

POLUIÇÃO ORGÂNICA DE ORIGEM AGROPECUÁRIA E DEGRADAÇÃO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS CONTINENTAIS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DOS EFEITOS ECOLÓGICOS SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA E BIODIVERSIDADE

AGRICULTURAL ORGANIC POLLUTION AND DEGRADATION OF CONTINENTAL AQUATIC ECOSYSTEMS: AN INTEGRATIVE REVIEW OF ECOLOGICAL EFFECTS ON WATER QUALITY AND BIODIVERSITY

CONTAMINACIÓN ORGÁNICA DE ORIGEN AGROPECUARIO Y DEGRADACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS CONTINENTALES: UNA REVISIÓN INTEGRADORA DE LOS EFECTOS ECOLÓGICOS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA Y LA BIODIVERSIDAD

Luciano Mezzaroba¹
Carlos Eduardo Alessio²
Affonso Celso Gonçalves Junior³

1

RESUMO: A intensificação da produção pecuária tem ampliado significativamente a geração de resíduos orgânicos, aumentando a pressão sobre os ecossistemas aquáticos continentais. Esta revisão integrativa teve como objetivo sintetizar as evidências científicas sobre os impactos da poluição orgânica proveniente da suinocultura, bovinocultura e avicultura na qualidade da água e na biodiversidade aquática. A pesquisa foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect e SciELO, priorizando estudos publicados entre 2015 e 2025, complementados por referências clássicas. Os resultados demonstram que os dejetos pecuários apresentam elevadas concentrações de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos e microrganismos, promovendo aumento da demanda bioquímica de oxigênio, redução do oxigênio dissolvido, maior turbidez e alterações nos ciclos biogeoquímicos. O aporte contínuo desses resíduos favorece a eutrofização e a ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, comprometendo a qualidade da água e a estabilidade ecológica dos ecossistemas. As comunidades de fitoplâncton, zooplâncton, macroinvertebrados bentônicos e peixes respondem à degradação ambiental com redução da riqueza de espécies, simplificação das interações tróficas e predominância de organismos tolerantes à poluição. A síntese evidencia que os impactos da poluição agropecuária ultrapassam alterações físico-químicas pontuais, configurando um processo ecossistêmico complexo que compromete a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Conclui-se que o manejo inadequado dos resíduos pecuários representa importante vetor de degradação ambiental, reforçando a necessidade de monitoramento integrado da qualidade da água, adoção de tecnologias eficientes de

¹ Mestre em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca e Doutorando do programa de pós-graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais – UNIOESTE.

² Mestre em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca. Docente do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz.

³ Doutor em Química pela Universidade Federal de Santa Catarina, Comissão de Sustentabilidade e Inovação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil.

tratamento e implementação de estratégias sustentáveis de gestão dos resíduos para a conservação dos ecossistemas aquáticos continentais.

Palavras-chave: Poluição agropecuária. Resíduos pecuários. Qualidade da água. Eutrofização. Biodiversidade aquática.

ABSTRACT: The intensification of livestock production has substantially increased organic waste generation, intensifying environmental pressure on continental aquatic ecosystems. This integrative review aimed to synthesize scientific evidence regarding the impacts of organic pollution derived from swine, cattle, and poultry production on water quality and aquatic biodiversity. The review was conducted using studies retrieved from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and SciELO, prioritizing publications from 2015 to 2025 and complemented by relevant classical references. The findings indicate that livestock waste contains high concentrations of organic matter, nitrogen, phosphorus, suspended solids, and microorganisms, resulting in increased biochemical oxygen demand, reduced dissolved oxygen, greater turbidity, and alterations in biogeochemical cycles. Continuous inputs of these residues promote eutrophication and the occurrence of potentially toxic cyanobacterial blooms, compromising water quality and ecosystem stability. Phytoplankton, zooplankton, benthic macroinvertebrate, and fish communities respond to environmental degradation through reduced species richness, trophic simplification, and the dominance of pollution-tolerant organisms. The integrative synthesis demonstrates that the impacts of agricultural organic pollution extend beyond isolated physicochemical changes, constituting a complex ecosystem process that threatens biodiversity and ecosystem services. The findings highlight that inadequate livestock waste management represents a major driver of environmental degradation and reinforce the need for integrated water quality monitoring, efficient waste treatment technologies, and sustainable waste management strategies to preserve continental aquatic ecosystems.

Keywords: Agricultural pollution. Livestock waste. Water quality. Eutrophication. Aquatic biodiversity.

RESUMEN: La intensificación de la producción pecuaria ha incrementado significativamente la generación de residuos orgánicos, aumentando la presión ambiental sobre los ecosistemas acuáticos continentales. Esta revisión integradora tuvo como objetivo sintetizar la evidencia científica sobre los impactos de la contaminación orgánica derivada de la producción porcina, bovina y avícola en la calidad del agua y la biodiversidad acuática. La revisión se realizó a partir de estudios recuperados de las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SciELO, priorizando publicaciones entre 2015 y 2025 y complementándolas con referencias clásicas relevantes. Los resultados muestran que los residuos pecuarios contienen elevadas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos y microorganismos, lo que provoca un aumento de la demanda bioquímica de oxígeno, reducción del oxígeno disuelto, mayor turbidez y alteraciones en los ciclos biogeoquímicos. El aporte continuo de estos residuos favorece la eutrofización y la proliferación de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas, comprometiendo la calidad del agua y la estabilidad de los ecosistemas. Las comunidades de fitoplancton, zooplancton, macroinvertebrados bentónicos y peces responden a la degradación ambiental con una disminución de la riqueza de especies, simplificación de las interacciones tróficas y predominio de organismos tolerantes a la contaminación. La síntesis integradora demuestra que los impactos de la contaminación orgánica agropecuaria trascienden las alteraciones fisicoquímicas aisladas y constituyen un proceso ecosistémico complejo que compromete la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Se concluye que el manejo inadecuado de los residuos pecuarios representa un importante factor de degradación ambiental y refuerza la necesidad de implementar un monitoreo integrado de la calidad del agua, tecnologías eficientes para el tratamiento de residuos y estrategias sostenibles de gestión para la conservación de los ecosistemas acuáticos continentales.

Palabras clave: Contaminación agropecuaria. Residuos pecuarios. Calidad del agua. Eutrofización. Biodiversidad acuática.

INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos continentais desempenham funções ecológicas essenciais para a manutenção da biodiversidade, regulação biogeoquímica e provisão de serviços ecossistêmicos indispensáveis às sociedades humanas. Rios, lagos, reservatórios e áreas úmidas atuam como sistemas dinâmicos responsáveis pelo armazenamento, transporte e transformação de matéria e energia, sustentando elevada diversidade biológica e contribuindo para processos fundamentais, como ciclagem de nutrientes, depuração natural da água, recarga hídrica e estabilização climática regional (DODDS; SMITH, 2016; REID et al., 2019). Além da relevância ecológica, esses ambientes sustentam atividades econômicas e sociais relacionadas ao abastecimento público, produção agrícola, pesca, geração de energia e recreação, configurando-se como componentes estratégicos da segurança hídrica e do desenvolvimento territorial sustentável (VÖRÖSMARTY et al., 2010; GRIZZETTI et al., 2017).

Apesar de sua importância, os ambientes aquáticos continentais encontram-se entre os ecossistemas mais vulneráveis às pressões antrópicas contemporâneas. O crescimento populacional, a urbanização e a intensificação das atividades produtivas têm promovido alterações expressivas na integridade ecológica desses sistemas, resultando em modificações hidrológicas, perda de habitat, contaminação química e redução da biodiversidade (DUDGEON et al., 2006; REID et al., 2019). Entre os vetores de degradação mais relevantes destaca-se a poluição difusa e pontual associada à agropecuária intensiva, particularmente em regiões caracterizadas pela elevada densidade de produção animal e pela limitada capacidade de assimilação ambiental dos resíduos gerados (MATEO-SAGASTA; ZADEH; TURRAL, 2017).

Nas últimas décadas, a expansão agropecuária consolidou-se como um dos principais motores econômicos em diversos países, incluindo o Brasil, acompanhada pela intensificação da suinocultura, bovinocultura e avicultura. Esse processo produtivo permitiu ganhos expressivos de produtividade e ampliação da oferta de proteína animal, porém também promoveu aumento proporcional da geração de dejetos orgânicos e efluentes pecuários (STEINFELD et al., 2006; FAO, 2018). Em sistemas intensivos, a concentração espacial de animais frequentemente supera a capacidade local de reciclagem agrícola dos resíduos, favorecendo acúmulo de matéria orgânica e maior risco de transporte de poluentes para corpos hídricos superficiais e subterrâneos (BURKHOLDER; LIBRA; WENZEL, 2007).

Os dejetos agropecuários apresentam composição complexa e elevado potencial poluidor. Na suinocultura, os efluentes caracterizam-se por altas concentrações de matéria orgânica biodegradável, nitrogênio amoniacal, fósforo, sólidos suspensos e ampla carga microbiológica, incluindo bactérias, vírus e parasitas (SILVA et al., 2017; LIU et al., 2021). Em sistemas bovinos intensivos, especialmente confinamentos e unidades leiteiras, os resíduos apresentam grande volume de matéria orgânica, nutrientes e sólidos sedimentáveis, frequentemente associados ao carreamento superficial e à degradação de margens e áreas ripárias (MOSQUERA-LOSADA et al., 2018). Na avicultura, a cama aviária e os resíduos líquidos possuem elevadas concentrações de nitrogênio, fósforo e compostos orgânicos passíveis de lixiviação e escoamento superficial, ampliando riscos de enriquecimento nutricional e deterioração da qualidade da água (SHARPLEY et al., 2015; BOLAN et al., 2021).

Embora os resíduos pecuários possam representar importante fonte de nutrientes para fertilização agrícola quando manejados adequadamente, o descarte inadequado ou a aplicação excessiva no solo frequentemente resultam em perdas ambientais significativas. O transporte de matéria orgânica, nutrientes e microrganismos por escoamento superficial, drenagem ou lançamento direto em corpos hídricos promove aumento da demanda bioquímica de oxigênio, elevação da turbidez, alterações de pH e condutividade, além de redução do oxigênio dissolvido e intensificação de processos de degradação ecológica (CARPENTER et al., 1998; MATEO-SAGASTA; ZADEH; TURRAL, 2017). Esses efeitos tendem a ser particularmente severos em sistemas aquáticos com baixa renovação hídrica, nos quais o acúmulo de nutrientes pode desencadear mudanças persistentes na estrutura e funcionamento ecossistêmico.

O enriquecimento nutricional decorrente do aporte excessivo de nitrogênio e fósforo constitui um dos mecanismos centrais pelos quais a poluição orgânica agropecuária afeta ambientes aquáticos continentais. A eutrofização representa processo amplamente documentado em ecossistemas submetidos à carga excessiva de nutrientes, sendo associada ao aumento da produtividade primária, proliferação de florações algais e alteração das relações tróficas (SMITH; SCHINDLER, 2009). Entre as respostas biológicas mais preocupantes destaca-se a expansão de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, frequentemente relacionadas à produção de cianotoxinas capazes de comprometer organismos aquáticos, abastecimento humano e saúde pública (PAERL; OTTEN, 2013; BURFORD et al., 2020).

As consequências ecológicas da poluição orgânica de origem agropecuária extrapolam alterações exclusivamente físico-químicas e envolvem mudanças estruturais profundas nas comunidades aquáticas. Modificações na disponibilidade de oxigênio, transparência da água e composição nutricional influenciam diretamente a dinâmica do fitoplâncton, favorecendo espécies oportunistas e reduzindo riqueza e equitabilidade comunitária (PAERL et al., 2016). O zooplâncton pode apresentar elevada sensibilidade a alterações tróficas e à presença de cianotoxinas, resultando em simplificação estrutural e perda de grupos funcionalmente relevantes (JEPPESEN et al., 2011). Em macroinvertebrados bentônicos, frequentemente utilizados como bioindicadores, a exposição crônica à matéria orgânica e hipóxia está associada à substituição de táxons sensíveis por organismos tolerantes, refletindo deterioração da integridade ecológica (BONADA; PRAT; RESH, 2006). Em níveis tróficos superiores, episódios de anoxia e alterações alimentares podem comprometer populações de peixes, promovendo mortalidade, mudanças comportamentais e reorganização das cadeias alimentares (DIAZ; ROSENBERG, 2008).

Embora exista ampla produção científica relacionada à qualidade da água, eutrofização e manejo de resíduos pecuários, parte significativa da literatura permanece fragmentada entre abordagens agronômicas, sanitárias e limnológicas, frequentemente sem integração ecológica abrangente das respostas biológicas associadas aos diferentes tipos de dejetos agropecuários. Revisões focadas exclusivamente em nutrientes, fertilização agrícola ou tecnologias de tratamento tendem a subestimar os efeitos cumulativos sobre comunidades aquáticas e processos ecossistêmicos (GRIZZETTI et al., 2017; BOLAN et al., 2021). Nesse contexto, permanece relevante a construção de sínteses integrativas capazes de reunir evidências quantitativas e interpretar, de forma sistêmica, os mecanismos pelos quais a poluição orgânica de origem agropecuária compromete a qualidade ambiental e a biodiversidade aquática.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão integrativa da literatura científica sobre os impactos do descarte de dejetos agropecuários em ambientes aquáticos continentais, analisando os efeitos ecológicos associados à degradação da qualidade da água, eutrofização, proliferação de cianobactérias e alterações em comunidades aquáticas, com ênfase na integração entre processos físico-químicos e respostas biológicas decorrentes da poluição orgânica oriunda da suinocultura, bovinocultura e avicultura.

MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido como uma revisão integrativa da literatura, com o objetivo de sintetizar e interpretar criticamente evidências científicas relacionadas aos impactos ecológicos da poluição orgânica de origem agropecuária sobre ecossistemas aquáticos continentais. A abordagem de revisão integrativa foi adotada por permitir a incorporação e análise comparativa de estudos com diferentes delineamentos metodológicos, favorecendo uma interpretação ecológica ampliada e a identificação de padrões recorrentes, lacunas científicas e tendências emergentes relacionadas à contaminação de ambientes dulcícolas.

A revisão concentrou-se prioritariamente em estudos científicos revisados por pares que abordassem os efeitos dos dejetos oriundos da suinocultura, bovinocultura e avicultura sobre ambientes aquáticos continentais. Foram considerados especialmente relevantes trabalhos que investigassem degradação da qualidade da água, dinâmica de nutrientes, eutrofização, florações de cianobactérias, respostas da biodiversidade e alterações ecológicas em comunidades aquáticas.

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio das bases de dados internacionais Scopus, Web of Science, ScienceDirect e SciELO. A escolha dessas bases fundamentou-se em sua ampla cobertura das áreas de ecologia aquática, limnologia, ciências ambientais e poluição agropecuária, permitindo acesso abrangente à produção científica internacional e latino-americana relacionada ao tema investigado.

O recorte temporal priorizou estudos publicados entre 2015 e 2025, período marcado por avanços relevantes nas discussões sobre poluição difusa, eutrofização e manejo de resíduos pecuários. Contudo, referências clássicas e historicamente relevantes também foram incorporadas quando consideradas indispensáveis à fundamentação conceitual e interpretação ecológica dos resultados, particularmente em temas relacionados à teoria da eutrofização, biodiversidade aquática, biomonitoramento e processos ecológicos fundamentais.

A estratégia de busca foi elaborada com o objetivo de maximizar a abrangência temática e reduzir vieses de seleção, utilizando combinações booleanas associadas à poluição agropecuária e aos ecossistemas aquáticos continentais. Foram empregadas expressões como “*livestock waste AND aquatic communities*”, “*manure pollution AND freshwater ecosystems*”, “*eutrophication AND livestock effluents*”, “*animal waste AND water quality*” e “*agricultural waste AND aquatic biodiversity*”. Sempre que necessário, foram realizadas buscas complementares e refinamentos

sucessivos para identificação de estudos recentes, trabalhos amplamente citados e referências adicionais presentes nos artigos inicialmente selecionados. O processo de triagem envolveu etapas sucessivas de identificação, avaliação preliminar e refinamento temático, permitindo a exclusão progressiva de estudos com baixa aderência aos objetivos da revisão.

A seleção dos estudos seguiu critérios previamente definidos para garantir consistência metodológica e relevância científica. Foram incluídos artigos revisados por pares, revisões de literatura consideradas relevantes e estudos quantitativos publicados em periódicos indexados que apresentassem relação direta com os impactos ecológicos da poluição orgânica agropecuária em ambientes aquáticos continentais. Houve preferência por investigações que apresentassem dados empíricos, avaliações limnológicas ou análises integradas envolvendo qualidade da água e respostas biológicas. Em contrapartida, foram excluídos trabalhos duplicados, estudos com aderência temática limitada, pesquisas restritas exclusivamente a ambientes terrestres e publicações sem relação ecológica direta com sistemas aquáticos.

Após a etapa de seleção, os estudos foram submetidos a análise qualitativa e interpretativa voltada à identificação de relações ecológicas e padrões recorrentes de impacto associados à poluição derivada de dejetos agropecuários. A interpretação das evidências considerou características dos ambientes aquáticos receptores, fontes poluidoras e sistemas produtivos envolvidos, variáveis físico-químicas avaliadas, comunidades biológicas afetadas e respostas ecológicas descritas na literatura. Especial atenção foi direcionada à compreensão das relações causais entre aporte de matéria orgânica e nutrientes, alterações limnológicas, processos de eutrofização e respostas da biodiversidade aquática. Dessa forma, a revisão buscou não apenas compilar informações disponíveis, mas construir uma síntese ecológica crítica e integradora capaz de explicar como a poluição orgânica de origem agropecuária interfere na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas aquáticos continentais.

Essa abordagem interpretativa permitiu identificar padrões ecológicos consistentes e fortalecer a integração entre degradação da qualidade da água e impactos biológicos, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos riscos ambientais associados ao manejo inadequado de resíduos pecuários e para o desenvolvimento de estratégias mais integradas de avaliação e gestão dos recursos hídricos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dejetos agropecuários como fonte de poluição hídrica

A literatura analisada evidencia que os dejetos provenientes da produção animal intensiva constituem uma das principais fontes de poluição orgânica em ecossistemas aquáticos continentais, sobretudo em regiões caracterizadas por elevada densidade pecuária e manejo inadequado dos resíduos. Embora a magnitude dos impactos dependa de fatores como clima, hidrologia, características do solo e estratégias de tratamento empregadas, observa-se convergência entre os estudos quanto ao elevado potencial de degradação hídrica associado aos resíduos da suinocultura, bovinocultura e avicultura (MATEO-SAGASTA; ZADEH; TURRAL, 2017; BOLAN et al., 2021).

Os dejetos agropecuários apresentam composição heterogênea, envolvendo matéria orgânica biodegradável, nutrientes dissolvidos, sólidos suspensos, metais-traço, compostos farmacológicos e elevada diversidade microbológica. Em comum, esses resíduos possuem capacidade de alterar profundamente o metabolismo dos ecossistemas aquáticos devido ao aporte simultâneo de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo, componentes diretamente associados ao aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e à intensificação dos processos eutróficos (BURKHOLDER; LIBRA; WENZEL, 2007).

