



UNILAB

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
LICENCIATURA EM QUÍMICA

ARTHUR BARBOSA DA SILVA

**TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS APLICADAS À DETECÇÃO DE
HORMÔNIOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS: UMA REVISÃO DOS
IMPACTOS E ASPECTOS REGULATÓRIOS**

REDENÇÃO-CE

2025

ARTHUR BARBOSA DA SILVA

**TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS APLICADAS À DETECÇÃO DE
HORMÔNIOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS: UMA REVISÃO DOS
IMPACTOS E ASPECTOS REGULATÓRIOS**

Monografia apresentada como requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus das Auroras.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Wirley Paulino Ribeiro

REDENÇÃO - CE

2025

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Arthur Barbosa da.

S586s

Técnicas eletroquímicas aplicadas à detecção de hormônios em ambientes aquáticos: uma revisão dos impactos e aspectos regulatórios / Arthur Barbosa da Silva. - Redenção, 2025.
43f: il.

Monografia - Curso de Química, Instituto de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Wirley Paulino Ribeiro.

1. Contaminantes farmacêuticos. 2. Métodos eletroquímicos. 3. Hormônios. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 615.9

ARTHUR BARBOSA DA SILVA

**TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS APLICADAS À DETECÇÃO DE
HORMÔNIOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS: UMA REVISÃO DOS
IMPACTOS E ASPECTOS REGULATÓRIOS**

Monografia apresentada como requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus das Auroras.

Aprovado em: 03/06/2025

BANCA EXAMINADORA:

Professor(a) Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Wirley Paulino Ribeiro
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Professor(a) Examinador(a) 1: Prof^a Francisca Tayane de Sousa Amorim
EEMTI Maria do Carmo Bezerra

Professor(a) Examinador(a) 2: Prof^a Andressa Karoline De Castro Gomes
Instituto Educacional Logos

RESUMO

O aumento da urbanização e industrialização tem exacerbado a poluição ambiental, resultando na emergência de contaminantes farmacêuticos na água potável. Uma classe muito presente são os hormônios, cuja presença é resultado de descartes inadequados, excreção humana e animal, e efluentes industriais. Esses contaminantes representam riscos significativos para a saúde pública e ecossistemas, incluindo disfunções endócrinas. Para enfrentar esse desafio, métodos eletroquímicos como voltametria cíclica, Voltametria de pulso diferencial e eletrodos modificados, têm se destacado pela capacidade de detectar esses compostos com sensibilidade e seletividade em diferentes matrizes ambientais. Diante disso o presente trabalho tem como objetivo avaliar as técnicas para detecção desse contaminante, avaliar os danos que hormônios trazem pro ambiente e para saúde humana e avaliar as legislações vigentes acerca do assunto. trata-se de uma revisão bibliográfica cuja fonte de dados foi PUBMED, MEDLINE, GOOGLE ACADÊMICO e WEB OF SCIENCE. Os descritores utilizados foram: hormônios e águas residuais, água potável e toxicidade humana, toxicidade aquática (do inglês *hormones and wastewater, drinking water and human toxicity, aquatic toxicity*) A pesquisa atual destaca a necessidade de legislações mais rigorosas e tecnologias avançadas de tratamento de água para mitigar os efeitos dos contaminantes emergentes na água potável, explorar técnicas eficientes de detecção e expor as lacunas no que diz respeito às legislações voltadas aos contaminantes

Palavras-chave: Contaminantes farmacêuticos. Água potável. Métodos eletroquímicos. Hormônios.

ABSTRACT

Increased urbanization and industrialization have exacerbated environmental pollution, resulting in the emergence of pharmaceutical contaminants in drinking water. One very common class of contaminants are hormones, whose presence is the result of improper disposal, human and animal excretion, and industrial effluents. These contaminants pose significant risks to public health and ecosystems, including endocrine dysfunction. To address this challenge, electrochemical methods such as cyclic voltammetry, differential pulse voltammetry, and modified electrodes have stood out for their ability to detect these compounds with sensitivity and selectivity in different environmental matrices. Therefore, the present study aims to evaluate the techniques for detecting this contaminant, assess the damage that hormones cause to the environment and human health, and evaluate current legislation on the subject. This is a bibliographic review whose data sources were PUBMED, MEDLINE, GOOGLE SCHOLAR, and WEB OF SCIENCE. The descriptors used were: hormones and wastewater, drinking water and human toxicity, aquatic toxicity. Current research highlights the need for stricter legislation and advanced water treatment technologies to mitigate the effects of emerging contaminants in drinking water, explore efficient detection techniques and expose gaps in legislation targeting contaminants.

Keywords: Pharmaceutical contaminants. Drinking water. Electrochemical methods. Hormones.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GERAL	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	METODOLOGIA	11
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
4.1	Contaminantes emergentes farmacêuticos em água potável e seus impactos.....	12
4.1.1	Hormônios.....	14
4.2	Métodos Eletroquímicos para Avaliação e Quantificação de Contaminantes Farmacêuticos.....	16
4.2.1	Voltametria Cíclica.....	17
4.2.3	Voltametria de Pulso Diferencial (VPD).....	18
4.2.3	Eletrodos modificados.....	19
4.3	Legislação e regulamentação relacionadas aos contaminantes farmacêuticos na água potável.....	21
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5.1	Abordagens metodológicas dos estudos.....	23
5.2	Impactos dos hormônios a saúde humana e ambiental.....	30
5.3	Legislações e regulamentações existentes a respeito de contaminantes emergentes.....	35
6	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e industrialização têm contribuído significativamente para o aumento da poluição ambiental, que por sua vez contribui para uma grande preocupação em todo o mundo acerca dos efeitos nocivos da poluição nos ecossistemas e na saúde humana. Devido às atividades antropomórficas de origem industrial, agrícolas e domésticas, observa-se hoje, um aumento significativo de substâncias químicas liberadas no meio ambiente nos últimos anos (Wang et al., 2016).

Muitas dessas substâncias têm sido detectadas no ambiente. Fármacos, assim como novos pesticidas, produtos de cuidado/higiene pessoal, suplementos nutricionais são exemplos do que hoje são conhecidas como contaminantes emergentes, para os quais não há legislação estabelecendo padrões ou limites ambientais contribuindo assim para o aumento da preocupação devido às suas possíveis consequências perigosas para a saúde humana e os ecossistemas aquáticos e terrestres (Birch et al., 2015).

Esses contaminantes são produtos químicos ou agentes biológicos que foram encontrados em concentrações significativas no meio ambiente. O termo "emergente" indica que essas substâncias estão recebendo mais notoriedade e mais importância nos problemas ambientais à medida que a tecnologia de detecção melhora e nossa compreensão de como os mesmos afetam o ecossistema e a saúde humana também (Montagner, 2017).

Tais poluentes incluem uma variedade de substâncias, dentre eles destaca-se os produtos de origem farmacêutica, como hormônios. Sua presença no ambiente pode ser atribuída a diversos fatores, tais como o descarte inadequado de medicamentos e o uso excessivo de produtos químicos na agricultura e pecuária (Rodrigues et al., 2020).

Os medicamentos são categorizados de acordo com sua atividade biológica, estrutura química ou modo de ação. Os analgésicos, antitérmicos, anti-inflamatórios, antibióticos, anti-hipertensivos, hormônios e assim por diante podem ser classificados de acordo com sua atividade biológica. (Puneeth et al., 2021).

