LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

PESQUISA BRASILEIRA SOBRE A TOXICOLOGIA DE PESTICIDAS EM PEIXE-ZEBRA (*Danio Rerio*): UMA PERSPECTIVA CIENCIOMÉTRICA DA PÓS-GRADUAÇÃO

https://doi.org/10.56238/levv16n47-016

Data de submissão: 08/03/2025 **Data de publicação:** 08/04/2025

Alice Estivalet Visentini
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas: Bioquímica Toxicológica, Laboratório de Toxicologia Aquática; Santa Maria – RS, Brasil
E-mail: Visentini.alice@acad.ufsm.br
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-4559-4807
Lattes http://lattes.cnpq.br/0912925464375401

Claudia Smaniotto Barin
Universidade Federal de Santa Maria, Professor, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Química; Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil

Maiara Dorneles Costa
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas: Bioquímica Toxicológica, Laboratório de Toxicologia Aquática; Santa Maria – RS, Brasil

Carlos Eduardo Ratzinger Costodio
Universidade Federal de Santa Maria, Professor, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária; Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil

Mayck Souza de Oliveira
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas: Bioquímica Toxicológica, Laboratório de Toxicologia Aquática; Santa Maria – RS, Brasil

Kássia Silveira Crivellaro
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas: Bioquímica Toxicológica, Laboratório de Toxicologia Aquática; Santa Maria – RS, Brasil

Vania Lucia Loro
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas: Bioquímica Toxicológica, Laboratório de Toxicologia Aquática; Santa Maria – RS, Brasil
E-mail: Vania.loro@ufsm.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9935-6338
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6392817606416780

RESUMO

O uso de pesticidas para o manejo de pragas remonta aos tempos antigos e, com a expansão agrícola, seu uso continua inevitável. Apesar disso, nas últimas décadas, os efeitos tóxicos dos pesticidas sobre o meio ambiente e organismos não-alvo tornaram-se uma preocupação global significativa. Nesse contexto, esta revisão cienciométrica mapeia a produção científica brasileira nos programas de pós-graduação sobre a toxicologia de pesticidas no modelo animal peixe-zebra (*Danio rerio*), utilizando

estatísticas descritivas para identificar tendências e lacunas. Com base em trabalhos indexados na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, resultantes da busca com as palavras-chave (Peixe-zebra OR peixe-zebra OR *Danio rerio* OR zebrafish) AND (pesticidas OR herbicidas OR fungicidas OR agrotóxicos), foram selecionados 57 estudos (2005–2024). Desde 2005, ano do primeiro estudo selecionado, até 2024, observa-se um crescimento na produção científica relacionada ao tema. Esse crescimento reflete as políticas da CAPES, que visam fortalecer redes inter-regionais de pesquisa e fomentar a colaboração entre instituições e pesquisadores. Além disso, este estudo destaca as regiões brasileiras e os autores com contribuições significativas na área. O conhecimento sobre diferentes parâmetros promove colaborações e avanços no entendimento dos efeitos tóxicos dos pesticidas atualmente em uso.

Palavras-chave: Análise bibliométrica. Pós-graduação brasileira. Contaminação ambiental. Pesquisa brasileira.

1 INTRODUÇÃO

O uso de substâncias para proteger as lavouras contra pragas tem origens antigas. Inicialmente, essas substâncias eram compostas por produtos naturais, como enxofre, óleos vegetais e minerais ou cinzas. Com o tempo, diversos compostos com diferentes toxicidades começaram a ser utilizados, muitas vezes sem preocupação com seus efeitos. Os avanços científicos levaram ao desenvolvimento dos primeiros pesticidas sintéticos, como a calda bordalesa e compostos à base de arsênio, seguidos por compostos orgânicos, como o Dicloro-Difenil-Tricloroetano (DDT) (Gerber et al., 2021).

O Brasil, por ser um país tropical com vasta extensão territorial, apresenta condições favoráveis para atividades agrícolas em larga escala, o que levou o país a se tornar o maior consumidor mundial de pesticidas em 2008. Atualmente, o país ainda responde por aproximadamente 20% do consumo global de pesticidas (Sanchez et al., 2017). Apenas nas últimas décadas, a preocupação com os impactos ambientais e os efeitos tóxicos sobre a saúde e organismos não-alvo, como os animais que compõem os ecossistemas ao redor, ganhou importância na pesquisa científica. Desde então, a busca pelo conhecimento sobre a toxicologia dos pesticidas tornou-se essencial para prevenir impactos ambientais e manter a saúde dos ecossistemas (Pathak et al., 2022).

Apesar dos riscos, o uso de pesticidas permanece essencial para a agricultura, pois permite o controle de pragas, doenças e plantas daninhas que, de outra forma, poderiam devastar significativamente as colheitas. Com o crescimento da população global, a demanda por alimentos também aumentou. Nesse contexto, os pesticidas possibilitam a produção em larga escala, garantindo a segurança alimentar global—um feito que não seria alcançável sem seu uso (Leskovac et al., 2023). No entanto, apesar de sua necessidade, os pesticidas trazem diversas complicações ambientais e de saúde, especialmente quando utilizados de forma inadequada (Damalas et al., 2011; Marins et al., 2021). Embora a pesquisa sobre substâncias utilizadas como pesticidas tenha avançado nas últimas décadas, a legislação muitas vezes não acompanha o ritmo das descobertas científicas. Consequentemente, aliados ao uso inadequado, os efeitos adversos sobre organismos não-alvo tornaram-se cada vez mais expressivos, evidenciando, em alguns casos, a bioacumulação de pesticidas (Clasen et al., 2018; Khoshnood et al., 2023; Kumar et al., 2023).

Diante desse cenário, pesquisas têm utilizado organismos bioindicadores para avaliar os efeitos tóxicos de diversas substâncias empregadas como pesticidas. Entre esses organismos, o peixe-zebra (*Danio rerio*) se destaca como um modelo para testar biomarcadores e verificar a toxicidade dos pesticidas. O genoma do peixe-zebra foi totalmente sequenciado em 2013, revelando que aproximadamente 70% de seus genes possuem equivalentes humanos (Howe et al., 2013; Guerra et al., 2021). Além disso, o peixe-zebra pode bioacumular substâncias tóxicas mesmo em baixas concentrações e é suscetível a mutações. Por essas razões, esse modelo tem sido cada vez mais

utilizado no desenvolvimento de estudos toxicológicos envolvendo pesticidas (Bambino et al., 2017; Guerra et al., 2021).

