2.44	0.5	0.5	0.53	0.53	21	21	22	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	89.5	89.1	89.2	89.3	0.78	0.78	0.8	0.82	21	21	22	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	7.87	7.16	6.86	8.15	1.15	1.19	1.17	1.2	21	21	22	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	7.93	7.69	8.13	7.49	0.8	0.8	0.8	0.8	12	12	12	11	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	10.7	11.2	9.06	11.9	3.44	3.53	3.48	3.41	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	22.2	NA	NA	21.5	11				11	67	NA	69	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	2.74	2.84	2.64	2.76	0.5	0.55	0.55	0.53	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	89.1	88.4	88.8	89	0.76	0.76	0.78	0.82	20	20	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	9.12	8.96	8.44	8.89	1.19	1.19	1.19	1.17	21	21	21	22	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	8.57	8.65	9.21	7.99	0.8	0.8	0.79	0.8	12	11	13	12	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	10.5	10.9	9.06	15	3.39	3.48	3.48	3.36	21	21	21	23	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	70.2	NA	NA	72.9	13.5				13.4	51	NA	57	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	2.97	2.87	2.92	3	0.48	0.49	0.46	0.49	16	17	15	17	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	88.9	88.3	88.4	88.7	0.77	0.78	0.78	0.8	15	17	17	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	9.06	8.88	7.98	9.6	1.16	1.15	1.16	1.16	15	13	14	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	8.7	9.48	9.49	8.35	0.8	0.8	0.8	0.8	12	12	12	11	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	12	12	10.6	15.8	3.56	3.38	3.41	3.55	16	17	15	17	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	64.3	NA	NA	62.9	13.4				13.6	60	NA	63	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	3.13	2.87	2.99	3.16	0.51	0.49	0.48	0.48	18	17	16	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	88.7	88.2	88.3	88.5	0.78	0.78	0.76	0.76	17	19	16	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	8.66	9.8	9.55	10.5	0.8	1.15	1.16	1.16	12	17	15	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	10.4	10.5	11.4	8.4	0.79	0.79	0.83	0.8	13	13	12	12	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	18.5	18.1	16.6	15.8	3.61	3.44	3.44	3.55	18	19	16	17	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Development time	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	65.7	NA	NA	72.9	14.2				13.4	58	NA	57	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Finex measurement	Dry mass	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	2.91	2.87	2.89	3	0.48	0.49	0.49	0.49	14	17	17	17	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Water content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	88.8	88.3	88.4	88.7	0.75	0.78	0.78	0.8	14	17	17	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Physiological regulation	Fat content	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	8.83	8.88	8.73	9.6	1.16	1.15	1.16	1.16	14	13	15	16	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	Hsp70 levels	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	9.31	9.48	9.36	8.35	0.79	0.8	0.8	0.8	13	12	11	11	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater	N.A.	Moderately	Humidous	increase	Molecular response	PO activity	pesticide	temperature	χ^2	≤ 2	mg/L/L	mol/L	2×10^{-5}	70	10.8	18.7	9.52	15.8	3.4	3.38	3.38	3.55	14	17	17	17	
S	mean	ci	sd	2014	<i>Trichusa elegant</i>	austrum	Fin	Im-enclose	Freshwater																											

[illegible]

Supplementary Material 2**ST1 - Heterogeneity Tests - Within Groups (Q) and Between Groups (Qm)**

Heterogeneity statistics for each model in the different response variables. Separate analyses were conducted to compare similarity in effect size between each group

Q - Heterogeneity of the analysis, QM - Heterogeneity explained by differences between subgroups

***' <0.001, '**' <0.01, '*' <0.05, '.' <0.1

Full model:	Pesticides and Temperature					
Fitness Measurements/Molecular Responses/Physiological Regulation						
		Q_M	2	0.6413	0.7257	
Fitness Measurements		Q	84	116143.2707	<0.0001	***
Molecular Responses		Q	38	759.4885	<0.0001	***
Physiological Regulation		Q	16	7.1628	0.9700	
Invertebrates/Macroalgae/Vertebrates						
		Q_M	2	2.0832	0.3529	
Invertebrates		Q	69	360.3522	<0.0001	***
Microalgae		Q	29	96960.7725	<0.0001	***
Vertebrates		Q	40	1044.4957	<0.0001	***