A forma como esses medicamentos agem pode variar de acordo com a classificação a qual ele pertence. Após o uso do medicamento, o corpo absorve essas substâncias, as metaboliza parcialmente e as elimina nas formas originais, como metabólitos. Essas substâncias chegam ao esgoto doméstico e/ou corpos d'água quando são eliminadas pela urina e fezes de animais e humanos (Lima et al, 2024).

Uma classe importante de medicamentos conhecida como hormônios regulam importantes processos biológicos e fisiológicos em animais e humanos. No entanto, quando esses compostos são liberados no meio ambiente, eles podem afetar negativamente a

reprodução, desenvolvimento e comportamento dos organismos aquáticos e terrestres. A exposição a altas concentrações desses hormônios através do consumo de água contaminada pode afetar negativamente também, a saúde humana. Como resultado, os hormônios são considerados contaminantes emergentes e causam preocupação devido aos seus possíveis efeitos nocivos à saúde (Lima et al, 2019).

Lidar com os poluentes emergentes é uma tarefa difícil devido à sua diversidade e origens dispersas, bem como complexas interações com o meio ambiente. Muitos desses compostos têm características físico-químicas distintas, o que dificulta sua detecção e remoção. Dados de monitoramento ambiental realizados no Brasil indicam que fármacos são encontrados em concentrações muito pequenas que podem variar de dezenas a centenas de nanogramas por litro (ng.L-1) (Lima et al, 2019).

Nesse contexto, a eletroquímica surge como uma ferramenta promissora para o estudo e monitoramento de poluentes emergentes. As técnicas eletroquímicas podem detectar compostos orgânicos e inorgânicos em diferentes matrizes ambientais com rapidez, sensibilidade e seletividade. Ainda assim, embora o estudo do comportamento eletroquímico de poluentes emergentes seja crucial, ainda há pouco conhecimento sobre como esses compostos interagem com certos sistemas eletroquímicos e como essas interações podem ser úteis para a detecção e tratamento ambiental.

Diante da crescente preocupação com a poluição atribuída a esses contaminantes e da relevância da eletroquímica para o seu estudo, este trabalho se justifica pela necessidade de realizar uma revisão da literatura sobre os efeitos nocivos desses compostos e explorar técnicas de detecção para os mesmos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a presença de hormônios como contaminantes emergentes de origem farmacêutica em águas, bem como as principais técnicas utilizadas para sua detecção e os riscos associados à exposição prolongada.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os métodos eletroquímicos utilizados na detecção e quantificação de contaminantes farmacêuticos: hormônios em água potável.
- Investigar os potenciais impactos dos resíduos de hormônios na saúde pública, incluindo os riscos associados a potenciais efeitos adversos à saúde humana decorrentes da exposição crônica a esses compostos;
- Examinar as legislações e regulamentações existentes relacionadas à presença de contaminantes farmacêuticos emergentes na água potável.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa. De acordo com Silva e Menezes (2020), esse tipo de estudo é fundamental para mapear o estado atual do conhecimento sobre determinado tema, identificar lacunas e tendências e, ainda, fornecer subsídios para o desenvolvimento de novas investigações científicas.

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio de pesquisa sistematizada nas bases de dados eletrônicas PUBMED, MEDLINE, Google Acadêmico e Web of Science, abrangendo o período de janeiro de 2015 a maio de 2025. Os critérios temporais foram definidos com o objetivo de garantir a atualidade das informações e a relevância dos achados científicos incluídos.

Para a construção do corpus da pesquisa, foram utilizados os seguintes descritores: hormônios e águas residuais, água potável e toxicidade humana, e toxicidade aquática (do inglês *hormones and wastewater, drinking water and human toxicity, aquatic toxicity*). A escolha desses termos fundamenta-se na necessidade de abranger as principais dimensões relacionadas ao tema central do estudo, contemplando tanto a origem dos contaminantes (águas residuais), quanto os impactos nos organismos aquáticos (toxicidade aquática) e os riscos potenciais à saúde humana (toxicidade humana). A inclusão dos descritores em inglês teve como finalidade ampliar o alcance da busca em bases internacionais, favorecendo a diversidade e a robustez das fontes consultadas.

O processo metodológico foi desenvolvido em duas etapas: triagem e elegibilidade. Na etapa de triagem, foram excluídos artigos duplicados, publicações cujo título e/ou resumo não apresentavam relação direta com o objetivo do estudo e trabalhos publicados antes de 2015. Na etapa de elegibilidade, os artigos foram analisados com base no conteúdo do resumo, nos objetivos propostos e nos resultados apresentados. Nessa fase, foram excluídas as publicações que não abordavam os hormônios como contaminantes ambientais, os estudos que não apresentavam dados experimentais ou revisão sistemática e os trabalhos que tratavam da contaminação hídrica por fármacos em geral, sem foco específico em hormônios.

Foram considerados aptos para compor a revisão apenas os estudos que atendiam, ao menos, um dos seguintes critérios: presença de dados sobre hormônios em diferentes matrizes ambientais; resultados de testes toxicológicos com organismos aquáticos; discussões sobre efeitos toxicológicos à saúde humana; aplicação de técnicas eletroquímicas na detecção de hormônios em águas; e abordagem de legislações pertinentes à presença desses contaminantes nos recursos hídricos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Contaminantes emergentes farmacêuticos em água potável e seus impactos.

Os fármacos são substâncias químicas repletas de propriedades específicas que são utilizadas para fins medicinais. Dentre essas propriedades pode-se destacar moderada solubilidade em água, sendo lipofílicas e apresentando comportamento biológico ativo. Normalmente seus usos se dão de várias formas: Inalação e aplicação sobre a pele (tópico); Via oral (interna) e/ou Injeções e infusões (parental) (Le, 2024).

Após a administração, os fármacos são absorvidos e distribuídos pelo organismo, passando por processos de biotransformação, principalmente no fígado e nos rins. Essas reações enzimáticas convertem compostos lipofílicos em formas mais polares e hidrossolúveis, facilitando sua excreção por meio da urina ou bile. A biotransformação ocorre em duas fases: a Fase I, que envolve reações de oxidação, redução ou hidrólise, e a Fase II, que consiste em reações de conjugação com grupos polares, como ácido glucurônico ou sulfato. Esses processos são essenciais para a eliminação eficiente de substâncias tóxicas e fármacos do corpo" (Garza et al., 2023)

Nos últimos anos, a presença de contaminantes emergentes, especialmente de origem farmacêutica, em água potável tem se tornado uma preocupação crescente devido ao seu potencial impacto na saúde pública e no meio ambiente. Esses contaminantes incluem uma variedade de produtos farmacêuticos, tais como hormônios, que podem entrar nos sistemas aquáticos através de diversas vias, como o descarte inadequado de medicamentos, a excreção humana e animal, e os efluentes industriais e hospitalares (Smith., 2015; Johnson; Williams, 2017).

Contaminantes emergentes farmacêuticos são definidos como substâncias químicas ou compostos que são detectados no ambiente em concentrações significativas e que não foram amplamente monitorados no passado, mas que têm o potencial de causar efeitos adversos à saúde humana e ao ecossistema. Dentre esses contaminantes, os hormônios se destacam devido à sua persistência no ambiente e aos riscos associados à disfunções endócrinas (Kümmerer, 2018).