Assim, esta revisão cienciométrica tem como objetivo mapear as pesquisas da pós-graduação brasileira envolvendo a toxicologia de pesticidas (fungicidas, herbicidas e inseticidas) e o modelo *Danio rerio*. Este estudo fornecerá insights sobre tendências emergentes, regiões líderes em pesquisa na área, substâncias mais estudadas, aplicações do modelo peixe-zebra e possíveis lacunas no conhecimento existente.

2 METODOLOGIA

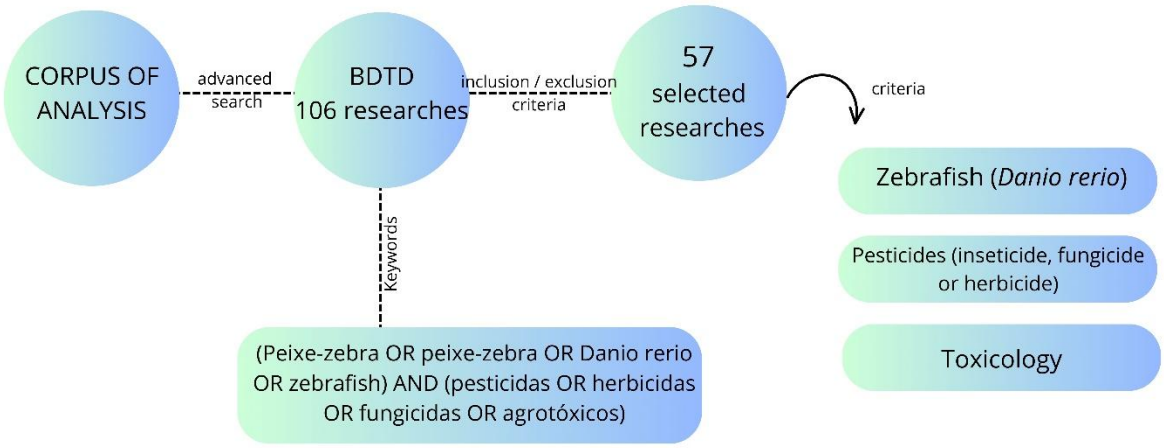
2.1 FONTES DE PESQUISA, IDENTIFICAÇÃO E CRITÉRIOS DE INCLUSÃO DOS ESTUDOS

Este estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica com abordagem cienciométrica, caracterizada por um delineamento descritivo e de natureza quali-quantitativa. A cienciometria é um ramo da ciência que permite compreender tendências e lacunas na produção científica por meio de indicadores de produção, autoria, entre outros (Spinak, 1998). Nesse sentido, foi realizada uma busca na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) para identificar estudos que investigam a toxicologia de pesticidas utilizando o peixe-zebra como modelo animal. Os seguintes termos de busca foram utilizados: (*Peixe-zebra OR peixe-zebra OR Danio rerio OR zebrafish) AND (pesticidas OR herbicidas OR fungicidas OR inseticidas OR agrotóxicos*).

A busca foi realizada sem uma data inicial predefinida, com palavras-chave pesquisadas em português e parcialmente em inglês. A pesquisa foi conduzida em 2 de outubro de 2024 e retornou 106 estudos. A seleção dos estudos seguiu os critérios de exclusão previamente estabelecidos, que foram: 1) Uso de pesticidas (herbicidas, fungicidas ou inseticidas); 2) Modelo animal peixe-zebra (*Danio rerio*); 3) Envolvimento com a toxicologia de pesticidas. Após a análise, foram excluídos: 22 estudos por não utilizarem nenhum tipo de pesticida; 14 estudos por não envolverem a espécie *D. rerio*; 3 estudos por não utilizarem nem a espécie *Danio rerio* nem pesticidas;10 estudos por não abordarem a toxicologia de pesticidas.

Foram selecionados apenas estudos que atenderam aos critérios mencionados acima e abordaram diretamente a toxicidade de pesticidas no peixe-zebra (*D. rerio*). Após a aplicação dos critérios de exclusão, o corpus de análise foi estabelecido, resultando em 57 estudos incluídos nesta revisão, conforme ilustrado no fluxograma abaixo (Figura 1).

Figura 1 - Fluxograma do corpus da análise cienciométrica.



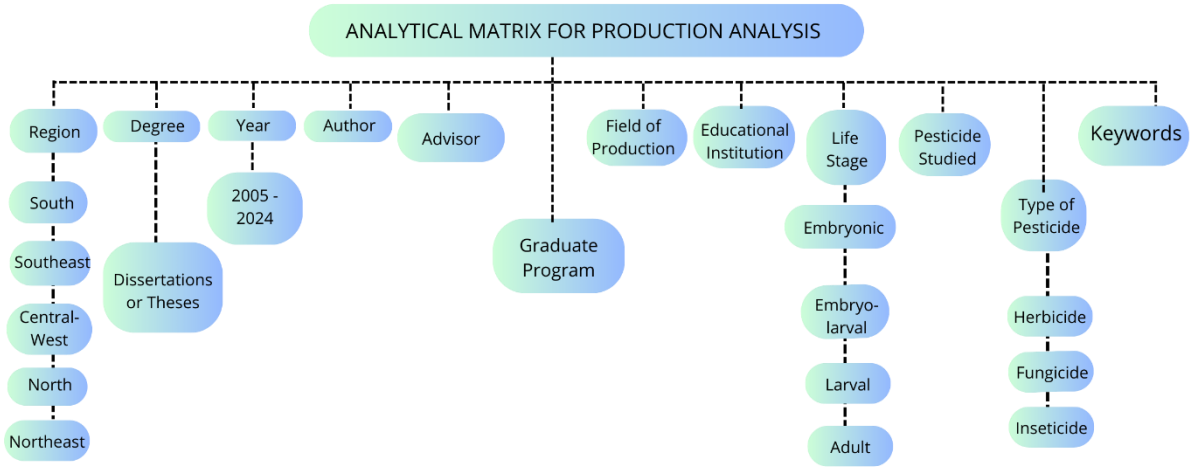
Legenda: BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações).

2.2 EXTRAÇÃO DE DADOS

O Microsoft Excel 365® foi utilizado para compilar o banco de dados das teses e dissertações incluídas, bem como para a criação de tabelas e figuras. Todos os resultados da busca considerados foram tabulados em uma planilha digital.

O conjunto de dados foi estruturado para incluir as seguintes informações: Título, Ano, Autor, Tipo de Trabalho, Orientador, Programa de Pós-Graduação, Área de Estudo, Distribuição Regional, Instituição, Palavras-chave, Estágio de Vida do Peixe-Zebra, Tipo de Pesticida Utilizado e Nome do Pesticida, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Categorização do conteúdo da produção acadêmica: Matriz analítica das produções.