Statistical Model	Fitness	d.f	Q	P
Full model:	Pesticides and Temperature			
Invertebrates/Macroalgae/Vertebrates				
	Q_M	2	2.2561	0.3237

Invertebrates	Q	37	286.3684	<0.000 1	***
Microalgae	Q	29	96960.7725	<0.000 1	***
Vertebrates	Q	16	30.7800	0.0144	*

Statistical Model	Molecular	d.f	Q	P
--------------------------	------------------	------------	----------	----------

Full model:	Pesticides
--------------------	------------

Invertebrates/Macroalgae/Vertebrates

	Q_M	1	0.0170	0.8964	
Invertebrates	Q	14	11.7706	0.6247	
Microalgae	Q	-	-	-	
Vertebrates	Q	23	5219.6765	<0.0001	***

Statistical Model
d.f**Q****P**

Full model: Temperature

Invertebrates/Microalgae/Vertebrates

	Q_M	1	0.0261	0.8717
Invertebrates	Q	14	11.8929	0.6149
Macroalgae	Q	-	-	-
Vertebrates	Q	23	34.4246	0.0593

Statistical Model
d.f**Q****P**

Full model: Pesticides and Temperature

Invertebrates/Microalgae/Vertebrates

	Q_M	1	0.0384	0.8446	
Invertebrates	Q	14	26.7877	0.0205	*
Microalgae	Q	-	-	-	
Vertebrates	Q	23	688.9176	<0.0001	***

Statistical Model

d.f

Q

P

Full model:

Pesticides

Slightly hazardous

	Q_M	1	0.4295	0.5122	
Invertebrates	Q	7	0.0695	1.0000	
Macroalgae	Q	29	12566.0458	<0.0001	***
Vertebrates	Q	-	-	-	

Moderately hazardous

	Q_M	1	0.0068	0.9341	
Invertebrates	Q	77	233.4849	<0.0001	***
Microalgae	Q	-	-	-	
Vertebrates	Q	32	6267.6370	<0.0001	***

Statistical Model
d.f**Q****P****Full model:** Temperature

Slightly hazardous

	Q_M	1	0.0179	0.8936	
Invertebrates	Q	7	0.0289	1.0000	
Macroalgae	Q	29	7821.5633	<0.0001	***
Vertebrates	Q	-	-	-	
Moderately hazardous					
	Q_M	1	0.0002	0.9900	
Invertebrates	Q	69	104041.9200	<0.0001	***
Microalgae	Q	-	-	-	
Vertebrates	Q	32	133.4990	<0.0001	***

Statistical Model
d.f**Q****P**
Full model: Pesticides and Temperature

Slightly hazardous

 Q_M

1

1.6048

0.2052

Invertebrates	Q	7	0.1094	<0.000 1	***
Microalgae	Q	29	96960.7725	<0.000 1	***
Vertebrates	Q	-	-	-	
Moderately hazardous					
	Q_M	1	0.0282	0.8666	
Invertebrates	Q	69	360.3522	<0.000 1	***
Microalgae	Q	-	-	-	
Vertebrates	Q	32	1024.4342	<0.000 1	***

Supplementary Material 3 Values of Rank Correlation Test for Funnel Plot Asymmetry and p-values for relations evaluated.

	Stressor A (tau, p)	Stressor B	Stressor AB
Fitness Measurements: Invertebrate	-0.183, 0.079	0.372, 0.003*	0.026, 0.821
Fitness Measurements: Microalgae	-0.193, 0.150	0.007, 0.957	-0.420, 0.001*
Fitness Measurements: Vertebrate	0.260, 0.166	0.089, 0.642	0.515, 0.003*
Molecular Response: Invertebrate	-0.275, 0.163	-0.277, 0.183	-0.495, 0.011*
Molecular Response: Vertebrate	0.413, 0.004*	0.149, 0.309	0.196, 0.180
Slightly Hazardous: Invertebrates	0.071, 0.905	0.333, 0.293	0.357, 0.275
Slightly Hazardous: Microalgae	-0.193, 0.150	0.007, 0.957	-0.420, 0.001*
Moderately Hazardous: Invertebrates	-0.118, 0.129	0.517, <0.0001*	0.011, 0.895
Moderately Hazardous: Vertebrates	0.503, <0.0001*	0.120, 0.335	0.326, 0.008*

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou os efeitos ocasionados pelos agrotóxicos em combinação com o aumento da temperatura na biota de ecossistemas de água doce, relacionado às perspectivas das mudanças climáticas. Tal avaliação foi realizada através de revisão sistemática com meta-análise de artigos científicos que publicaram estudos experimentais nesse tema.