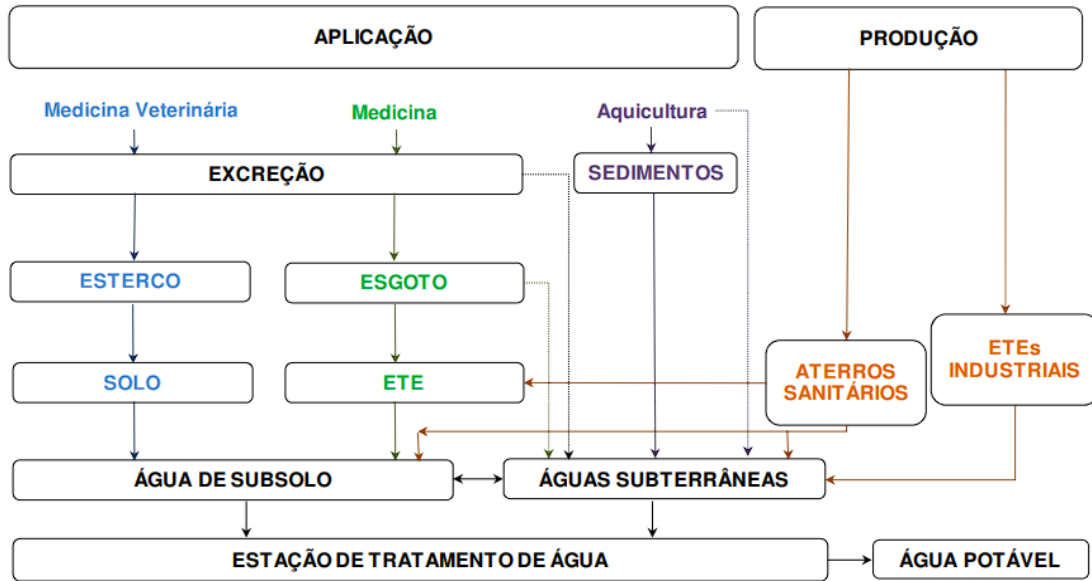
Tais contaminantes podem entrar nos sistemas de água potável através de diversas vias. A infiltração no solo, a lixiviação de aterros sanitários e a descarga direta em corpos d'água são alguns dos mecanismos que permitem a dispersão desses compostos no meio ambiente. Os resíduos farmacêuticos podem se mover através de múltiplas vias ambientais, alcançando finalmente os sistemas de água potável (Wilkinson, 2017).

Uma das principais fontes de contaminação farmacêutica é o descarte inadequado de medicamentos vencidos ou não utilizados. Muitas pessoas descartam esses produtos no lixo comum ou na rede de esgoto, o que pode levar à sua presença nos sistemas de tratamento de água que não são projetados para remover esses compostos. A falta de infraestrutura adequada para o tratamento de água e esgoto agrava a situação. Muitas estações de tratamento de água não possuem tecnologias avançadas para remover contaminantes emergentes, o que resulta na presença de resíduos farmacêuticos na água potável (Nunes, 2020). No contexto brasileiro, a situação é agravada pelo tratamento de esgoto inadequado em muitas regiões, o que aumenta a carga de contaminantes farmacêuticos nos corpos d'água (Martins, 2018).

Outro grande fator que contribui para essa situação são os efluentes industriais e hospitalares, ambos também são fontes importantes de resíduos farmacêuticos na água potável. As indústrias farmacêuticas e os hospitais descartam grandes quantidades de medicamentos, que podem acabar nos sistemas de água se não forem adequadamente tratados. Estudos têm mostrado que os efluentes hospitalares contêm altas concentrações de diversos fármacos. Os efluentes hospitalares são uma fonte significativa de contaminação farmacêutica, necessitando de tratamentos específicos para mitigar seu impacto ambiental. No Brasil, a regulamentação e o tratamento desses efluentes ainda são insuficientes, contribuindo para a contaminação dos recursos hídricos (Montagner, 2019).

Para evidenciar essas rotas de contaminação, Bila e Dezotti 2003, propuseram quais seriam as principais formas que tais contaminantes chegam ao meio ambiente, conforme figura 1.

Figura 1 – Rotas de contaminação de fármacos no ambiente



Fonte – Adaptado de Bila e Dezotti (2003)

4.1.1 Hormônios.

Os hormônios são substâncias químicas produzidas por glândulas endócrinas que regulam diversas funções fisiológicas em organismos vivos. Entre os hormônios mais preocupantes do ponto de vista ambiental estão os hormônios estrogênicos, como o estradiol, a estrona e o etinilestradiol, amplamente utilizados em terapias hormonais e contraceptivos. Esses compostos podem ser liberados no meio ambiente através da excreção humana e animal, bem como por efluentes de indústrias e hospitais (Silva; Silva, 2021).

A estrona (figura 2 A) é reconhecida como sendo um hormônio natural feminino. O processo de menopausa demonstra uma concentração maior de estrona no plasma sanguíneo que em relação aos estrogênios 17β -estradiol e estriol (Qureshi et al., 2020). Vale ressaltar que, a estrona também pode estar presente no sistema circulatório masculino e excretado pelo mesmo, contribuindo também para elevação da concentração desses hormônios em efluentes de águas residuais. A estrona (E1) pode ser resultado da degradação por oxidação do β -estradiol. Levando em consideração o efeitos adversos, pode-se concluir que E1 é menos potente quando comparado com 17β -estradiol (Guardian; Aga, 2019; Tapper et al., 2020)

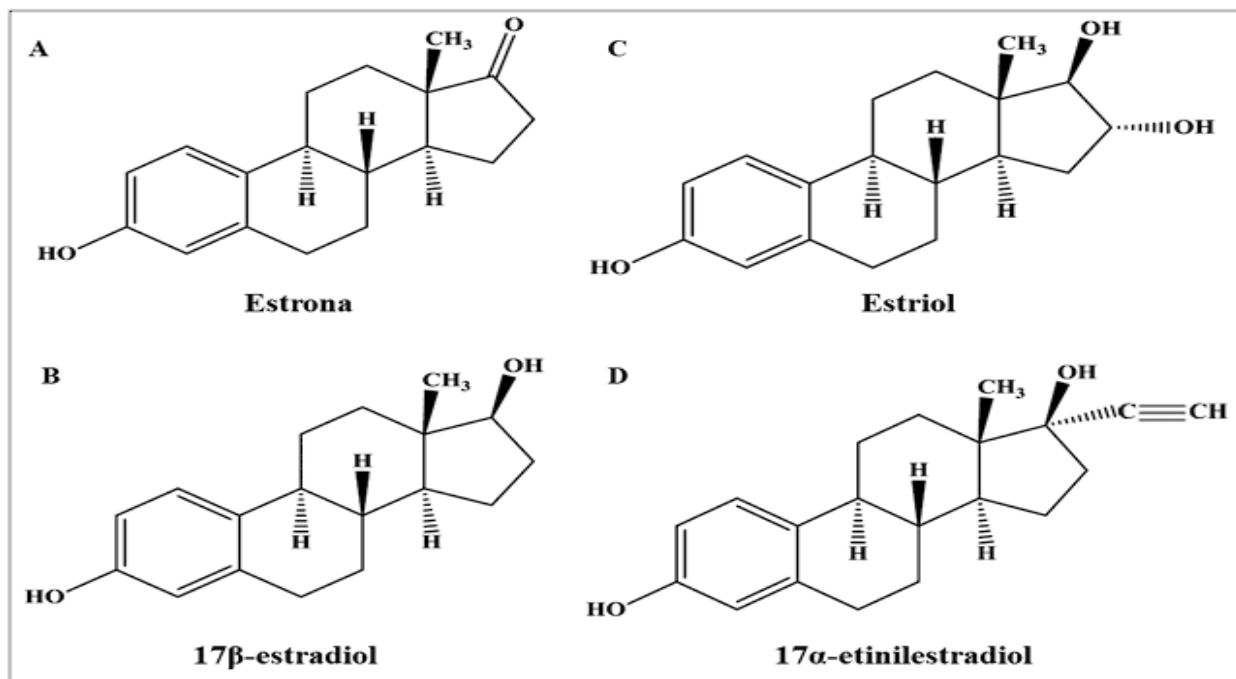
17β -estradiol (E2) (figura 2 B) por sua vez está diretamente ligada ao desenvolvimento da endometriose, uma doença que afeta o útero alterando o funcionamento normal do mesmo, ocasionando em infertilidade (Sokwala, 2021). A molécula do (E2) contém até 18 átomos de carbono contendo um grupo hidroxila ligada a um anel de 5 carbonos e 1 anel fenólico cujo o

mesmo é a estrutura responsável por gerar a resposta estrogênica no organismo. (Fuentes; Silveyra, 2019).