2.3 ANÁLISE DE DADOS

Os dados foram obtidos, coletados, organizados e analisados com base em estatísticas descritivas, que têm como objetivo inferir o comportamento da população por meio da construção de tabelas, gráficos e indicadores numéricos (Farias et al., 2006). Os resultados foram quantificados e discutidos com o auxílio de representações visuais.

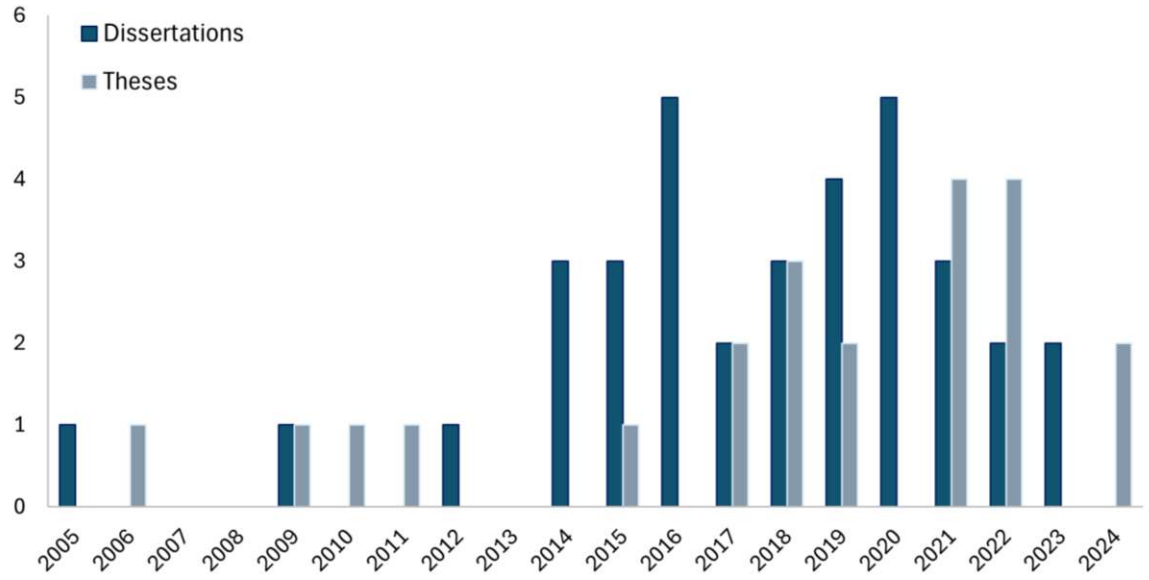
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise cienciométrica permite compreender como a pesquisa avança em uma área específica. Este estudo foca no campo da toxicologia de pesticidas, com ênfase em herbicidas, inseticidas e fungicidas que afetam a espécie D. rerio. Com base nos critérios quali-quantitativos previamente estabelecidos, os resultados da análise são apresentados a seguir.

Após a análise de relevância, foram selecionados 57 estudos. Dentre esses, a maioria das produções corresponde a dissertações, representando 61% (35) do total, enquanto 39% (22) são teses. Como esperado, o número de teses é menor do que o de dissertações, uma vez que o tempo e a profundidade exigidos para a pesquisa de doutorado (48 meses) são significativamente maiores do que para a pesquisa de mestrado (24 meses).

Com base nessa análise inicial, também é possível estabelecer uma visão geral do crescimento do número de dissertações e teses sobre o tema analisado ao longo dos anos, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição de Dissertações e Teses por Ano.



Fonte: derivado das teses e dissertações selecionadas nesta revisão.

Conforme observado na Figura 3, a primeira pesquisa sobre o tema desta revisão data de 2005 na base de dados da BDTD. Embora nenhum limite temporal específico tenha sido estabelecido, a tecnologia permite acesso a estudos relativamente recentes nesta plataforma de busca. Isso ocorre porque muitas dissertações e teses anteriores ao ano 2000 podem não ter sido incluídas na plataforma devido a limitações tecnológicas da época.

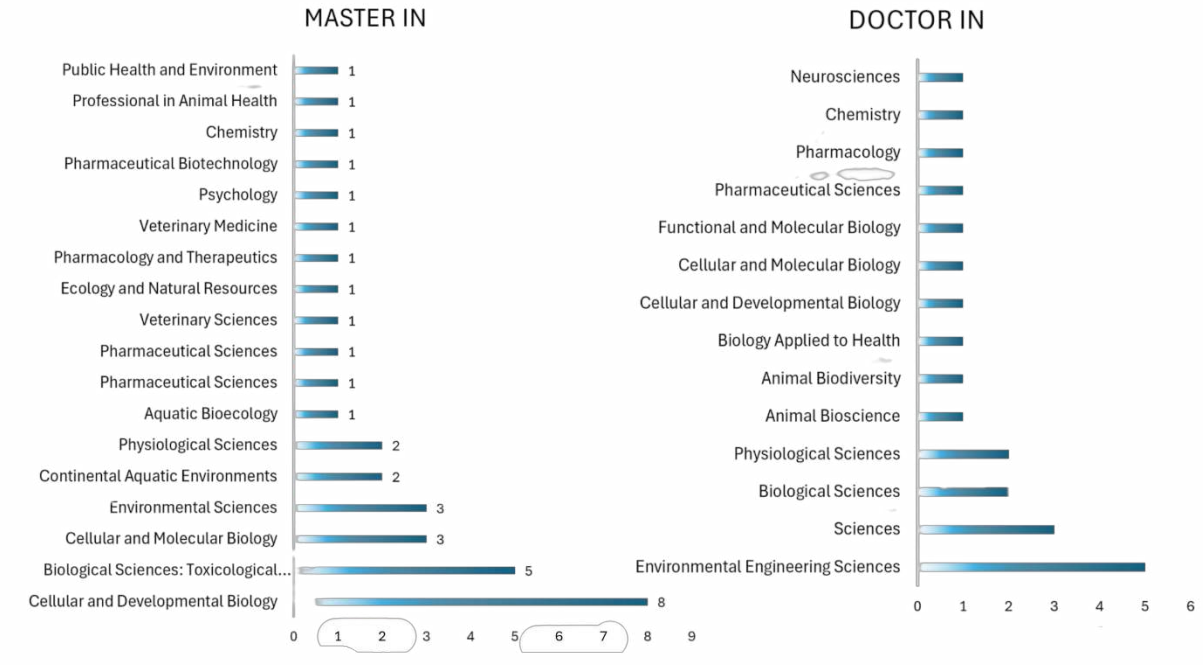
Apesar do crescimento no número de dissertações e teses, observa-se um aumento mais expressivo no número de teses. Esse crescimento reflete a maturação da pesquisa científica no Brasil, incentivada pela CAPES por meio de seus diversos programas. A ênfase na pesquisa doutoral é relevante, pois espera-se que produza descobertas de maior impacto, devido à exigência de

originalidade, impulsionando o avanço científico.