É fato que os processos antropogênicos têm acentuado os eventos das mudanças climáticas com consequências diretas e indiretas para os ecossistemas. Um exemplo é o aumento do uso de agrotóxicos mediante a proliferação de patógenos e perdas na produção agrícola decorrentes das mudanças climáticas. Muitas vezes, tais produtos são utilizados em grandes quantidades de forma deliberada sem prévios estudos sobre seus possíveis efeitos aos ecossistemas. Além disso, tais produtos atingem os organismos não alvo e outros compartimentos ambientais por não haver uma barreira física para contê-los.

Neste estudo, foram analisados artigos científicos que investigaram efeitos da exposição à agrotóxicos e elevadas temperaturas, de forma isolada e em combinação, para três grupos taxonômicos (microalgas, invertebrados e vertebrados). Destacam-se resultados similares e distintos entre os grupos e variação na resposta dos organismos. No conjunto de dados analisados através da meta-análise, as variáveis aptidão e regulação fisiológica apresentaram efeitos mais negativos na combinação entre agroquímicos e aquecimento, sendo microalgas e invertebrados os grupos mais sensíveis aos estressores.

As microalgas são seres fotossintetizantes, base da cadeia alimentar e responsáveis pela produção primária nos ambientes aquáticos. Efeitos deletérios nos microrganismos fotossintetizantes decorrentes da associação pesticida e aquecimento repercutirão em outros elos da cadeia alimentar e no funcionamento geral dos ecossistemas aquáticos de água doce. Além da possibilidade desses microrganismos transportarem o contaminante para outros níveis tróficos.

Na análise dos efeitos dos agrotóxicos classificados como moderadamente perigosos, espécies de invertebrados também apresentaram alterações mais negativas nas variáveis respostas em exposição isolada e associada à elevada temperatura. Em ecossistemas de água doce, algumas espécies de invertebrados aquáticos são consideradas bioindicadoras para

ecossistemas de água doce, demonstrando que perturbações nesses indivíduos também caracterizarão danos ao meio ambiente.

Poucos artigos científicos atenderam os critérios de inclusão da presente pesquisa. Entretanto, a revisão sistemática com meta-análise mostrou-se uma ferramenta adequada para analisar um conjunto de dados obtidos de forma independente sobre a temática efeitos da poluição por pesticidas e aquecimento global para a biota de água doce. Dentro dessa abordagem, ressaltamos a necessidade que os dados originais dos artigos científicos sejam disponibilizados para não limitar a aplicação da meta-análise para a síntese dos dados e das conclusões das pesquisas anteriormente realizadas.

Os resultados demonstram que a biota dos ecossistemas de água doce, submetida à ação conjunta de estressores químicos e físicos, sofre perturbações significativas. Com a intensificação dos eventos associados às mudanças climáticas, essa problemática se acentuará. Nesse sentido, as ações voltadas para preservação do meio ambiente deverão contemplar os cenários de desastres naturais e eventos extremos, na medida em que elevação da temperatura, aumento de processos erosivos e intensificação das precipitações influenciará na entrada de diversos poluentes para os ecossistemas aquáticos.