O Estriol (E3) (figura 2 C) por sua vez é um metabólito resultante da oxidação do 17β -estradiol presente tanto em homens quanto em mulheres. Durante a gestação ele é produzido pela placenta e secretado em maior quantidade quando comparado aos outros dois (Torres et al., 2021)

Além desses hormônios de origem natural, têm-se 17α -etinilestradiol (EE2) (figura 2 D) um hormônio sintético derivado do estriol muito comum em formulações de anticoncepcionais, apresenta maior resistência à biodegradação. Estudos têm mostrado que a atividade estrogênica 17α -etinilestradiol comparado aos hormônios supracitados são duas vezes mais potentes em seres humanos. Além disso, em relação à fauna aquática esse número chega a extraordinários 11 a 30 vezes mais potentes que 17β -estradiol (Jackson; Klerks, 2020). Sendo assim, é de senso comum que o 17α -etinilestradiol como sendo um dos disruptores endócrinos mais prejudiciais ao ambiente aquático devido a sua resistência à biodegradação e bioacumulação.

Figura 2. Estruturas molecular da Estrona (A), 17β -estradiol (B), Estriol (C) e 17α -etinilestradiol (D)



Fonte: Adaptado de Cais (2016)

Os hormônios podem entrar no ambiente aquático por meio de diversas vias. A excreção humana e animal é uma das principais fontes, já que uma parte dos hormônios administrados não é metabolizada completamente e é excretada praticamente inalterada ou como metabólitos ativos. Estudos indicam que resíduos hormonais são detectados com

frequência em efluentes de estações de tratamento de esgoto e corpos d'água receptores. (Teixeira et al., 2018).

Tais substâncias no ambiente aquático podem causar efeitos adversos devido ao seu potencial de interferir nos sistemas endócrinos de organismos aquáticos, além disso, possuem também a capacidade de mimetizar ou bloquear os hormônios naturais de organismos não-alvo, incluindo peixes e invertebrados. Os hormônios estrogênicos, por exemplo, são conhecidos por sua capacidade de interagir com receptores hormonais, induzindo respostas que alteram a fisiologia e o comportamento reprodutivo dos organismos aquáticos. A exposição a hormônios estrogênicos pode resultar em disfunções reprodutivas de peixes reduzindo a fertilidade (Guellard et al., 2020).

Além desses, outros impactos decorrentes da presença de hormônios no ambiente aquáticos podem ser observados. A exposição a hormônios estrogênicos pode induzir a produção de vitelogenina, uma proteína da gema do ovo normalmente produzida pelas fêmeas, em peixes machos, dando origem ao que ficou conhecido como feminização de peixes machos. Esse fenômeno pode comprometer a fertilidade e a viabilidade das populações de peixes (Hernandez, 2020).

Outro impacto seria a interferência endócrina, hormônios ambientais podem atuar como desreguladores endócrinos, afetando o desenvolvimento e a reprodução de uma ampla gama de espécies aquáticas. Estes efeitos podem levar a desequilíbrios populacionais e ecológicos. Portanto, os desreguladores endócrinos são capazes de alterar significativamente as funções hormonais normais em organismos aquáticos, com consequências ecológicas de longo prazo (Kasonga et al., 2021)

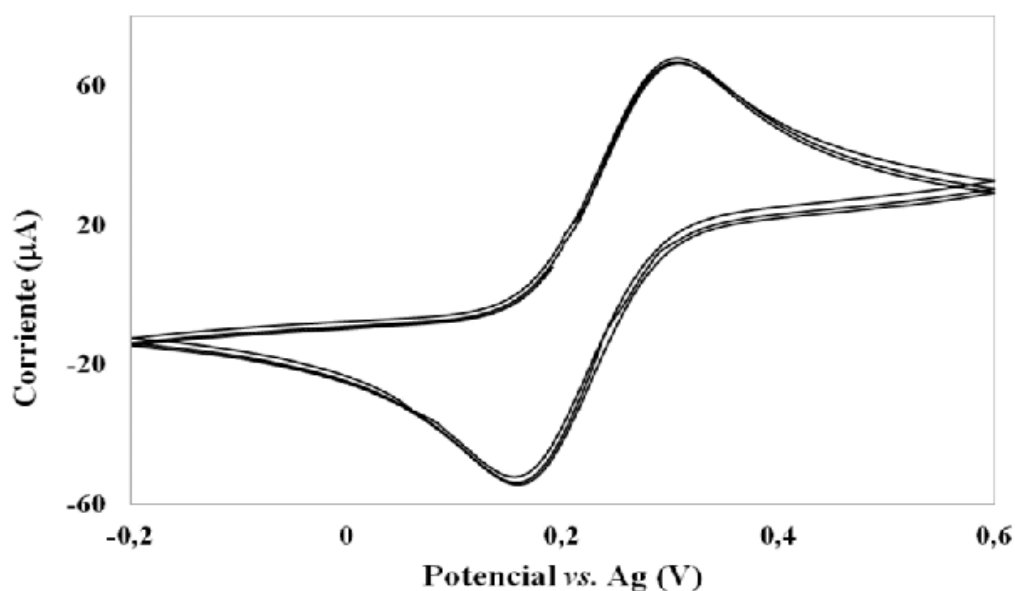
4.2 Métodos Eletroquímicos para Avaliação e Quantificação de Contaminantes Farmacêuticos.

Os métodos eletroquímicos têm se destacado na detecção e quantificação de contaminantes farmacêuticos emergentes devido à sua alta sensibilidade, seletividade e capacidade de operar em condições variadas. Entre os métodos mais utilizados estão a voltametria cíclica, voltametria de pulso diferencial, amperometria e eletrodos modificados e biossensores. Esses métodos são baseados na medição de correntes elétricas resultantes de reações de oxidação-redução dos contaminantes na superfície de eletrodos (Hernandez et al., 2018).