Há uma tendência clara de crescimento nesta área de pesquisa, especialmente na última década (Chelinho et al., 2019; Brühl et al., 2019; Cezarette et al., 2024; EEA, 2023). Em 2021, ano com o maior número de estudos na área, sete pesquisas de pós-graduação foram desenvolvidas sobre esse tema. Com o crescimento e os incentivos para a pós-graduação, fica evidente que o tema desta revisão se destaca e está em rápida expansão. Esse aumento nas pesquisas é fundamental para compreender como o uso de pesticidas afeta organismos não-alvo e para estabelecer limites mais seguros para sua aplicação. Dessa forma, esses estudos possibilitam a melhoria da legislação vigente, que muitas vezes se mostra inadequada, contribuindo para a prevenção de danos a espécies não-alvo e para o fortalecimento da preservação ambiental relacionada ao uso desses compostos tóxicos.

Com a crescente relevância da toxicologia de pesticidas em *D. rerio*, mais programas de pós-graduação (PG) passaram a incorporar essa temática em suas pesquisas. Além disso, as áreas que desenvolvem estudos sobre o assunto se ampliaram, resultando em um maior número de titulações associadas a essa linha de pesquisa. Sendo um tema multidisciplinar, ele pode ser integrado a diferentes abordagens científicas. Assim, foi realizada uma análise quali-quantitativa dos tipos de titulação oferecidos pelos PG, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Quantificação dos títulos concedidos pelos Programas de Pós-Graduação em pesquisas sobre a toxicologia de pesticidas em peixe-zebra (*Danio rerio*).



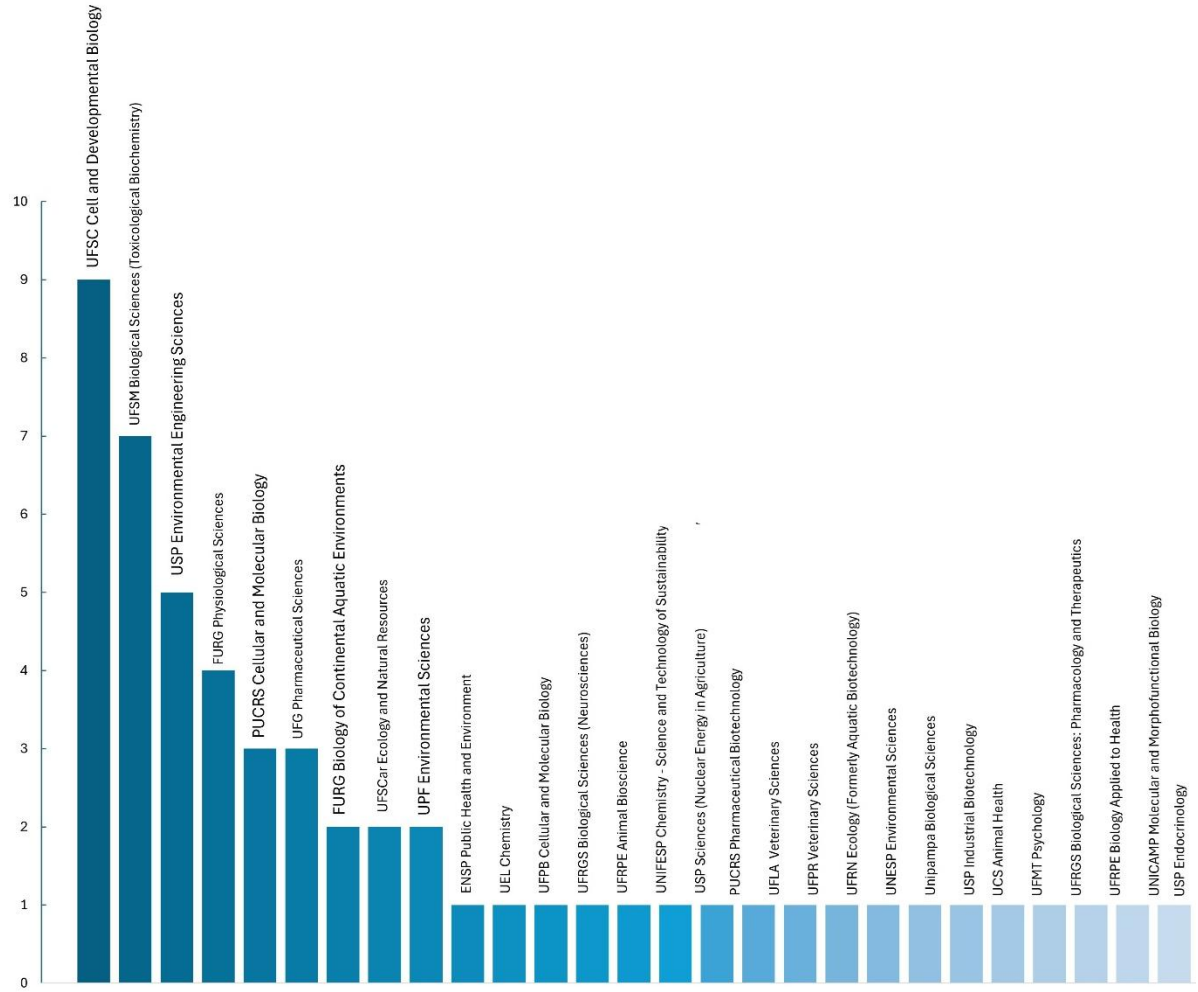
Fonte: derivado das teses e dissertações selecionadas nesta revisão.

A diversidade de titulações envolvendo o tema de pesquisa desta revisão é notável, como mostrado na Figura 4. Essas adaptações por parte das instituições de ensino superior refletem as demandas associadas à evolução científica da área, levando a um aumento na produção de pesquisas

(Sposito et al., 2018; Gonçalves et al., 2020; Guerra et al., 2021). Outra explicação reside na diversidade de programas que incorporam esse tema, uma vez que ele é altamente relevante atualmente e abrange aspectos de diversas áreas em seu desenvolvimento. A interdisciplinaridade não só enriquece a formação acadêmica, mas também contribui para a busca de soluções mais integradas e eficazes. À medida que áreas como Saúde Pública e Engenharia Ambiental passam a se envolver mais com a pesquisa sobre pesticidas, a inovação e a aplicação dos resultados são ampliadas.