O desafio de lidar com os riscos sistêmicos associados aos agrotóxicos e outros agentes químicos, em desastres tecnológicos, envolve muitas áreas, tais como: agricultura, economia, políticas públicas, segurança alimentar, preservação do meio ambiente e outras. O presente estudo contribuiu com uma análise abrangente dos estudos de efeitos da interação agroquímicos e elevação de temperatura em grupos de organismos aquáticos, levando em consideração as previsões do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC. Neste contexto, a análise ora realizada auxiliará no entendimento dos efeitos dos agrotóxicos sob diferentes regimes de temperatura e na direção de novas pesquisas sobre a influência de outros fatores abióticos (por exemplo, oxigênio dissolvido e pH) na toxicidade de poluentes visto as mudanças climáticas ocorridas atualmente e em cenários futuros.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Anjaina Fernandes de *et al.* Pesticides in Brazilian freshwaters: a critical review. **Environmental Science: Processes Impacts**. Brasil, n. 6, 18. p. 779-787. 2016. 7:1-9. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6EM00268D>. Disponível em: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/em/c6em00268d#!divAbstract>. Acesso em: 16 Ago. 2020.
- ALLEN, Joey *et al.* Disentangling the direct and indirect effects of agricultural runoff on freshwater ecosystems subject to global warming: A microcosm study. **Water Research. France**. v. 190. 116713. 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116713>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135420312483?via%3Dihub>. Acesso em 03 Jun. 2021.
- AMARAL, Diogo Pereira do; MONTALVÃO, Mateus Flores; MENDES, Bruna de Oliveira; CASTRO, André Luis da Silva; MALAFAIA, Guilherme. Behavioral and mutagenic biomarkers in tadpoles exposed to different abamectin concentrations. **Environmental Science and Pollution Research**. Goiás, 25:12932–12946. 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-1562-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-018-1562-9>. Acesso em 09 Set. 2019
- ANDREA, Mara Mercedes de. O uso de minhocas como bioindicadores de contaminação de solos. **Acta Zoológica Mexicana**. São Paulo, v. 26, n. 2, ISSN 0065-1737, p. 95-107, 2010. Disponível em http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372010000500007&lng=es&nrm=iso. Acesso em 27 de fev. de 2020.
- ARNQVIST, Goran; WOOSTER, David. Meta-analysis: synthesizing research findings in ecology and evolution. **Trends in Ecology & Evolution**. v. 10. n. 6. p. 236-240. 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89073-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89073-4) Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534700890734>. Acesso em 11 de nov. 2021.
- ARRIGHI, Chiara *et al.* Quantification of flood risk mitigation benefits: A building-scale damage assessment through the RASOR platform. **J. Environ Manage**. v. 207, p. 92-104, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.017>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29154012/>. Acesso em 07 Nov. 2020
- ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS. 2013. Disponível em <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>> Acesso em 21 de mai. de 2020.
- AZEVEDO, Fausto Antonio de; CHASIN, Alice Aparecida da Matta. **As Bases Toxicológicas da Ecotoxicologia**. São Carlos. Rima. p. 340, 2003.

BENITEZ, F. Javier; REAL, Francisco J.; ACERO, Juan L.; GARCIA Carolina. Photochemical oxidation processes for the elimination of phenyl-urea herbicides in waters. **Journal of Hazardous Materials**. v. 138. n. 2. p. 278-287. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406005759?via%3Dihub>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.077>. Acesso em 12 jul 2021.

BERA, G. *et al.* Baseline data for distribution of contaminants by natural disasters: results from a residential Houston neighborhood during hurricane Harvey flooding. **Heliyon**. Texas, v. 5. n. 11. p. e02860. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02860>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019365193?via%3Dihub>. Acesso em 06 jun. 2020.

BLOOMFIELD, J. P.; WILLIAMS, R. J.; GOODDY, D. C.; CAPE, J. N.; GUHA, P. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater—a UK perspective. **Science of the Total Environment**. v. 369. n. 1-3. p. 163-177. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969706004128?via%3Dihub>. Acesso em 12 set. 2020.

BOXALL, Alistar B.A. *et al.* Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture. **Environmental Health Perspectives**. United Kingdom. v. 117, n. 4, p. 508-514, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.0800084>. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.0800084>. Acesso em 13 maio 2021.

BRAVO - HERNÁNDEZ, Esmeralda; SAMA, S.S.S.; NANDINI, S. Effect of malathion on the demography of *Daphnia pulex* Leydig and *Diaphanosoma birgei* Korinek (Cladocera). **Journal Environmental Biology**. Jan; 35(1): p. 57-65. 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24579521/>. Acesso em 21 fev. 2020.