4.2.1 Voltametria Cíclica.

A voltametria cíclica (VC) é uma técnica eletroquímica bastante utilizada para estudos das propriedades redox de substâncias químicas. Nessa metodologia, aplica-se ao eletrodo de trabalho um potencial que varia continuamente ao longo do tempo, primeiro em uma direção e depois na inversa, resultando na formação de ciclos. A corrente resultante é registrada em função do potencial aplicado, gerando um voltamograma característico (Figura 3) que revela informações sobre os processos de oxidação e redução do analito em estudo (Silva, 2022)

Figura 3 - Exemplo de voltamograma (VC)



Fonte: Flores, 2021

No contexto da análise de contaminantes emergentes, como antibióticos e hormônios, a voltametria cíclica (VC) destaca-se como uma ferramenta analítica poderosa devido à sua alta sensibilidade, seletividade e capacidade de elucidar mecanismos redox complexos. Essa técnica eletroquímica permite a investigação detalhada das propriedades eletroativas dessas moléculas, proporcionando informações cruciais sobre seus potenciais de oxidação e redução, número de elétrons transferidos e comportamento reversível ou irreversível em soluções aquosas. Estudos recentes indicam que a VC é particularmente eficaz na caracterização de compostos farmacêuticos devido à presença de grupos funcionais suscetíveis à oxidação eletroquímica, como fenóis, aminas e heterociclos nitrogenados, estruturas frequentemente encontradas em antibióticos e hormônios sintéticos (Mendes, 2017).

Além disso, essa técnica permite a identificação e monitoramento de intermediários reativos formados durante os processos de degradação eletroquímica, sendo útil para avaliar a estabilidade dos produtos e a eficiência de métodos de tratamento baseados em processos oxidativos avançados. Ao registrar múltiplos ciclos de varredura de potencial, a VC também pode fornecer informações sobre possíveis processos de adsorção e interação entre os contaminantes e a superfície do eletrodo, o que é essencial para o desenvolvimento de sensores eletroquímicos mais seletivos (Mendes, 2017).

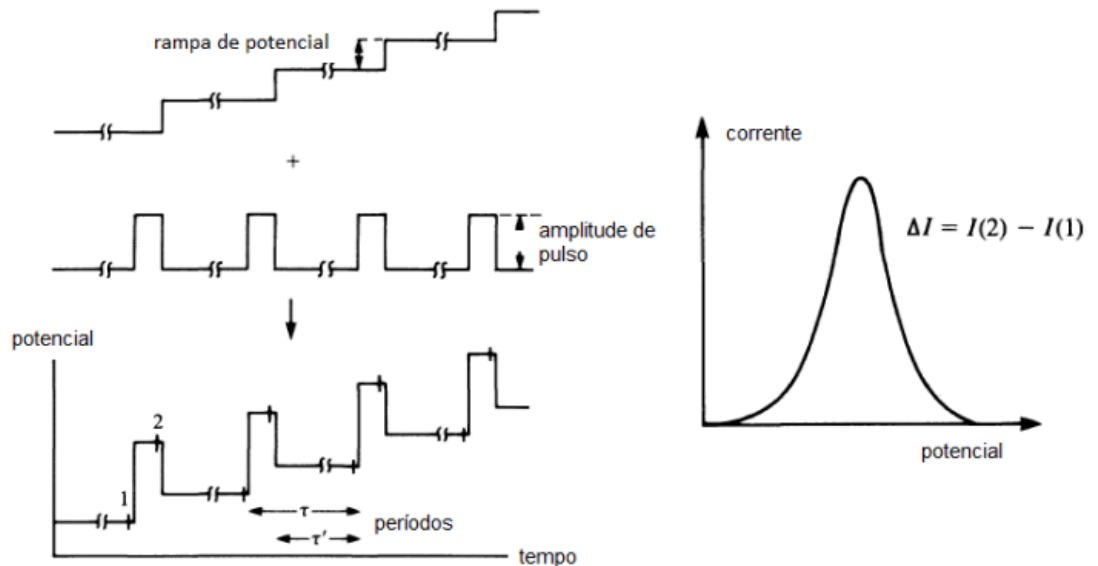
Dessa forma, a voltametria cíclica não apenas contribui para a detecção e quantificação desses poluentes emergentes, como também desempenha um papel relevante na compreensão dos mecanismos de degradação e na otimização de tecnologias de remediação eletroquímica aplicadas ao tratamento de águas contaminadas. (Mendes, 2017).

Além disso, a aplicação da VC na análise de hormônios é particularmente relevante, pois permite a detecção e quantificação desses compostos em matrizes ambientais complexas. Além disso, a técnica auxilia na compreensão dos mecanismos de degradação eletroquímica desses contaminantes, contribuindo para o desenvolvimento de métodos de remediação mais eficientes. A capacidade da voltametria cíclica de fornecer informações sobre as reações redox desses compostos reforça ainda mais sua importância em estudos ambientais e de saúde pública (Elgrishi, 2017).

4.2.2 Voltametria de Pulso Diferencial (VPD).

A Voltametria de Pulso Diferencial (VPD) é uma técnica eletroanalítica que se destaca por sua alta sensibilidade e baixos limites de detecção. Nesta técnica, aplica-se uma sequência de pulsos de potencial sobrepostos a uma varredura linear de potencial, medindo-se a corrente diferencial imediatamente antes e no final de cada pulso. Essa abordagem minimiza a corrente capacitiva e enfatiza a corrente faradaica, relacionada às reações de oxidação ou redução do analito na superfície do eletrodo. Dessa forma, a VPD fornece informações quantitativas e qualitativas sobre espécies eletroativas em solução (Tao et al., 2023) .

Figura 4 - Sinais de excitação para voltametria de pulso diferencial



Fonte: Pacheco, 2013

Entre as principais vantagens da VPD estão a alta sensibilidade, baixo custo operacional, simplicidade instrumental e boa seletividade, especialmente quando combinada com eletrodos modificados. Essa técnica permite a detecção de analitos em concentrações muito baixas, frequentemente na faixa de nanomolar (nM), tornando-se uma alternativa competitiva a métodos cromatográficos mais onerosos e complexos. Além disso, a modificação de eletrodos com materiais como nanotubos de carbono, óxidos metálicos ou polímeros condutores amplia sua aplicabilidade em sistemas complexos, como amostras ambientais (Santana, 2020).

A VPD tem sido amplamente utilizada na detecção de contaminantes emergentes, como hormônios, em diversas matrizes ambientais. Estudos recentes demonstram a eficiência da técnica na quantificação de fármacos. A combinação da VPD com eletrodos modificados permite superar interferências da matriz e obter maior seletividade na detecção desses contaminantes, tornando-se uma ferramenta promissora para o monitoramento ambiental de poluentes de origem farmacêutica (Wang et al., 2022).

4.2.3 Eletrodos modificados.

Eletrodos modificados são eletrodos convencionais, como os de carbono vítreo, ouro ou platina, cuja superfície é recoberta ou funcionalizada com materiais específicos para aprimorar suas propriedades eletroquímicas. Essa modificação pode envolver compostos

orgânicos, polímeros condutores, nanomateriais (como óxidos metálicos, nanotubos de carbono, grafeno), biomoléculas (enzimas, anticorpos) ou complexos metálicos. O objetivo principal da modificação é aumentar a seletividade, sensibilidade, estabilidade ou capacidade de reconhecimento de analitos específicos, como contaminantes emergentes (Bounegru et al., 2025).

Esses eletrodos funcionam a partir da interação entre a superfície modificada e as moléculas-alvo presentes na amostra. A modificação da superfície altera características como a condutividade eletrônica, a área ativa e a afinidade química do eletrodo, o que influencia diretamente o sinal eletroquímico gerado durante a análise. Quando um analito interage com o eletrodo modificado, ocorre uma transferência de carga (oxidação ou redução), resultando em um pico de corrente que pode ser medido e correlacionado à concentração da substância. Isso torna a detecção mais eficiente, mesmo em níveis traços (Malode et al., 2024).