Da mesma forma, foi realizada uma análise qualitativo-quantitativa das instituições e dos programas de pós-graduação (PPGs) responsáveis por esses estudos, conforme ilustrado na Figura 5. A instituição com o PPG que mais contribuiu com estudos na área de toxicologia de pesticidas em *D. rerio* foi a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A quantificação revelou que a UFSC produziu um total de nove estudos em nível de pós-graduação por meio do seu PPG em Biologia Celular e do Desenvolvimento. Outro contribuinte notável é o PPG em Ciências Biológicas (Bioquímica Toxicológica) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que produziu um total de sete estudos. Fica evidente que outros programas de pós-graduação passaram a se inserir na pesquisa sobre toxicologia de pesticidas em *D. rerio*.

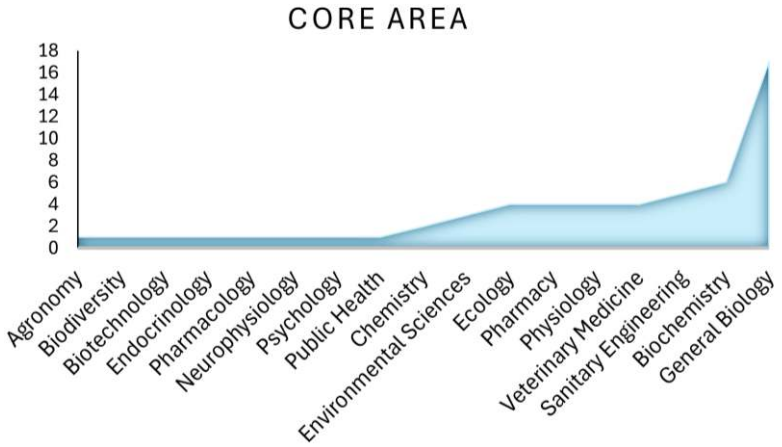
Figura 5 - Quantificação dos Programas de Pós-Graduação e suas respectivas instituições.



Fonte: *Sucupira* Platform - *CAPES*.

Além disso, foram analisadas as áreas de conhecimento de cada PPG listadas na Plataforma Sucupira, que hospeda as dissertações e teses revisadas neste estudo. Essa análise proporcionou uma visão mais específica dessas áreas para compreender os interesses da comunidade científica em relação à toxicologia de pesticidas em *Danio rerio*. Os dados quantificados são apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Distribuição das principais áreas das teses e dissertações.

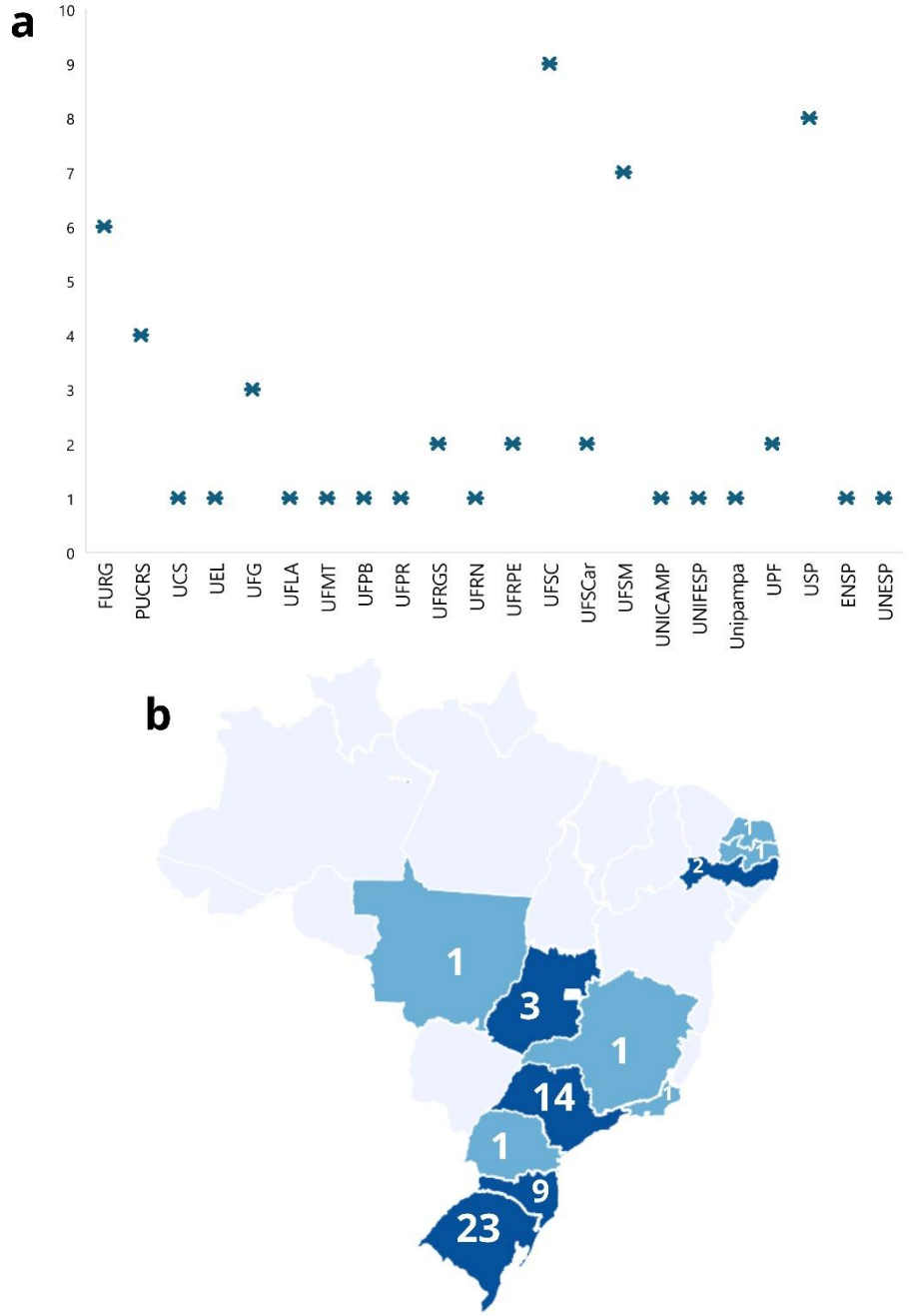


Fonte: *Sucupira* Platform - *CAPES*.

A área principal que predomina é a Biologia Geral. Embora o tema da toxicologia de pesticidas em *D. rerio* possa abranger diversos campos de estudo para seu desenvolvimento (biologia, química, agronomia, engenharia ambiental, entre outros), sua base continua sendo a Biologia em termos de conteúdo. No entanto, outras áreas também passaram a incorporá-lo, como a Bioquímica (6 trabalhos) e a Engenharia Sanitária (5 trabalhos), devido às oportunidades de desenvolvimento que o tema proporciona.