8

Entre as atividades pecuárias, a suinocultura destaca-se pelo elevado potencial poluidor de seus efluentes. Os resíduos líquidos oriundos da criação intensiva de suínos apresentam elevadas concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos e nutrientes dissolvidos, particularmente nitrogênio amoniacal e fósforo reativo. Estudos reportam concentrações de DBO frequentemente superiores a 3.000 mg L^{-1} e, em sistemas não tratados, valores que podem ultrapassar 10.000 mg L^{-1} , indicando alta carga orgânica biodegradável (SILVA et al., 2017; LIU et al., 2021).

Na bovinocultura, especialmente em sistemas de confinamento e produção leiteira intensiva, os resíduos apresentam grande volume de matéria orgânica particulada, sólidos sedimentáveis e nutrientes associados ao esterco e à urina animal. Em comparação aos efluentes suinícolas, os resíduos bovinos tendem a apresentar menor concentração líquida de nutrientes, mas maior volume gerado e elevada carga de sólidos orgânicos, favorecendo assoreamento, aumento da turbidez e deposição sedimentar em ambientes aquáticos receptores (MOSQUERA-LOSADA et al., 2018).

Na avicultura, a cama aviária e os resíduos gerados durante limpeza das instalações apresentam elevadas concentrações de nitrogênio e fósforo, frequentemente associados à rápida mineralização e mobilização por escoamento superficial. A elevada disponibilidade desses nutrientes transforma a atividade em importante fonte difusa de enriquecimento nutricional, particularmente em microbacias com elevada densidade de granjas (SHARPLEY et al., 2015; BOLAN et al., 2021).

A comparação entre os sistemas produtivos evidencia diferenças quantitativas e qualitativas na composição dos resíduos, embora todos apresentem elevado potencial de degradação hídrica quando manejados inadequadamente.

Tabela 1. Características comparativas dos dejetos agropecuários e potencial poluidor

Sistema produtivo	Principais componentes	Características predominantes	Potencial poluidor
Suinocultura	Matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, fósforo, sólidos, microrganismos	Alta carga orgânica e nutrientes dissolvidos	Elevado risco de aumento da DBO, hipóxia e eutrofização
Bovinocultura	Esterco, urina, sólidos particulados, matéria orgânica	Grande volume e sólidos sedimentáveis	Assoreamento, turbidez e enriquecimento nutricional
Avicultura	Cama aviária, nitrogênio, fósforo, matéria orgânica	Alta disponibilidade de fósforo e nitrogênio	Forte contribuição para eutrofização e florações algais

Fonte: elaborado pelos autores com base na literatura revisada.

Embora existam particularidades composicionais entre os resíduos pecuários, a convergência dos estudos indica que o impacto ecológico resulta da interação entre carga orgânica, metabolismo microbiano e transporte hidrológico. O carbono biodegradável intensifica atividade bacteriana e consumo de oxigênio, enquanto nitrogênio e fósforo removem limitações nutricionais naturais e favorecem alterações tróficas (CARPENTER et al., 1998). Dessa forma, a poluição agropecuária deve ser compreendida como processo multifatorial cuja severidade depende simultaneamente da natureza do resíduo, frequência do aporte e vulnerabilidade do ambiente receptor.

Alterações da qualidade da água

A literatura revisada demonstra que o aporte de dejetos agropecuários promove alterações consistentes nos parâmetros físico-químicos da água, desencadeando respostas limnológicas capazes de comprometer a estabilidade ecológica dos ecossistemas continentais. Em geral, observa-se trajetória de degradação associada ao aumento da carga orgânica, intensificação da decomposição microbiana e modificação do metabolismo aquático (SMITH; SCHINDLER, 2009).

A redução do oxigênio dissolvido (OD) representa um dos efeitos mais recorrentes e ecologicamente relevantes. O aporte de matéria orgânica estimula intensa atividade heterotrófica, elevando a respiração bacteriana e promovendo maior consumo de oxigênio dissolvido (DIAZ; ROSENBERG, 2008). Em ambientes receptores sujeitos a lançamentos contínuos de efluentes pecuários, esse processo pode evoluir para condições hipóxicas ou anóxicas, comprometendo organismos sensíveis e favorecendo simplificação biológica.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) constitui indicador central desse processo. O lançamento de resíduos agropecuários eleva significativamente a quantidade de matéria orgânica biodegradável disponível, aumentando os valores de DBO e intensificando o consumo de oxigênio (VON SPERLING, 2014). A relação ecológica predominante pode ser sintetizada

10

Aporte orgânico → atividade microbiana → aumento da DBO → redução do OD → hipóxia ambiental.

Paralelamente, observa-se incremento de turbidez e sólidos suspensos, particularmente associado ao transporte superficial de resíduos bovinos e avícolas. O aumento da concentração particulada reduz transparência da água, altera a profundidade eufótica e interfere nos padrões fotossintéticos e térmicos dos sistemas aquáticos (MCDOWELL et al., 2020).

O enriquecimento por nitrogênio e fósforo constitui outro componente recorrente da degradação limnológica. Esses nutrientes elevam a disponibilidade trófica da coluna d'água e favorecem incremento da produtividade primária (SMITH; SCHINDLER, 2009). Em especial, o nitrogênio amoniacal pode exercer toxicidade fisiológica direta sobre peixes e invertebrados, comprometendo crescimento, respiração e reprodução (CAMARGO; ALONSO, 2006).

Mudanças de pH e condutividade elétrica também são frequentemente registradas em ambientes receptores de resíduos pecuários. A decomposição orgânica, nitrificação e aumento da concentração de íons dissolvidos alteram equilíbrio químico e disponibilidade de nutrientes, refletindo intensificação da mineralização e da carga poluidora (BOLAN et al., 2021).

A síntese dos principais efeitos físico-químicos identificados na literatura é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Principais alterações da qualidade da água associadas ao aporte de dejetos agropecuários

Parâmetro	Alteração observada	Mecanismo associado	Resposta ambiental
Oxigênio dissolvido	Redução	Decomposição microbiana	Hipóxia e mortalidade biológica
DBO	Aumento	Elevada matéria orgânica	Consumo de oxigênio
Turbidez	Aumento	Sólidos e sedimentos	Menor transparência
Nitrogênio	Aumento	Mineralização e escoamento	Eutrofização e toxicidade
Fósforo	Aumento	Lixiviação e transporte particulado	Florações algais
Condutividade	Aumento	Íons dissolvidos	Alteração química
pH	Oscilação	Decomposição e nitrificação	Mudanças fisiológicas

Fonte: elaborado pelos autores com base na literatura revisada.

Os estudos convergem, portanto, para uma relação causal integrada entre fonte poluidora, alteração limnológica e resposta ecológica. O aporte de resíduos agropecuários modifica parâmetros físico-químicos fundamentais e estabelece condições favoráveis à eutrofização e reorganização biológica dos ecossistemas aquáticos, aspectos discutidos nas seções subsequentes.