CHARLOTTE, CARRIER-BELLEAUT; DROLET, David; MCKINDSAY, Christopher W.; ARCHAMBOULT, Philippe. Environmental stressors, complex interactions and marine benthic communities' responses. **Scientific reports**. Québec, 11, 4194. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83533-1>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-83533-1#citeas>. Acesso em 18 abril 2021.

CHAPRA, Steven C. *et al.* Climate Change Impacts on Harmful Algal Blooms in U.S. Freshwaters: A Screening-Level Assessment. **Environmental Science & Technology**. 51 (16), p. 8933-8943. 2017. DOI: 10.1021/acs.est.7b0149. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b01498>. Acesso em 19 nov. 2020.

CHRISTIDIS, Nikolaos; JONES, Gareth S.; STOTT, Peter A. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heat wave 2015. **Nature Climate Change**. v. 5, p. 46-50. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2468>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate2468#citeas>. Acesso em 12 de dez. 2020.

CLASSIFICAÇÃO DE CODIFICAÇÃO BRASILEIRA DE DESASTRES. Instrução

Normativa nº 2 de dezembro de 2016. Cobrade 2012. Disponível em: <https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Publicacoes/Simbologia%20dos%20Desastres.pdf>. Acesso em 20 de abr. 2020.

CUCO, Ana P.; ABRANTES, Nelson; GONÇALVES, Fernando; WOLINSKA, Justyna; CASTRO, Bruno B. Toxicity of two fungicides in *Daphnia*: is it always temperature dependent? **Ecotoxicology**. Sep, 25 (7): 1376-89. 2016. DOI: 10.1007/s10646-016-1689-8. PMID: 27381036. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27381036/>. Acesso em 23 de jul. 2021.

DAAM, Michiel A. *et al.* Environmental risk assessment of pesticides in tropical terrestrial ecosystems: Test procedures, current status and future perspectives. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. Portugal, v. 181. p. 534-547. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.06.038>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651319306761?via%3Dihub>. Acesso em 11 de ago. 2021.

DABROWSKI, J. M.; PEALL, S. K. C.; REINECKE, A. J.; LIESS, M.; SCHULZ, R. Runoff-related pesticide input into the Lourens River, South Africa: basic data for exposure assessment and risk mitigation at the catchment scale. **Water, Air, and Soil Pollution**. South Africa, 135. p. 265-283. 2002. DOI: doi.org/10.1023/A:1014705931212. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1014705931212#article-info>. Acesso em 13 de fev. 2021.

DELNAT, Vienna; JANSSENS, Lizanne; STOKS, Robby. Whether warming magnifies the toxicity of a pesticide is strongly dependent on the concentration and the null model. **Aquatic Toxicology**. Belgium, v. 211. p. 38-45. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166445X19300682?via%3Dihub>. Acesso em 18 de mar. de 2021.

DINH, Khuong V.; JANSSENS, Lizanne; STOKS, Robby. Exposure to a heat wave under food limitation makes an agricultural insecticide lethal: a mechanistic laboratory experiment. **Global Change Biology**. Belgium, v. 22. n. 10. p. 3361-3372. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13415>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13415>. Acesso em 07 de jul. de 2021.

DISNER, Geonildo Rodrigo *et al.* The toxic effects of Glyphosate, chlorpyrifos, abamectin, and 2,4-D on animal models: a systematic review of Brazilian studies. **Integrated Environmental Assessment and Management**. v. 17. n. 3. p. 507-520. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.4353>. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ieam.4353>. Acesso em 10 de nov. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Mandioca e Fruticultura. **Cultivo de mandioca para região do Cerrado. Uso de Agrotóxicos**. Sistemas de Produção. 8. ISSN 1678-8796. versão eletrônica. 2003. Disponível em

https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_cerrados/agrotoxicos.htm#:~:text=Agrot%C3%B3xicos%20s%C3%A3o%20os%20produtos%20e,de%20ambientes%20urbanos%2C%20h%C3%ADdricos%20e. Acesso em 24 de fev. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. The State of World Biodiversity for Food and Agriculture. **Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessment**. Italy, p. 572. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4060/CA3129EN>. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca3129en>. Acesso em 08 de Jan. de 2020

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Representante da FAO Brasil apresenta cenário da demanda por alimentos**. Brasil, 2017. Disponível em <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/901168/>> Acesso em 15 de jan. de 2020

GOMES, Marcelo Pedrosa; JUNEAU, Philippe. Temperature and light modulation of herbicide toxicity on algal and cyanobacterial physiology. **Frontiers in Environmental Science**. v.5. article 5. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00050>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2017.00050/full>. Acesso em 07 de ago. 2021.