Com base nos dados, foi realizada uma análise para identificar quais instituições são mais ativas na pesquisa sobre toxicologia de pesticidas em *D. rerio* e quais regiões estão conduzindo mais estudos nessa área. Isso permite mapear nichos de pesquisa no país e áreas emergentes. As instituições e regiões mapeadas podem ser vistas nas Figuras 7a e 7b.

Figura 7 - a. Instituições de origem das dissertações e teses; **b.** Distribuição da pesquisa por estado no Brasil.



Fonte: dados obtidos a partir das teses e dissertações selecionadas nesta revisão.

A CAPES tem investido na descentralização da pesquisa no Brasil, visando equilibrar os investimentos para promover o desenvolvimento científico. Como resultado, a tendência é que regiões historicamente sub-representadas na pesquisa, como o Nordeste, Norte e Centro-Oeste, apresentem crescimento. Conforme mostrado na Figura 7.B, as regiões Nordeste e Centro-Oeste estão promovendo cada vez mais pesquisas envolvendo a toxicologia de pesticidas em *D. rerio* dentro de seus programas de pós-graduação. Embora a maior parte das pesquisas nessa área ainda esteja concentrada nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, o crescimento em outras regiões é evidente por meio da inclusão de instituições do Nordeste e Centro-Oeste.

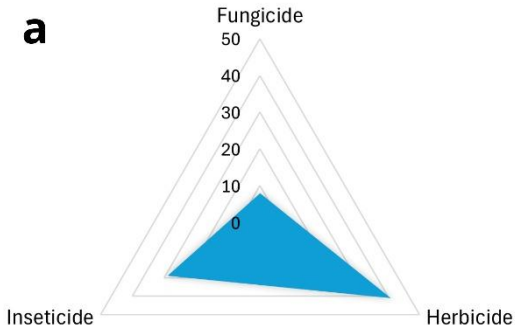
O progresso destacado nesta revisão reflete os investimentos da CAPES na estimulação de

polos de pesquisa em todo o país e no fortalecimento dos programas de pós-graduação em áreas que anteriormente possuíam menos infraestrutura e suporte financeiro (Schwartzman, S., 2022). Além disso, a CAPES e outras agências de fomento têm investido em programas específicos para apoiar regiões com menos recursos, como o Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (PDPG), que busca aprimorar a capacitação e a produção acadêmica nessas regiões. Essas iniciativas estão ajudando a construir uma base científica sólida no Nordeste e Centro-Oeste, possibilitando a expansão de temas multidisciplinares como a toxicologia de pesticidas, que pode abranger desde ecologia regional até saúde pública.

O crescimento da pesquisa em diversas regiões do Brasil fomenta o surgimento de redes colaborativas entre universidades de diferentes localidades. Dessa forma, instituições do Norte e Nordeste poderiam colaborar com universidades do Sul e Sudeste, que possuem infraestrutura mais avançada, para realizar estudos sobre a toxicidade de pesticidas em ambientes amazônicos ou semiáridos, fortalecendo a produção científica com diversas perspectivas regionais.

Dando continuidade às discussões, outro dado relevante para compreender o panorama da produção científica sobre o tema desta revisão é a análise qualitativa e quantitativa dos pesticidas pesquisados. A partir da análise dos estudos incluídos, foram mapeados os tipos (fungicida, inseticida ou herbicida) e os nomes específicos dos pesticidas investigados. Essa análise está ilustrada na Figura 8 a; b.

Figura 8 - a. Quantificação do tipo de pesticida (fungicida, inseticida ou herbicida) utilizado nas teses e dissertações; **b.** Mapeamento dos pesticidas utilizados nas teses e dissertações. Legenda: HB (herbicida à base de); IN (inseticida à base de); FB (fungicida à base de).





Fonte: dados obtidos a partir das teses e dissertações selecionadas nesta revisão.

A análise dos tipos e nomes dos pesticidas investigados nos estudos indica uma predominância de herbicidas, particularmente glifosato e 2,4-D. Essa prevalência se deve ao seu uso extensivo na agricultura brasileira e à crescente preocupação com os impactos ambientais e toxicológicos desses compostos. No entanto, essa concentração de pesquisas em herbicidas também revela lacunas que podem orientar estudos futuros. Embora os herbicidas predominem, outros tipos de pesticidas, como inseticidas e fungicidas, têm sido estudados em menor escala, especialmente em organismos aquáticos como o peixe-zebra. No contexto brasileiro, onde o uso de inseticidas é significativo na agricultura, estudos mais aprofundados sobre seus efeitos tóxicos em organismos não-alvo poderiam ser valiosos.

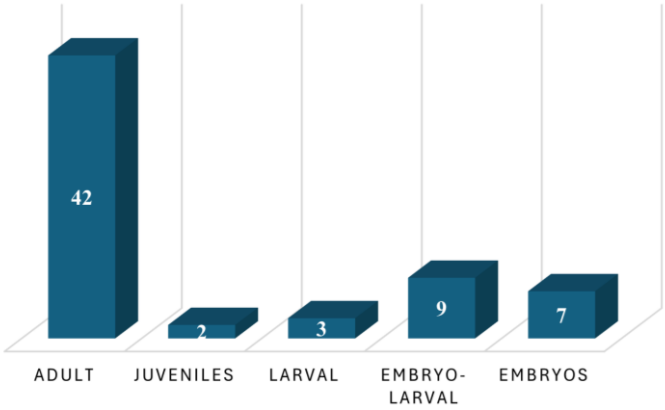
Outro aspecto relevante é a falta de estudos sobre os efeitos combinados de diferentes tipos de pesticidas, como misturas de herbicidas e inseticidas, que podem interagir sinergicamente e resultar em efeitos tóxicos mais pronunciados do que aqueles causados por cada substância isoladamente. Essa questão é particularmente relevante em ambientes agrícolas brasileiros, onde a aplicação simultânea de múltiplos pesticidas na mesma área é comum. Estudos avaliando a toxicidade dessas misturas em peixe-zebra ou outros organismos modelo poderiam ampliar a compreensão dos riscos ecotoxicológicos envolvidos, fornecendo dados críticos para uma melhor regulamentação e gestão de pesticidas.

Com base nos dados da Figura 8.b, observou-se que os efeitos toxicológicos de herbicidas à base de glifosato, seu composto puro e o ácido 2,4-diclorofenoxiacético são os mais estudados em pesquisas de pós-graduação. Apesar de seus benefícios no controle de ervas daninhas, preocupações têm surgido em relação à toxicidade desses compostos para o meio ambiente e espécies não-alvo (Fiorino et al., 2018; Oliveira et al., 2024). Como resultado, esses compostos têm sido destacados em

pesquisas com peixe-zebra, pois são um alvo indireto de seus efeitos tóxicos e servem como um modelo com significativa similaridade genômica com humanos (Lopes et al., 2018). A partir dos resultados, pode-se inferir que pesquisas sobre os efeitos crônicos e de longo prazo de compostos como glifosato e 2,4-D representam uma área que poderia ser mais explorada. A maioria dos estudos se concentra em efeitos agudos, mas há uma necessidade de estudos que examinem a exposição prolongada em organismos aquáticos, o que refletiria melhor cenários de contaminação contínua em rios e lagos próximos a áreas agrícolas.