Eutrofização e proliferação de cianobactérias

A eutrofização constitui uma das consequências ecológicas mais recorrentes e severas associadas ao aporte excessivo de dejetos agropecuários em ambientes aquáticos continentais. A literatura revisada demonstra que o enriquecimento nutricional promovido por resíduos da suinocultura, bovinocultura e avicultura altera profundamente o equilíbrio trófico dos ecossistemas dulcícolas, favorecendo incremento da produtividade primária, mudanças na composição biológica e perda progressiva da estabilidade ecológica (SMITH; SCHINDLER, 2009; PAERL; OTTEN, 2013).

Embora a eutrofização possa ocorrer naturalmente em escala temporal geológica, o aporte antrópico de nutrientes acelera esse processo de forma substancial, originando quadros de eutrofização cultural frequentemente associados à intensificação agropecuária e ao manejo inadequado de resíduos orgânicos (CARPENTER et al., 1998). Nitrogênio e fósforo provenientes dos dejetos representam os principais agentes desencadeadores desse fenômeno, atuando como elementos limitantes da produção biológica em grande parte dos ecossistemas aquáticos continentais.

Os resíduos agropecuários apresentam composição particularmente favorável ao desencadeamento da eutrofização devido à elevada disponibilidade de fósforo reativo e nitrogênio mineralizável. Em efluentes suínolas, elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal e fósforo dissolvido favorecem rápida assimilação biológica após ingresso em corpos hídricos (LIU et al., 2021). Na avicultura, a cama aviária frequentemente constitui importante fonte de fósforo biodisponível, enquanto resíduos bovinos contribuem simultaneamente com nutrientes e partículas sedimentares enriquecidas, ampliando persistência e mobilização do material poluente (SHARPLEY et al., 2015; MCDOWELL et al., 2020).

A remoção das limitações nutricionais naturais altera significativamente o metabolismo aquático. O incremento da disponibilidade de nutrientes promove aumento da biomassa fitoplanctônica, elevação da produtividade primária e maior acúmulo de matéria orgânica na coluna d'água (PAERL et al., 2016). Em reservatórios e lagos sujeitos a aporte contínuo de resíduos pecuários, estudos relatam aumentos expressivos na concentração de clorofila-a e na densidade fitoplanctônica, frequentemente acompanhados por redução da transparência e alteração das relações tróficas.

O processo eutrófico apresenta dinâmica ecossistêmica cumulativa. Inicialmente, o enriquecimento nutricional favorece crescimento acelerado de organismos fotossintetizantes. Entretanto, a posterior decomposição da biomassa produzida intensifica atividade microbiana e aumenta consumo de oxigênio dissolvido, podendo estabelecer condições hipóxicas principalmente em zonas profundas ou ambientes de baixa circulação hídrica (DIAZ; ROSENBERG, 2008). Essa retroalimentação entre produtividade excessiva e decomposição orgânica amplia instabilidade ecológica e favorece persistência do estado degradado.

Entre as manifestações biológicas mais preocupantes da eutrofização destaca-se a proliferação de cianobactérias. A literatura demonstra associação consistente entre

enriquecimento nutricional, particularmente por fósforo e nitrogênio, e ocorrência de florações cianobacterianas em ambientes continentais (PAERL; OTTEN, 2013; BURFORD et al., 2020). Essas florações caracterizam-se pelo crescimento excessivo de espécies oportunistas capazes de dominar a comunidade fitoplânctônica sob condições favoráveis de temperatura, luminosidade e disponibilidade nutricional.

Gêneros como *Microcystis*, *Dolichospermum* e *Planktothrix* são frequentemente associados a sistemas aquáticos impactados por elevada carga orgânica e nutrientes oriundos de atividades agropecuárias (PAERL et al., 2016). A dominância desses organismos modifica significativamente a estrutura funcional do fitoplâncton, reduzindo diversidade taxonômica e favorecendo comunidades biologicamente simplificadas.

Além da alteração estrutural do ecossistema, muitas cianobactérias apresentam capacidade de produzir metabólitos tóxicos conhecidos como cianotoxinas. Entre as substâncias mais investigadas destacam-se microcistinas, cilindrospermopsinas e anatoxinas, compostos capazes de afetar organismos aquáticos e representar risco potencial à saúde humana (BURFORD et al., 2020). A exposição prolongada a essas toxinas pode provocar alterações fisiológicas, comprometimento hepático e mortalidade em organismos aquáticos, além de gerar restrições ao abastecimento público e usos recreativos da água.

Os impactos ecológicos das florações transcendem a toxicidade direta. A elevada biomassa cianobacteriana reduz penetração luminosa, modifica padrões de fotossíntese e interfere na dinâmica de trocas gasosas entre água e atmosfera (PAERL; OTTEN, 2013). Durante colapsos populacionais, a decomposição da biomassa acumulada intensifica ainda mais o consumo de oxigênio dissolvido, ampliando ocorrência de hipóxia e mortalidade de organismos sensíveis.

A persistência desses eventos pode induzir alterações duradouras nos ecossistemas aquáticos. Estudos indicam que reservatórios eutrofizados tendem a apresentar maior frequência de florações recorrentes, associadas a mecanismos de retroalimentação positiva envolvendo ressuspensão sedimentar de fósforo, mineralização orgânica e manutenção de elevadas concentrações nutricionais (SMITH; SCHINDLER, 2009). Dessa forma, mesmo reduções posteriores do aporte externo podem não resultar em recuperação ecológica imediata.

A síntese ecológica da literatura sugere que os dejetos agropecuários não atuam apenas como fontes de nutrientes isolados, mas como vetores de reorganização trófica e metabólica dos

ambientes aquáticos. O padrão predominante observado pode ser interpretado como uma sequência integrada:

Aporte de nutrientes → eutrofização → florações cianobacterianas → hipóxia → degradação ecossistêmica.

Os resultados analisados reforçam que a eutrofização associada à poluição orgânica de origem agropecuária constitui fenômeno multifatorial e ecologicamente persistente, representando elo fundamental entre degradação da qualidade da água e impactos biológicos observados em comunidades aquáticas, discutidos na próxima seção

Impactos sobre comunidades aquáticas

As alterações físico-químicas decorrentes do aporte de dejetos agropecuários repercutem diretamente na estrutura e funcionamento das comunidades aquáticas, produzindo respostas biológicas que frequentemente refletem processos avançados de degradação ecológica. A literatura revisada demonstra que os efeitos da poluição orgânica extrapolam parâmetros limnológicos isolados e envolvem reorganizações complexas da biodiversidade, afetando composição, abundância, riqueza e estabilidade funcional dos ecossistemas continentais (DUDGEON et al., 2006; REID et al., 2019).