GONZÁLEZ-ALCARAZ, M. NAZARET; GESTEL, CORNELIS A. M. van. Metal/metalloid (As, Cd and Zn) bioaccumulation in the earthworm *Eisenia andrei* under different scenarios of climate change. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v. 215. p. 178-186. 2016. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.05.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749116303918?via%3Dihub>. Acesso em 27 de jul. 2021.

GUEDES, Raul Narciso C.; CUTLER, G. Christiother. Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. **Pest Management Science**. Viçosa, v. 70. n. 5. p. 690-697. 2013. DOI: 10.1002/ps.3669. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.3669>. Acesso em 13 de jul. 2021.

HASENBEIN, Simone; HOLLAND, Erika B.; CONNON, Richard E. Eyes to the Future: Approaches To Assess Pesticide Impact on Surface Waters in a Changing Climate. **Pesticides in Surface Water: Monitoring, Modeling, Risk Assessment and Management**. v. 1308. chapter 10. p. 189-214. 2019. DOI: 10.1021/bk-2019-1308.ch010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-2019-1308.ch010>. Acesso em 28 de ago. 2021.

HOSSAIN, Kaizar; YADAV, Sarita; QUAIK, Shlrene; PANT, Gaurav; MARUTHI, A. Y.; ISMAIL, Norli. Vulnerabilities of macrophytes distribution due to climate change. **Theor Appl Climatol**. Malaysia, 129. p. 1123-1132. 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1837-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-016-1837-3#article-info>. Acesso em 03 de mai. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Special Report:**

Special Report on Climate Change and Land. Chapter 2: Land - Climate Interactions. 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/07/05_Chapter-2-V6.pdf. Acesso em 18 de mai. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Changing State of the Climate System.** In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_02.pdf. Acesso em 11 de ago de 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Impacts of 1.5oC Global Warming on Natural and Human Systems.** Special Report. Chapter 3. n. secretary of IPCC. p. 175-311. 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Chapter3_Low_Res.pdf. Acesso em 12 de abr. 2020.

KNAP, Anthony H., RUSYN Ivan. Environmental exposures due to natural disasters. **Rev Environ Health.** Texas, 31 (1). p. 89-92. 2016. DOI: 10.1515/reveh-2016-0010. Disponível em : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4913349/>. Acesso em 04 Ago. 2021.

KATTWINKEL, Mira; KUHNE, Jan-Valentin; FOIT, Kaarina; LIESS, Matthias. Climate change, agricultural insecticide exposure, and risk for freshwater communities. **Ecol Appl.** Sep. 21(6). 2068–81. 2011. DOI: 10.1890 / 10-1993.1. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21939044/>. Acesso em 11 de ago. 2021.

KLUG, Letícia Becalli; MARENGO, José A.; LUEDEMAN, Gustavo. **Mudanças climáticas e os desafios brasileiros para implementação da Nova Agenda Urbana.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea. Brasília, Capítulo 2. p. 361. 2016. Disponível em <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9184>> Acesso em 08 dez. de 2020.

LONDE, Luciana de Resende; COUTINHO, Marcos Pellegrini; DI GREGÓRIO, Leandro Torres; SANTOS, Leonardo Bacelar Lima; SORIANO, Érico. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente e Sociedade.** v. XVII. 17 n. 4. p. 133-152. 2014. DOI: 10.1590/1809-4422ASOC1082V1742014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/D65yDDZ5kXt5vrpH6PX6QPw/?lang=pt>. Acesso em 25 de jul. 2021.