Outro parâmetro de interesse para quantificação envolvendo a toxicologia de pesticidas é o estágio de vida do modelo utilizado, neste caso, o peixe-zebra. Esse modelo é notável por seu desenvolvimento rápido e transparência durante o estágio embrio-larval, permitindo o monitoramento do desenvolvimento morfológico. Assim, os estudos foram quantificados com base nos estágios de vida utilizados para testes de toxicidade: embrião, embrio-larval, larval, juvenil e adultos, como mostrado na Figura 9. Pode-se inferir que a maioria das pesquisas é conduzida utilizando peixe-zebra adultos. No entanto, espera-se que o uso de embriões cresça devido às suas vantagens.

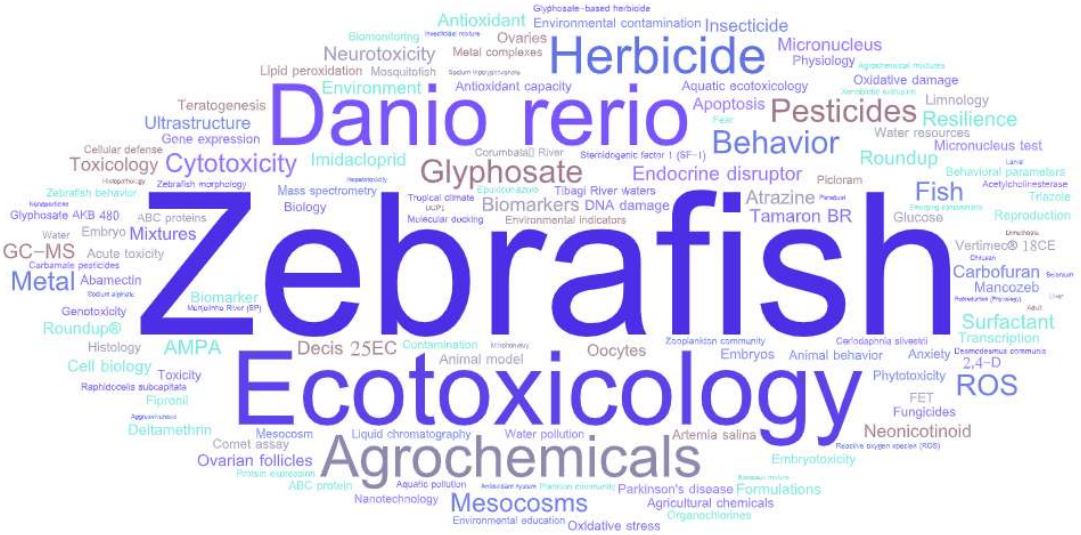
Figura 9 - Estágios de vida do peixe-zebra (*Danio rerio*) utilizados em pesquisas envolvendo toxicologia de pesticidas.



Fonte: dados obtidos a partir das teses e dissertações selecionadas nesta revisão.

Um dos indicadores mais importantes presentes nos estudos são as palavras-chave. Uma análise qualitativa das palavras-chave e sua coocorrência fornece insights sobre os tópicos de pesquisa e destaca tendências (Zuanazzi et al., 2020). Dessa forma, as palavras-chave dos estudos foram analisadas, e uma nuvem de palavras foi criada utilizando o programa WordArt®. As nuvens de palavras oferecem uma visão geral dos principais tópicos mencionados nos estudos, facilitando a compreensão de grandes volumes de dados. A nuvem de palavras pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 - Nuvens de palavras das palavras-chave extraídas das dissertações e teses incluídas nesta revisão.



A partir da nuvem de palavras gerada, é possível visualizar e identificar rapidamente os principais focos temáticos dos estudos. Os termos *Zebrafish*, *Danio rerio* e *Ecotoxicologia* foram frequentemente citados, juntamente com nomes de pesticidas, permitindo inferências sobre o tópico abordado nesta revisão por meio da visualização da nuvem de palavras. Estudos ecotoxicológicos parecem se destacar dentro da toxicologia de pesticidas. A ênfase em termos associados à ecotoxicologia também indica uma abordagem que vai além do impacto direto dos pesticidas, abordando o destino e os efeitos dos poluentes no ambiente e em organismos não-alvo, como o peixe-zebra. Essa visão geral sugere que os pesquisadores estão cada vez mais interessados em parâmetros que refletem realidades ambientais, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e conservação promovidas por agências de fomento, como a CAPES. Assim, a nuvem de palavras serve como uma ferramenta valiosa para fornecer uma visão geral dos estudos e identificar lacunas de pesquisa.

4 CONCLUSÃO

Esta revisão cienciométrica fornece insights sobre tendências emergentes e desafios relacionados à toxicidade de pesticidas em peixe-zebra (*Danio rerio*) e identifica lacunas existentes na pesquisa. Os resultados destacam o crescimento dos estudos ecotoxicológicos, refletindo uma preocupação global com a saúde ambiental e o impacto de compostos químicos nos ecossistemas aquáticos. A prevalência de estudos focados na toxicidade de herbicidas, particularmente compostos como glifosato e 2,4-D, reforça a relevância desses pesticidas devido ao seu uso generalizado na agricultura brasileira e suas potenciais implicações ambientais. Além disso, a análise regional indica um aumento gradual de pesquisas em áreas como o Centro-Oeste e o Nordeste, sugerindo uma expansão das capacidades de pesquisa nessas regiões. Os dados fornecidos também facilitam a formação de redes cooperativas entre instituições e seus respectivos pesquisadores.

Ao oferecer uma visão geral das palavras-chave mais frequentemente utilizadas, a nuvem de palavras destaca a predominância de termos essenciais, refletindo o foco central dos estudos e sugerindo uma abordagem consolidada em temas relevantes. No entanto, também identifica áreas que merecem maior exploração, como biomarcadores específicos e processos de bioacumulação. Assim, esta revisão não apenas contribui para visualizar o progresso científico na toxicologia de pesticidas, mas também traça direções estratégicas para futuras investigações e políticas de incentivo, visando o desenvolvimento sustentável e integrado da pesquisa científica no Brasil.

REFERÊNCIAS

BAMBINO, K.; CHU, J. Zebrafish in toxicology and environmental health. Current Topics in Developmental Biology, v. 124, p. 331-367, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2016.10.007.