14

A magnitude dessas respostas depende da intensidade do enriquecimento nutricional, persistência da carga orgânica e sensibilidade biológica dos organismos expostos. Em geral, observa-se padrão recorrente de simplificação ecológica, caracterizado pela substituição de espécies sensíveis por organismos tolerantes à hipóxia, elevada disponibilidade de nutrientes e instabilidade ambiental (BONADA; PRAT; RESH, 2006).

Fitoplâncton

O fitoplâncton constitui um dos componentes biológicos mais rapidamente responsivos ao enriquecimento nutricional promovido por resíduos agropecuários. O aumento da disponibilidade de nitrogênio e fósforo altera relações de limitação nutricional e favorece expansão de espécies oportunistas capazes de explorar condições eutróficas (PAERL et al., 2016).

Embora incrementos moderados de nutrientes possam inicialmente aumentar produtividade primária, a persistência do aporte orgânico tende a modificar profundamente a composição fitoplanctônica. Estudos revisados relatam aumento da biomassa algal

acompanhado por redução da riqueza taxonômica e menor equitabilidade comunitária, indicando dominância progressiva de poucos grupos adaptados ao excesso nutricional (SMITH; SCHINDLER, 2009).

A dominância de cianobactérias representa expressão extrema desse processo. Em sistemas submetidos a elevada carga de nutrientes provenientes da suinocultura e avicultura, observam-se florações persistentes associadas à perda de diversidade e à homogeneização funcional do fitoplâncton (PAERL; OTTEN, 2013). Essas alterações afetam não apenas produtores primários, mas toda a estrutura trófica associada.

Zooplâncton

As comunidades zooplanctônicas apresentam elevada sensibilidade às alterações ambientais induzidas pela eutrofização e pela deterioração da qualidade da água. Organismos como cladóceros, copépodes e rotíferos respondem rapidamente a mudanças na composição fitoplanctônica, disponibilidade alimentar e presença de compostos tóxicos (JEPPESEN et al., 2011).

Em ambientes impactados por resíduos pecuários, a literatura descreve redução de espécies filtradoras de maior porte, frequentemente substituídas por organismos menores e mais tolerantes às condições eutróficas. Esse processo altera significativamente a eficiência do controle biológico do fitoplâncton e enfraquece mecanismos naturais de regulação trófica.

A presença de cianobactérias potencialmente tóxicas constitui fator adicional de perturbação. Muitas espécies zooplanctônicas apresentam baixa capacidade de utilização alimentar dessas algas e podem sofrer efeitos fisiológicos decorrentes da exposição a cianotoxinas, incluindo redução da fecundidade, alterações metabólicas e aumento da mortalidade (BURFORD et al., 2020). Como consequência, o zooplâncton frequentemente experimenta diminuição de abundância e simplificação estrutural.

Macroinvertebrados bentônicos

Os macroinvertebrados bentônicos figuram entre os bioindicadores mais utilizados na avaliação da integridade ecológica de ambientes aquáticos, devido à sua relativa baixa mobilidade e sensibilidade às condições locais (BONADA; PRAT; RESH, 2006). A literatura

revisada evidencia forte associação entre aporte de matéria orgânica agropecuária e alterações na composição dessas comunidades.

O aumento da sedimentação orgânica e a redução do oxigênio dissolvido promovem substituição de táxons sensíveis, como representantes de Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera, por organismos tolerantes associados a ambientes degradados, incluindo determinados Oligochaeta e Chironomidae (ROSENBERG; RESH, 1993). Esse padrão reflete perda progressiva de qualidade ambiental e simplificação funcional do bentos.

Além da hipóxia, o acúmulo de sedimentos finos provenientes principalmente da bovinocultura compromete habitats bentônicos, reduzindo disponibilidade de substratos heterogêneos e alterando microhabitats essenciais para alimentação e reprodução (MCDOWELL et al., 2020). Em consequência, observa-se declínio da diversidade beta e redução da complexidade ecológica local.

Peixes

Os peixes representam importante componente integrador das alterações ecológicas promovidas pela poluição orgânica agropecuária, respondendo simultaneamente às mudanças físico-químicas, tróficas e estruturais do habitat. Episódios de hipóxia associados ao aumento da DBO figuram entre os impactos mais frequentemente relatados na literatura (DIAZ; ROSENBERG, 2008).

A redução do oxigênio dissolvido compromete processos fisiológicos fundamentais, incluindo respiração, crescimento e reprodução. Espécies mais sensíveis tendem a apresentar deslocamento espacial, redução populacional ou mortalidade em situações severas de degradação. Eventos de mortandade em massa têm sido associados ao colapso do oxigênio dissolvido após florações algais e decomposição intensa de biomassa orgânica (PAERL et al., 2016).

Além dos efeitos fisiológicos diretos, alterações na base da cadeia alimentar repercutem sobre hábitos tróficos e disponibilidade de recursos alimentares. Mudanças na composição do fitoplâncton e zooplâncton podem favorecer espécies generalistas e oportunistas, ao mesmo tempo em que reduzem suporte energético para peixes especialistas, promovendo reorganização das comunidades ícticas e simplificação das redes alimentares.

A síntese dos principais impactos observados sobre comunidades aquáticas é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Principais impactos da poluição orgânica agropecuária sobre comunidades aquáticas continentais

Grupo biológico	Principais alterações	Resposta ecológica predominante
Fitoplâncton	Aumento de biomassa, dominância de poucos táxons	Redução da diversidade e florações
Zooplâncton	Alteração alimentar e exposição a toxinas	Simplificação estrutural
Macroinvertebrados	Substituição de táxons sensíveis	Perda de integridade ecológica
Peixes	Hipóxia, mortalidade e reorganização trófica	Redução populacional e alteração das cadeias alimentares

Fonte: elaborado pelos autores com base na literatura revisada.

Os resultados analisados indicam que a poluição orgânica de origem agropecuária produz impactos multiescalares sobre a biodiversidade aquática. O padrão predominante envolve redução da riqueza biológica, reorganização funcional e maior dominância de espécies tolerantes, configurando processo progressivo de simplificação ecológica. Essas evidências reforçam que a degradação hídrica associada aos dejetos pecuários não constitui apenas problema químico ou sanitário, mas também processo de erosão biológica capaz de comprometer estabilidade e resiliência dos ecossistemas aquáticos continentais.