LOPES, Fernanda Moreira; CALDAS, Sergiane Souza; PRIMEL, Ednei Gilberto; ROSA, Carlos Eduardo da. Glyphosate adversely affects Danio rerio males: Acetylcholinesterase modulation and oxidative stress. **Zebrafish.** v. 14. n. 2. April 1, p. 97-105. 2017. DOI: 10.1089/zeb.2016.1341. Disponível em: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/zeb.2016.1341>. Acesso em 04 de jun. 2021.

LUIZ, Alfredo José Barreto. Meta-análise: definição, aplicações, e sinergia com dados espaciais. **Cadernos de Ciência & Tecnologia.** Brasília, v. 19, n. 3, p. 407-428, set./dez.

2002. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/242765666_Meta-analise_Definicao_aplicacoes_e_s_inergia_com_dados_espaciais. Acesso em 22 Jun. 2021.

MALHI, Gurdeep Singh; KAUR, Manpreet; KAUSHIK, Prashant. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. **Sustainability**. India, v.13. 3. 1318. 2021. DOI: 10.3390/su13031318. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1318#cite>. Acesso em 01 set. 2021.

MATSUO, Yuki *et al.* Development of a novel scheme for rapid screening for environmental micropollutants in emergency situations (REPE) and its application for comprehensive analysis of tsunami sediments deposited by the great east Japan earthquake. **Chemosphere**. Japan, v. 224. p. 39-47. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.078>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519303005?via%3Dihub>. Acesso em 7 de mai. 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Manual de Desastres Naturais**. p. 6. 2002. Disponível em:

https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Desastres_Naturais_Voll.pdf. Acesso em 25 de mai 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Manual de Desastres Tecnológicos**. 2004. p. 13. Disponível em:

<https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/destecnologicos.pdf>. Acesso em 23 de mai. 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Política Nacional de Defesa Civil**. 2000. p. 6. Disponível em:

<http://www.defesacivil.mg.gov.br/images/documentos/Defesa%20Civil/manuais/Pol%C3%AAdtica-Nacional-de-Defesa-Civil.pdf>. Acesso em 05 de jun. 2020.

MODESTO, Kathya A.; MARTINEZ, Cláudia B.R. Roundup causes oxidative stress in liver and inhibits acetylcholinesterase in muscle and brain of the fish *Prochilodus lineatus*.

Chemosphere. Jan 78(3). 294-9. 2010. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.10.047. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19910015/>. Acesso em 5 de jul. 2021.

MOREIRA, Raquel Aparecida *et al.* Exposure to environmental concentrations of fipronil and 2,4-D mixtures causes physiological, morphological and biochemical changes in *Raphidocelis subcapitata*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. São Paulo, v. 206. 111180. 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111180>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651320310198?via%3Dihub>. Acesso em 22 de abr. 2020.

ODUM, Eugene P. **Fundamentos de Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. p. 612.

OGA, Seizi; CAMARGO, Márcia Maria de A.; BATISTUZZA, José Antonio de O. **Fundamentos de Toxicologia**. São Paulo: Editora Atheneu, 4ª Edição. 2014. p. 685.

ORSINI, José Antonio Marengo. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, v. 26, 2ª n. p. 25. 2007. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/mc_globais_efeitos_biodiversidade.pdf. Acesso em 19 de nov. 2019.

PAPPALARDO, Paula; OGLE, Kiona; HAMMAN, Elizabeth A.; BANCE, James R.; HUNGATE, Bruce A.; OSENBURG, Craig W. Comparing traditional and Bayesian approaches to ecological meta-analysis. **Methods in Ecology and Evolution**. v. 11. n. 10. p. 1286-1295. DOI: 10.1111/2041-210X.13445. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/2041-210X.13445>. Acesso em 01 de ago. de 2020

PEACOCK, Simon M. Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducting oceanic mantle? **Geology**. Arizona, April, v. 29, no. 4, p. 299-302. 2001. < [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0299:ATLPOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0299:ATLPOD>2.0.CO;2) >

PEREIRA, Cecília M. S.; DERUYTTER, David; BLUST, Ronny; SCHAMPHELAERE, Karel A.C. de. Effect of temperature on chronic toxicity of copper, zinc, and nickel to *Daphnia magna*. **Environmental toxicology and chemistry**. Belgium, v. 36 no. 7. p. 1909-1916. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3714>. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etc.3714>. Acesso em 7 de dez. 2019.