As modificações podem ser físicas, químicas ou eletroquímicas. Por exemplo, o depósito de filmes finos de polímeros condutores permite criar eletrodos sensíveis a certas classes de compostos. Já os nanomateriais, como nanopartículas metálicas ou estruturas de carbono, aumentam significativamente a área superficial e melhoram a resposta do sinal eletroquímico. Além disso, eletrodos funcionalizados com grupos específicos podem reconhecer seletivamente contaminantes como hormônios estrogênicos ou antibióticos betalactâmicos, por meio de interações específicas como ligações de hidrogênio, forças π - π ou complexação metálica (Liu et al., 2019)

Eletrodos modificados têm sido amplamente empregados na detecção eletroquímica de antibióticos em água, devido à presença de grupos funcionais facilmente oxidáveis nesses compostos. Por exemplo, eletrodos modificados com nanotubos de carbono dopados com óxidos metálicos têm demonstrado alta sensibilidade na detecção de amoxicilina, tetraciclina e ciprofloxacina. Essas modificações promovem uma transferência de elétrons mais eficiente entre o antibiótico e o eletrodo, permitindo a quantificação mesmo em concentrações muito baixas (nanomolar ou micromolar), comuns em ambientes aquáticos contaminados (Yu et al., 2021).

No caso dos hormônios, como o 17β -estradiol e o etinilestradiol, eletrodos modificados com grafeno ou polímeros moleculares impressos têm mostrado excelente seletividade e limites de detecção reduzidos. Esses compostos, que possuem atividade endócrina e representam risco ambiental, podem ser detectados com alta precisão por eletrodos que reconhecem sua estrutura fenólica e esteroide. A modificação da superfície do eletrodo facilita a adsorção seletiva dos hormônios e gera sinais eletroquímicos nítidos,

tornando o método eficaz para o monitoramento ambiental de águas residuais e potáveis (Torres et al., 2021).

4.3 Legislação e regulamentação relacionadas aos contaminantes farmacêuticos na água potável.

Os recursos hídricos são as águas superficiais ou subterrâneas disponíveis para qualquer tipo de uso de região ou bacia como os rios, lagos, arroios, lençóis freáticos, entre outros. Ambos são fundamentais para os homens, plantas e animais. A água é responsável pela nutrição das florestas, para produção agrícola e, também, para a biodiversidade nos sistemas terrestres e aquáticos (Gonsioroski et al., 2020). Portanto, a água é fundamental para a existência humana como um todo, no entanto, em um ambiente poluído ou contaminado pode representar um perigo para a saúde.

A presença de contaminantes farmacêuticos na água potável tem motivado a criação de normas e diretrizes para proteger a saúde pública e garantir a qualidade dos recursos hídricos. No cenário internacional, a Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece diretrizes para controle de qualidade da água potável, incluindo limites máximos permitidos para alguns contaminantes emergentes, como antibióticos e hormônios (WHO, 2017).

O conceito de Saúde Única ou One Health reconhece que a saúde dos seres humanos, animais, plantas e o ambiente está interconectada e interdependente (Conceição et al., 2023). Tudo isso por se levar em consideração a crescente interdependência entre seres humanos e animais domésticos / silvestres e o fato de que, a qualidade de vida de ambos e a sua saúde dependem de um meio ambiente ecologicamente equilibrado (Carneiro; Pettan-Brewer, 2021).

A ANVISA possui a Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 274, de 22 de setembro de 2018. Dispõe sobre o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (ANVISA, 2018). No entanto, apesar dos avanços na elaboração de normas, a implementação efetiva e o cumprimento das regulamentações enfrentam desafios significativos. Entre os principais desafios estão a falta de infraestrutura laboratorial adequada para monitoramento contínuo dos contaminantes, a complexidade na detecção de baixas concentrações desses compostos e a necessidade de capacitação técnica dos profissionais envolvidos (Malode et al., 2024).

Para fortalecer a gestão ambiental e promover a saúde pública, é fundamental adotar estratégias integradas que incluam ações de educação ambiental, investimentos em tecnologias de tratamento de água avançadas e aprimoramento das legislações existentes. Estudos sugerem a necessidade de revisão periódica das normas vigentes, considerando novas

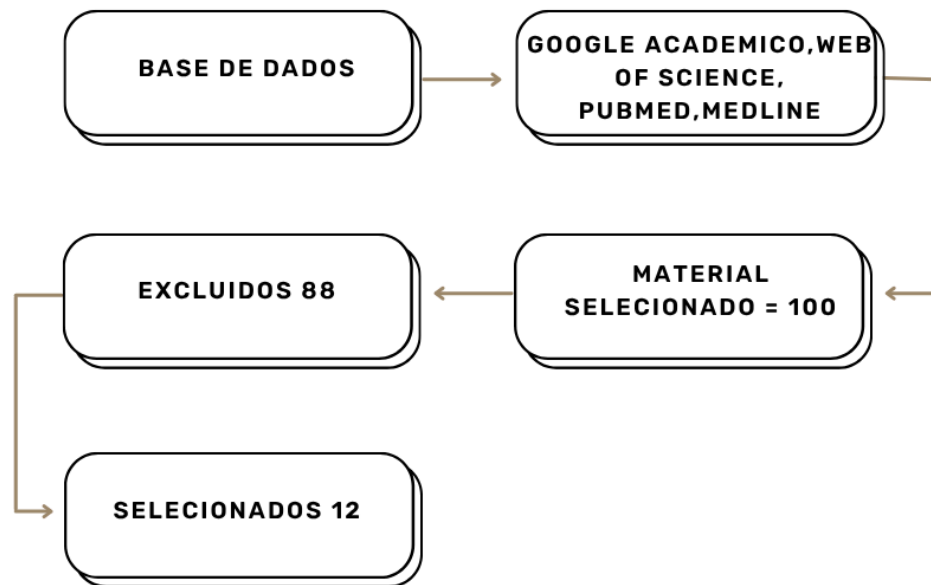
evidências científicas e o impacto das mudanças climáticas na distribuição e persistência de contaminantes farmacêuticos (Ortúzar et al., 2022).

Os métodos eletroquímicos têm demonstrado aplicabilidade prática na análise de água potável, permitindo a detecção precisa de resíduos de antibióticos e hormônios em concentrações extremamente baixas. No contexto brasileiro, a implementação dessas técnicas em sistemas de monitoramento de qualidade da água pode auxiliar na identificação precoce de contaminantes e na mitigação de riscos à saúde pública (Lima et al., 2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A priori, foram selecionados na primeira triagem 78 artigos, dentre os quais 68 foram excluídos baseados nos critérios de exclusão adotados na metodologia.

Figura 5 - fluxograma do processo de escolhas dos artigos para o trabalho



Fonte - Próprio autor

5.1 Abordagens metodológicas dos estudos

Os Artigos foram nomeados de A1 a A9, a fim de melhor organizar a análise de dados. Os resultados da seleção dos artigos estão representados na Tabela 1

Tabela 1 - Identificação da amostra dos estudos segundo Estudo, ano, autor(es), título e Técnica empregada.