17

Integração ecológica dos impactos

A análise integrada da literatura evidencia que os impactos decorrentes do descarte inadequado de dejetos agropecuários em ambientes aquáticos continentais não devem ser interpretados como alterações ambientais isoladas, mas como processos ecológicos encadeados que envolvem interações simultâneas entre qualidade da água, metabolismo ecossistêmico e biodiversidade. A convergência entre os estudos revisados demonstra que a degradação associada à poluição orgânica de origem agropecuária resulta de mecanismos cumulativos e sinérgicos, nos quais alterações físico-químicas desencadeiam respostas biológicas capazes de amplificar a instabilidade ambiental (REID et al., 2019; BOLAN et al., 2021).

Embora os resíduos oriundos da suinocultura, bovinocultura e avicultura apresentem diferenças composicionais e quantitativas, a literatura aponta padrão ecológico recorrente de

degradação. O ingresso de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e sólidos suspensos altera rapidamente o metabolismo dos ambientes receptores, favorecendo intensificação da atividade microbiana e modificações nos ciclos biogeoquímicos (CARPENTER et al., 1998). Como consequência, parâmetros fundamentais da qualidade da água, como oxigênio dissolvido, transparência, condutividade e disponibilidade nutricional, sofrem mudanças capazes de redefinir a estrutura ecológica dos ecossistemas aquáticos.

A redução do oxigênio dissolvido emerge como elemento central dessa dinâmica. O aumento da demanda bioquímica de oxigênio decorrente da decomposição da matéria orgânica promove condições de hipóxia e anoxia que comprometem diretamente organismos aeróbios e processos metabólicos fundamentais (DIAZ; ROSENBERG, 2008). Entretanto, os efeitos ecológicos observados não decorrem apenas da limitação de oxigênio, mas da interação entre hipóxia, enriquecimento nutricional e alterações na composição biológica.

O enriquecimento por nitrogênio e fósforo atua como força propulsora da reorganização trófica dos sistemas aquáticos. A remoção das limitações nutricionais naturais favorece expansão de produtores primários oportunistas, particularmente cianobactérias, alterando padrões de competição e modificando a transferência de energia ao longo das cadeias alimentares (PAERL; OTTEN, 2013). O resultado é a substituição progressiva de comunidades diversas e funcionalmente complexas por estruturas biológicas simplificadas e dominadas por espécies tolerantes.

18

Essa reorganização trófica apresenta implicações ecossistêmicas relevantes. A perda de diversidade fitoplânctônica reduz estabilidade funcional da produção primária; alterações no zooplâncton enfraquecem mecanismos naturais de controle biológico; mudanças bentônicas comprometem ciclagem de nutrientes e processamento da matéria orgânica; e impactos sobre peixes alteram fluxos energéticos e relações predador-presa (JEPPESEN et al., 2011; PAERL et al., 2016). Assim, a degradação hídrica induzida pelos resíduos agropecuários manifesta-se como processo de simplificação ecológica progressiva.

A literatura revisada sugere que essa simplificação envolve não apenas perda de espécies, mas redução da diversidade funcional e da redundância ecológica. Ecossistemas biologicamente simplificados tendem a apresentar menor resiliência frente a perturbações adicionais, menor capacidade de autorregulação e maior suscetibilidade a mudanças abruptas de estado ecológico (DUDGEON et al., 2006). Em ambientes eutrofizados, por exemplo, a persistência de florações

cianobacterianas e a manutenção de sedimentos enriquecidos podem consolidar estados degradados de difícil reversão.

A degradação associada aos dejetos pecuários também apresenta forte componente espacial e temporal. Em microbacias com elevada densidade de produção animal, o aporte recorrente de nutrientes e matéria orgânica pode promover impactos cumulativos que extrapolam o ponto imediato de lançamento, alcançando reservatórios, lagos e sistemas fluviais situados a jusante (GRIZZETTI et al., 2017). Esse padrão reforça a natureza difusa da poluição agropecuária e evidencia que seus efeitos não se restringem a áreas pontuais, mas podem comprometer paisagens hidrográficas inteiras.

Além dos impactos biológicos diretos, a literatura destaca consequências socioecológicas associadas à deterioração da qualidade da água. Florações tóxicas, perda da biodiversidade, redução da qualidade paisagística e comprometimento do abastecimento humano e da pesca demonstram que os efeitos da poluição orgânica transcendem a esfera ecológica e afetam múltiplos serviços ecossistêmicos (MATEO-SAGASTA; ZADEH; TURRAL, 2017). Dessa forma, a degradação aquática associada à agropecuária intensiva representa simultaneamente problema ecológico, econômico e de gestão ambiental.

A síntese integrativa da literatura analisada indica que os impactos decorrentes da poluição orgânica de origem agropecuária podem ser compreendidos como uma cadeia ecológica interdependente e progressiva. A intensificação da produção animal promove maior geração de dejetos, os quais, quando transportados para ambientes aquáticos por escoamento superficial, lixiviação ou descarte direto, introduzem elevadas cargas de matéria orgânica, nutrientes e sólidos em suspensão. Esse aporte desencadeia alterações físico-químicas, incluindo aumento da demanda bioquímica de oxigênio, enriquecimento por nitrogênio e fósforo, incremento da turbidez e redução do oxigênio dissolvido, criando condições favoráveis à eutrofização e à proliferação de florações cianobacterianas. As modificações limnológicas resultantes repercutem diretamente sobre a estrutura e o funcionamento das comunidades aquáticas, promovendo alterações na composição do fitoplâncton, zooplâncton, macroinvertebrados bentônicos e peixes. Em conjunto, esses processos favorecem a perda de biodiversidade, a dominância de organismos tolerantes e a simplificação das interações tróficas, culminando em estados persistentes de degradação ecossistêmica. Dessa forma, as evidências reunidas reforçam que alterações físico-químicas e respostas biológicas associadas à poluição agropecuária não

constituem fenômenos independentes, mas componentes sucessivos e integrados de uma mesma trajetória ecológica de degradação ambiental.

Os resultados integrados da literatura reforçam, portanto, que os dejetos agropecuários funcionam como agentes estruturadores de mudanças ambientais profundas em ecossistemas aquáticos continentais. A persistência do aporte orgânico e nutricional compromete mecanismos ecológicos fundamentais, reduz estabilidade biológica e favorece estabelecimento de ambientes simplificados e ecologicamente vulneráveis. Sob essa perspectiva, compreender os impactos da poluição agropecuária exige abordagem ecossistêmica capaz de integrar simultaneamente processos físico-químicos, respostas biológicas e consequências socioambientais, superando interpretações fragmentadas frequentemente observadas na literatura setorial.