ROBISON, Stacey A. et al. Clothianidin alters leukocyte profiles and elevates measures of oxidative stress in tadpoles of the amphibian, *Rana pipiens*. **Environmental Pollution**. Canadá, v. 284. p. 117-149. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117149>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121007314?via%3Dihub>. Acesso em 28 de mai. 2020.

ROEVER, Leonardo. **Guia Prático de Revisão Sistemática e Meta-análise**. Rio de Janeiro: Thieme Revinter, 2020. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=w0LWDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8&dq=LEONARDO+ROEVER.+Guia+Pr%C3%A1tico+de+Revis%C3%A3o+Sistem%C3%A1tica+e+Metan%C3%A1lise.+2020&ots=_ZUEfRHTjt&sig=9B8sVxELSwFhmngmUMgwUUMnwgA#v=onepage&q=LEONARDO%20ROEVER.%20Guia%20Pr%C3%A1tico%20de%20Revis%C3%A3o%20Sistem%C3%A1tica%20e%20Metan%C3%A1lise.%202020&f=false. Acesso em 27 ago. 2021.

ROSSATI, Antonella. Global Warming and Its Health Impact. **The International Journal of Occupational and Environmental Medicine**. Italy, v. 8 (1), p. 7-20, 2017. DOI: doi: 10.15171/ijoem.2017.963. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6679631/>. Acesso em 15 de dez. 2020

SILVA, Marlene Rodrigues da; CAMPOS, Ana Caroline Estrope de; BOHM, Franciele Zanardo. Agrotóxicos e seus impactos sobre ecossistemas aquáticos continentais. **Sabios-Revista de Saúde e Biologia**. Paraná, v. 8. n. 2. p. 46-58. 2013. Disponível em: <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/view/899/519>. Acesso em 14 de out. 2019.

SILVA, Vera *et al.* Combined Effect of copper sulfate and water temperature on key freshwater trophic levels – Approaching potential climatic change scenarios. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. Portugal, v. 148. p. 384-392. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651317307054?via%3Dihub>. Acesso em 13 de ago. de 2020.

SINGH, Rajat; SHWETA, Prabhu; ALEENA, Molath. Consumption, health impact and detection of pesticides: A mini-review. **Biotechnology, Food and Agriculture Spectrum Journal**. India, v. 2. n. 2. p. 81-84. 2021. Disponível em: <https://fasj.org/index.php/fasj/article/view/79/128>. Acesso em 04 de set. 2021.

SOKOLOVA, Inna M.; LANNING, Gisela. Interactive effects of metal pollution and temperature on metabolism in aquatic ectotherms: Implications of global climate change. **Inter-Research Science Publisher**. v. 37, n. 2-3, p. 181–201, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr00764>. Disponível em: <https://doi.org/10.3354/cr00764>. Acesso em 7 set. 2021.

THE INTERNATIONAL DISASTERS DATABASE – EM DAT. **Cred Crunch 61 – Human Cost of Disasters (2000-2019)**. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED. Disponível em: <https://www.emdat.be/publications>. Acesso em 15 de jan. 2021

TUNDISI, José Galízia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, reimpressão revisada. 2013. p. 505,508, 526, 532, 534, 2013.

VASCONCELOS, Ana M.; DAAM, Michiel A.; RESENDE, Juliane C. DE; Casali-Pereira, Maressa P.; ESPÍNDOLA, Evaldo L.G. Survival and development of bullfrog tadpoles in microcosms treated with abamectin. **Ecotoxicology**. Brasil, v. 26. n. 6. p. 729-737. DOI: 10.1007/s10646-017-1804-5. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28409414/>. Acesso em 28 de mai. 2021.

VLIET, Van Michelle T. H. et al. Global river discharge and water temperature under climate change. **Global Environmental Change**. Netherlands, v. 23. n. 2. p. 450-464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378012001331?via%3Dihub>.

Acesso em 5 de set. 2021.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION – UNDRR. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction - GAR** – Chapter 15: Disaster risk reduction strategies in fragile and complex risk contexts. 2020. Disponível em <<https://gar.undrr.org/>> Acesso em 4 de ago de 2021.