BRÜHL, C. A.; ZALLER, J. G. Biodiversity decline as a consequence of an inappropriate environmental risk assessment of pesticides. Frontiers in Environmental Science, v. 7, 2019. Artigo 464007.

CEZARETTE, G. N.; SOUZA, M. C. O.; ROCHA, B. A.; GONZÁLEZ, N.; NADAL, M.; DOMINGO, J. L.; BARBOSA, F. Levels and health risk assessment of twenty-one current-use pesticides in urban and riverside waters of the Brazilian Amazon Basin. Environmental Research, v. 252, pt. 3, 2024. 119027. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119027.

CLASEN, B.; LORO, V. L.; MURUSSI, C. R.; TIECHER, T. L.; MORAES, B.; ZANELLA, R. Bioaccumulation and oxidative stress caused by pesticides in Cyprinus carpio reared in a rice-fish system. Science of the Total Environment, v. 626, p. 737-743, 2018.

DAAM, M. A.; CHELINHO, S.; NIEMEYER, J. C.; OWOJORI, O. J.; DE SILVA, P. M. C. S.; SOUSA, J. P.; VAN GESTEL, C. A. M.; RÖMBKE, J. Environmental risk assessment of pesticides in tropical terrestrial ecosystems: Test procedures, current status and future perspectives. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 181, p. 534-547, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.06.038.

DAMALAS, C. A.; ELEFTHEROHORINOS, I. G. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 8, n. 5, p. 1402-1419, 2011.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. How pesticides impact human health and ecosystems in Europe. Briefing n. 06/2023, 2023. Disponível em: https://www.eea.europa.eu/publications/how-pesticides-impact-human-health.

FARIAS, A. M. L. Estatística descritiva. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2006.

FIORINO, E.; SEHONOVA, P.; PLHALOVA, L.; BLAHOVA, J.; SVOBODOVA, Z.; FAGGIO, C. Effects of glyphosate on early life stages: Comparison between Cyprinus carpio and Danio rerio. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, p. 8542-8549, 2018.

GERBER, R.; BOUWMAN, H.; GOVENDER, D.; ISHIZUKA, M.; IKENAKA, Y.; YOHANNES, Y. B.; SMIT, N. J.; WEPENER, V. Levels of DDTs and other organochlorine pesticides in healthy wild Nile crocodiles (Crocodylus niloticus) from a flagship conservation area. Chemosphere, v. 264, pt. 1, 2021. 128368. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128368.

GONÇALVES, Í. F. S.; SOUZA, T.; VIEIRA, L. R.; MARCHI, F. C.; NASCIMENTO, A. P.; FARIAS, D. F. Toxicity testing of pesticides in zebrafish—A systematic review on chemicals and associated toxicological endpoints. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 10, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-020-07902-5.

GUERRA, L. J.; AMARAL, A. M. B.; QUADROS, V. A.; FIUZA, T. L.; ROSEMBERG, D. B.; PRESTES, O. D.; ZANELLA, R.; CLASEN, B.; LORO, V. L. Biochemical and behavioral responses in zebrafish exposed to imidacloprid oxidative damage and antioxidant responses. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, v. 81, n. 2, p. 255-264, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00244-021-00865-9.

HOWE, K.; CLARK, M. D.; TORROJA, C. F.; TORRANCE, J.; BERTHELOT, C.; MUFFATO, M.; COLLINS, J. E.; HUMPHRAY, S.; MCLAREN, K.; MATTHEWS, L.; MCLAREN, S.; SEALY, I.; CACCAMO, M.; CHURCHER, C.; SCOTT, C.; BARRETT, J. C.; KOCH, R.; RAUCH, G.-J.; WHITE, S.; ... STEMPLE, D. L. The zebrafish reference genome sequence and its relationship to the human genome. Nature, v. 496, n. 7446, p. 498-503, 2013.

KHOSHNOOOD, Z. Acute and chronic effects of pesticides on non-target aquatic organisms. Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research, v. 25, n. 3, p. 71-78, 2023.

KUMAR, V.; SHARMA, N.; SHARMA, P.; PASRIJA, R.; KAUR, K.; UMESH, M.; THAZEEM, B. Toxicity analysis of endocrine disrupting pesticides on non-target organisms: A critical analysis on toxicity mechanisms. Toxicology and Applied Pharmacology, v. 474, 2023. 116623. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116623.

LESKOVAC, A.; PETROVIĆ, S. Pesticide use and degradation strategies: Food safety, challenges and perspectives. Foods, v. 12, n. 14, 2023. Artigo 2709.

LOPES, F. M.; SANDRINI, J. Z.; SOUZA, M. M. Toxicity induced by glyphosate and glyphosate-based herbicides in the zebrafish hepatocyte cell line (ZF-L). Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 162, p. 201-207, 2018.

MARINS, A. T.; SEVERO, E. S.; CEREZER, C.; LEITEMPERGER, J. W.; MÜLLER, T. E.; FLORIANO, L.; ... LORO, V. L. Environmentally relevant pesticides induce biochemical changes in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). Ecotoxicology, v. 30, p. 585-598, 2021.

OLIVEIRA, B. R. F.; NETO, J. R. S.; DAVICO, C. E.; MOREIRA, D. H.; PINHEIRO, L. C.; PEREIRA, A. G.; IZÍDIO, G. S. Hepatotoxic effects of the herbicide 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) after short exposure on adult zebrafish Danio rerio. Environmental Research, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119027.

PATHAK, V. M.; VERMA, V. K.; RAWAT, B. S.; KAUR, B.; BABU, N.; SHARMA, A.; DEWALI, S.; YADAV, M.; KUMARI, R.; SINGH, S.; MOHAPATRA, S.; CUNILL, J. M. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. Frontiers in Microbiology, v. 13, 2022. Artigo 962619.

SANCHES, A. L. M.; VIEIRA, B. H.; REGHINI, M. V.; MOREIRA, R. A.; FREITAS, E. C.; ESPÍNDOLA, E. L.; DAAM, M. A. Single and mixture toxicity of abamectin and difenoconazole to adult zebrafish (Danio rerio). Chemosphere, v. 188, p. 582-587, 2017.

SCHWARTZMAN, S. Pesquisa e pós-graduação no Brasil: Duas faces da mesma moeda? Estudos Avançados, v. 36, p. 227-254, 2022.

SPINAK, E. Scientometric indicators. Ciência da Informação, v. 27, 1998.

ZUANAZZI, N. R.; GHISI, N. C.; OLIVEIRA, E. C. Analysis of global trends and gaps for studies about 2,4-D herbicide toxicity: A scientometric review. Chemosphere, v. 241, 2020. 125016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125016.