Estudo	Ano	Autor(es)	Título	Técnica empregada
A1	2016	Nunes et al	Método de triagem rápida para detecção de etinilestradiol em Água Natural Empregando Voltametria	Voltametria de pulso diferencial; voltametria cíclica
A2	2019	Gomes et al	Sensor voltamétrico baseado em eletrodo de carbono vítreo modificado com cobalto-poli(metionina) para determinação do hormônio estriol em produtos farmacêuticos e urina	Sensor modificado; Voltametria de pulso diferencial (DPV)
A3	2019	Coelho et al	Desenvolvimento de sensor eletroquímico baseado em Materiais de Carbonaceal e Ftalocianinas Metálicas para Determinação de Etinilestradiol	Eletrodo modificado; voltametria cíclica
A4	2020	Spychalska et al	Biossensor eletroquímico para detecção de 17 b estradiol usando polímero semicondutor e peroxidase de raiz-forte	Sensor modificado.
A5	2022	Barreto Et al	Um sensor eletroquímico baseado em óxido de grafeno reduzido e nanopartículas de cobre para monitoramento de níveis de estriol em Amostras de água após biorremediação	Eletrodo modificado
A6	2022	Silva et al	Desenvolvimento de um eletrodo quimicamente modificado com Polímero de impressão molecular magnética (MagMIP) para determinação de 17- γ estradiol em amostras de água	Eletrodo modificado;(DPA _d SV)
A7	2023	Galvão et al	Determinação eletroquímica de 17- β -estradiol usando um cristal vítreo Eletrodo de carbono modificado com nanopartículas de α -Fe ₂ O ₃ Suportado em nanotubos de carbono	Eletrodo modificado
A8	2023	Musa et al	Eletrodos à base de grafeno para monitoramento de estradiol	Eletrodo modificado; voltametria cíclica
A9	2025	Chýlková et al	Determinação Voltamétrica do Teor Total da Maioria Estrogênios comumente encontrados em meios aquosos	voltametria de pulso diferencial (DPV); Eletrodomodificado

Fonte: Autoria própria, 2025

No estudo de Nunes et al., 2016 os autores desenvolveram e validaram um procedimento voltamétrico como ferramenta de triagem para detectar o hormônio 17 α -etinilestradiol (EE2) em amostras de água. A técnica empregada foi a voltametria, que permitiu a análise direta das amostras sem a necessidade de pré-tratamentos, como extração ou purificação, simplificando o processo analítico e reduzindo o tempo e os custos envolvidos. Os resultados indicaram que o método proposto é eficaz na detecção de EE2 em soluções aquosas e águas naturais. A precisão do método foi avaliada utilizando material de referência de água doce com concentrações certificadas de EE2, demonstrando boa concordância entre os valores obtidos e os valores de referência.

Além disso, o método apresentou boa reprodutibilidade e sensibilidade, com limites de detecção adequados para a aplicação em monitoramento ambiental. Os resultados indicaram que o método proposto é eficaz na detecção de EE2 em soluções aquosas e águas naturais. A precisão do método foi avaliada utilizando material de referência de água doce com concentrações certificadas de EE2, demonstrando boa concordância entre os valores obtidos e os valores de referência.

Ademais, o método apresentou boa reprodutibilidade e sensibilidade, com limites de detecção adequados para a aplicação em monitoramento ambiental. A eficiência da técnica foi evidenciada pela capacidade de detectar EE2 em concentrações relevantes para o controle de qualidade da água, sem a necessidade de etapas complexas de preparação da amostra. A abordagem voltamétrica mostrou-se uma alternativa promissora para o monitoramento rápido e eficiente de contaminantes hormonais em ambientes aquáticos.

Dando continuidade à análise de métodos voltamétricos para a detecção de hormônios, o estudo de Gomes et al. (2019) apresenta o desenvolvimento de um sensor eletroquímico baseado em eletrodo de carbono vítreo modificado com um filme de cobalto-polimetionina para a determinação do hormônio estriol (E3) em amostras farmacêuticas e urinárias. A técnica empregada foi a voltametria de pulso diferencial (DPV) e as propriedades eletroquímicas do Co-poli(Met)/GCE foram analisadas por voltametria cíclica (CV), que proporcionou uma resposta analítica sensível e seletiva para o E3.

Os resultados indicaram que o sensor apresentou um limite de detecção de 0,15 $\mu\text{mol/L}$ e um limite de quantificação de 0,50 mmol/L para o estriol. A linearidade foi observada na faixa de concentração de 0,5 a 5,0 mmol/L , com coeficiente de correlação (R^2) superior a 0,99, demonstrando a precisão do método. A eficiência do sensor foi evidenciada pela sua aplicação em amostras reais, onde recuperações entre 96,7% e 103% foram obtidas

de comprimidos farmacêuticos e urina humana, indicando alta exatidão. Além disso, o sensor apresentou boa reprodutibilidade, com desvio padrão relativo inferior a 2,5%, e estabilidade ao longo de múltiplas análises. A modificação do eletrodo com cobalto-polimetionina contribuiu significativamente para o aumento da sensibilidade e seletividade na detecção do estriol, tornando o método promissor para aplicações em análises farmacêuticas e monitoramento de hormônios em fluidos biológicos.

Um outro estudo dentro da temática é o de Coelho et al., (2019) onde os autores apresenta o desenvolvimento de um sensor eletroquímico baseado em eletrodo de carbono vítreo (ECV) modificado com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) e ftalocianinas metálicas para a determinação do hormônio 17α -etinilestradiol (EE2) em amostras de formulações farmacêuticas, água de rio e leite. A técnica empregada foi a voltametria cíclica, que proporcionou uma resposta analítica sensível e seletiva para o EE2. Os resultados indicaram que o sensor apresentou, sob condições previamente otimizadas para o método proposto, uma linearidade na faixa de 2,50–90,0 μmol ($R = 0,990$), com limite de detecção de 2,20 μmol e quantificação de 2,50 μmol , demonstrando a precisão do método. A eficiência do sensor foi evidenciada pela sua aplicação em amostras reais, onde recuperações foram de 103,2% em formulação farmacêutica, 92,75% a 96,47% nas amostras de água de rio e na amostra de leite foi de 88,00% a 96,20%, indicando alta exatidão.

Além disso, o sensor apresentou boa reprodutibilidade, com desvio padrão relativo inferior a 3%, e estabilidade ao longo de múltiplas análises. Além disso, a modificação do eletrodo com MWCNTs e ftalocianinas metálicas contribuiu significativamente para o aumento da sensibilidade e seletividade na detecção do 17α -etinilestradiol, tornando o método promissor para aplicações, também, em monitoramento de hormônios em diferentes matrizes (Coelho et al., 2019).

Ademais, Spychalska et al., (2020) em seu estudo apresenta o desenvolvimento de um biossensor eletroquímico miniaturizado para a detecção do hormônio 17β -estradiol (E2). A técnica empregada foi a voltametria de onda quadrada (SWV), utilizando um eletrodo de platina revestida com um polímero condutor de poli((4,7-bis(5-(3,4 etilenodioxitiofeno)tiofen-2-il)benzotiadiazol), e a enzima peroxidase de rabanete (HRP). A estratégia de detecção baseia-se na reação enzimática onde o E2 e o pirocatecol atuam como co-substratos para a HRP, resultando na oxidação do pirocatecol a o-benzoquinona, cuja redução eletroquímica é monitorada.

Os resultados indicaram que o biossensor apresentou uma faixa linear de detecção para o E2 entre 0,1 e 200 nmol/L , com um limite de detecção de 105 nmol/L . Pode-se

perceber que o senso apresentou alta eficiência e alta seletividade, mesmo na presença de interferentes comuns como ácido ascórbico, estriol, estrona, ácido úrico e colesterol. Além disso, o sensor demonstrou também, boa reprodutibilidade e estabilidade (Spychalska et al, .2020).