CONCLUSÃO

A literatura analisada demonstra que a poluição orgânica de origem agropecuária representa importante vetor de degradação de ecossistemas aquáticos continentais, particularmente em cenários de intensificação produtiva e manejo inadequado de resíduos pecuários. Os resultados integrados desta revisão evidenciam que os dejetos provenientes da suinocultura, bovinocultura e avicultura apresentam elevado potencial poluidor devido à combinação de matéria orgânica biodegradável, nutrientes, sólidos suspensos e elevada carga microbiológica, capazes de alterar profundamente a qualidade da água e o funcionamento ecológico dos ambientes receptores.

Entre os principais efeitos identificados destacam-se o aumento da demanda bioquímica de oxigênio, redução do oxigênio dissolvido, incremento da turbidez e enriquecimento por nitrogênio e fósforo. Essas alterações físico-químicas constituem mecanismos centrais da degradação limnológica e estabelecem condições favoráveis ao desencadeamento da eutrofização e à proliferação de florações cianobacterianas potencialmente tóxicas. A revisão demonstra que tais processos não ocorrem de forma isolada, mas integram cadeia ecológica cumulativa e frequentemente autorreforçada.

Os impactos biológicos associados ao aporte de resíduos agropecuários revelam respostas consistentes de simplificação ecológica. O enriquecimento nutricional e a deterioração da qualidade da água promovem alterações na composição e estrutura das comunidades aquáticas,

favorecendo organismos tolerantes e reduzindo riqueza, diversidade e estabilidade funcional. Fitoplâncton dominado por poucos táxons, simplificação zooplanctônica, substituição de macroinvertebrados sensíveis e alterações tróficas em comunidades de peixes constituem padrões recorrentes identificados nos estudos revisados, indicando comprometimento progressivo da integridade ecológica.

A síntese integrativa produzida neste estudo reforça que os impactos dos dejetos agropecuários transcendem parâmetros químicos ou sanitários tradicionalmente utilizados na avaliação ambiental. A degradação hídrica associada à produção animal intensiva deve ser compreendida como processo ecossistêmico complexo, envolvendo interações entre dinâmica biogeoquímica, metabolismo aquático e biodiversidade. Sob essa perspectiva, a poluição orgânica agropecuária configura-se simultaneamente como problema ecológico, ambiental e de gestão territorial.

Os resultados obtidos evidenciam a necessidade de fortalecimento de estratégias de monitoramento ambiental e manejo integrado de resíduos pecuários, especialmente em regiões de elevada densidade produtiva. O acompanhamento contínuo de indicadores físico-químicos e biológicos, associado à proteção de zonas ripárias, melhoria dos sistemas de tratamento e uso racional dos dejetos na fertilização agrícola, constitui medida fundamental para reduzir riscos de contaminação e preservar a funcionalidade dos ecossistemas aquáticos.

Por fim, esta revisão destaca a importância de futuras investigações que integrem avaliações limnológicas, biodiversidade e análises ecossistêmicas de longo prazo, permitindo melhor compreensão dos efeitos cumulativos e da resiliência de ambientes aquáticos submetidos à poluição orgânica agropecuária. A consolidação dessa abordagem integrada poderá subsidiar políticas públicas e estratégias de gestão hídrica mais eficazes, orientadas não apenas pela mitigação da contaminação, mas também pela conservação da biodiversidade e da estabilidade ecológica dos sistemas aquáticos continentais.

REFERÊNCIAS

- BOLAN, N. S. et al. Uses and management of poultry litter. *World's Poultry Science Journal*, Cambridge, v. 77, n. 3, p. 673–698, 2021.
- BONADA, N.; PRAT, N.; RESH, V. H. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches. *Annual Review of Entomology*, Palo Alto, v. 51, p. 495–523, 2006.

BURFORD, M. A. et al. Nutrient-related changes in cyanobacterial blooms and cyanotoxins in freshwater ecosystems: implications for management. *Water Research*, Oxford, v. 185, p. 116-129, 2020.

BURKHOLDER, J.; LIBRA, B.; WENZEL, L. Impacts of waste from concentrated animal feeding operations on water quality. *Environmental Health Perspectives*, Research Triangle Park, v. 115, n. 2, p. 308-312, 2007.

CAMARGO, J. A.; ALONSO, Á. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environment International*, Oxford, v. 32, n. 6, p. 831-849, 2006.

CARPENTER, S. R. et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, Washington, v. 8, n. 3, p. 559-568, 1998.

DIAZ, R. J.; ROSENBERG, R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, Washington, v. 321, n. 5891, p. 926-929, 2008.

DODDS, W. K.; SMITH, V. H. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Inland Waters*, Abingdon, v. 6, n. 2, p. 155-164, 2016.

DUDGEON, D. et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, Cambridge, v. 81, n. 2, p. 163-182, 2006.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The future of food and agriculture: alternative pathways to 2050*. Rome: FAO, 2018.

GRIZZETTI, B. et al. Livestock waste and freshwater quality: impacts and policy challenges. *Environmental Science and Policy*, Oxford, v. 79, p. 1-10, 2017.

JEPPESEN, E. et al. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive. *Hydrobiologia*, Dordrecht, v. 676, p. 279-297, 2011.

LIU, Y. et al. Characteristics and environmental risks of swine wastewater in intensive livestock production systems. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 761, p. 143-158, 2021.

MATEO-SAGASTA, J.; ZADEH, S. M.; TURRAL, H. *Water pollution from agriculture: a global review*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.

MCDOWELL, R. W. et al. Management of phosphorus losses from agricultural systems: current approaches and future directions. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 49, n. 2, p. 207-223, 2020.

MOSQUERA-LOSADA, M. R. et al. Agroforestry systems and livestock waste management: implications for water quality and sustainability. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 610-611, p. 1084-1095, 2018.

PAERL, H. W.; OTTEN, T. G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences and controls. *Microbial Ecology*, New York, v. 65, n. 4, p. 995–1010, 2013.

PAERL, H. W. et al. Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. *Harmful Algae*, Amsterdam, v. 54, p. 213–222, 2016.

REID, A. J. et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, Cambridge, v. 94, n. 3, p. 849–873, 2019.

ROSENBERG, D. M.; RESH, V. H. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. New York: Chapman & Hall, 1993.

SHARPLEY, A. N. et al. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles and opportunities. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 349, p. 169–182, 2015.

SILVA, M. E. et al. Environmental impacts associated with swine wastewater and treatment alternatives. *Environmental Monitoring and Assessment*, Dordrecht, v. 189, n. 12, p. 635–648, 2017.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, Amsterdam, v. 24, n. 4, p. 201–207, 2009.

STEINFELD, H. et al. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

VÖRÖSMARTY, C. J. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, London, v. 467, p. 555–561, 2010.