Outro estudo relevante que se destaca é o trabalho de Barreto et al. (2022), que vai além da simples aplicação de um sensor. O estudo desenvolve e aplica um sensor eletroquímico inovador baseado em óxido de grafeno reduzido (rGO) e nanopartículas de cobre (CuNPs) para monitorar níveis residuais de estriol (E3) em amostras de água tratada por processos de biorremediação. Diferentemente de abordagens anteriores, os autores propõem não apenas detectar, mas também avaliar a eficiência da biorremediação utilizando o sensor como ferramenta de monitoramento pós-tratamento. A técnica empregada foi a de modificação de um eletrodo de carbono vítreo com rGO e CuNPs, que apresentou excelente atividade catalítica para a oxidação do E3. Os autores relataram um limite de detecção de 0,17 $\mu\text{mol/L}$ e quantificação de 0,56 $\mu\text{mol/l}$, valor significativamente inferior ao observado em estudos anteriores com sensores similares. A faixa linear ficou entre 0,5 a 3 $\mu\text{mol/L}$. Quanto à eficiência, o sensor demonstrou alta seletividade mesmo na presença de interferentes como outras moléculas fenólicas. Os testes com amostras de água real, previamente tratadas por biorremediação com fungos do gênero *Pleurotus*, revelaram que o sensor foi capaz de quantificar a remoção de E3 com precisão, indicando taxas de degradação de até 85%, o que comprova a aplicabilidade do sistema no acompanhamento de processos ambientais.

Dando continuidade à análise de métodos eletroquímicos para detecção de hormônios em matrizes ambientais, o estudo de Silva et al. (2022) apresenta uma abordagem nova para a quantificação de 17 β -estradiol (E2) em amostras de água. Os autores desenvolveram um eletrodo modificado com polímero molecularmente impresso magnético (MagMIP), visando aprimorar a seletividade e sensibilidade na detecção desse estrogênio, frequentemente encontrado em efluentes e matrizes aquáticas. A eficiência da técnica é evidenciada pela capacidade do sensor em detectar E2 em amostras de água do rio. Foi notório um aumento em 317% no desempenho do sensor devido a combinação do MagMIP com a DPAdSV proporcionando uma visão analítica confiável quanto ao monitoramento da presença de E2 no ambiente aquático além de resultar em uma faixa de resposta linear de 0,5 a 14,0 μM , e o limite de detecção (LOD) e o limite de quantificação (LOQ) iguais a 0,13 e 0,44 μM , respectivamente.

Em comparação com métodos convencionais, como cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas, a abordagem eletroquímica propõe vantagens valiosas, incluindo menor custo e simplicidade operacional (Silva et al., 2022).

O estudo de Galvão et al. (2023) propõe um sensor eletroquímico modificado para a detecção do hormônio 17 β -estradiol (E2) em amostras ambientais. A técnica empregada foi a voltametria de onda quadrada (SWV) juntamente com eletrodo modificado de carbono vítreo modificado com um nanocompósito de nanopartículas de α -Fe₂O₃ suportadas em nanotubos de carbono (CNTs). A síntese do nanocompósito foi realizada por um processo hidrotermal simples e econômico. A modificação do eletrodo com α -Fe₂O₃-CNT resultou em uma resposta eletroquímica aprimorada para o E2, prevenindo a contaminação da superfície do eletrodo e mitigando a diminuição da intensidade da corrente de pico durante a oxidação do mesmo. Após a otimização das condições experimentais, Foi obtida uma faixa de concentração linear de 5,0–100,0 nmol L⁻¹ e um limite de detecção (LOD) baixo de 4,4 nmol L⁻¹. O método eletroanalítico foi utilizado para determinação de E2 em amostras farmacêuticas, água de lagoa e urina sintética.

Diferentemente de abordagens anteriores que exploram sensores modificados com metais ou óxidos, o estudo conduzido por Musa et al. (2023) difere ao comparar três tipos de eletrodos baseados em grafeno para a detecção amperométrica de 17 β -estradiol. O estudo inclui eletrodos serigrafados de grafeno (GHSPE), grafeno esfoliado eletroquimicamente (EEFGHSPE) e espuma de grafeno tridimensional (3D-GFSPE), com o objetivo de explorar as propriedades intrínsecas do grafeno como material sensor sem o uso de enzimas ou modificadores metálicos.

A técnica utilizada para avaliar as características estruturas e propriedades eletroquímicas através do voltametria cíclica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), operando em potencial fixo de +0,65 V vs Ag/AgCl, e os sensores foram avaliados em uma faixa de concentração entre 0,83 a 4,98 μ M de estradiol. Entre os três tipos testados, o eletrodo EEFGHSPE foi o mais sensível, apresentando sensibilidade de 0,429 μ A μ M⁻¹ cm⁻² e um limite de detecção (LOD) de 0,018 μ M, seguido do GHSPE (LOD: 0,0041 μ M) e do 3D-GFSPE (LOD: 0,097 μ M). Esses valores demonstram que, apesar da simplicidade da construção dos sensores, o desempenho analítico foi comparável a métodos mais sofisticados, inclusive permitindo a aplicação prática em amostras de água potável. Além disso, o estudo traz à tona a relevância em relação a estrutura do eletrodo de grafeno para maximizar a performance analítica, destacando o impacto da morfologia e da área superficial sobre a sensibilidade.

No entanto, a ausência de testes em matrizes mais complexas, como efluentes urbanos ou águas residuais industriais, limita a robustez da conclusão quanto à aplicabilidade ambiental ampla. Outro ponto sensível é a possível interferência de compostos eletroativos que não foram investigados no estudo. Mesmo com essas limitações, o trabalho avança significativamente ao demonstrar que sensores livres de enzimas e sem modificações metálicas podem alcançar níveis de detecção tão satisfatórios e compatíveis com requisitos ambientais.

O estudo de Chýlková et al. (2025) apresenta uma abordagem inovadora para a determinação simultânea de quatro estrogênios comumente encontrados em águas superficiais: estrona (E1), 17 β -estradiol (E2), estriol (E3) e 17 α -etinilestradiol (EE2). Utilizando a técnica de voltametria de pulso diferencial (DPV) com um eletrodo de diamante dopado com boro (BDD), o método demonstrou alta precisão, com desvios inferiores a 4%, e uma faixa dinâmica linear de 15,35 a 134,55 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. A integração de uma etapa de evaporação a vácuo permitiu reduzir os limites de detecção para 10^{-8} $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, viabilizando a análise eficaz de amostras reais de água.

O uso do eletrodo BDD é particularmente relevante devido às suas propriedades eletroquímicas superiores, como ampla janela de potencial, baixa corrente de fundo e resistência à incrustação, características que o tornam adequado para análises em matrizes complexas como a água. Em comparação com métodos anteriores, como o de Musa et al. (2023), que utilizou eletrodos baseados em grafeno para a detecção de estradiol, o estudo de Chýlková et al. destaca-se pela capacidade de detectar múltiplos estrogênios simultaneamente, oferecendo uma solução mais abrangente para o monitoramento ambiental.

Contudo, é importante notar que o método requer uma etapa adicional de preparação da amostra (evaporação a vácuo), o que pode limitar sua aplicabilidade em análises de rotina. Além disso, embora o estudo tenha demonstrado eficácia em amostras de água potável, é fulcral avaliar o desempenho do método em outras matrizes ambientais, como águas residuais e efluentes industriais, para confirmar sua robustez e aplicabilidade ampla.

Os estudos apresentados evidenciam avanços significativos na aplicação de métodos eletroquímicos, especialmente voltamétricos, para a detecção de hormônios estrogênicos em diferentes matrizes ambientais, biológicas e farmacêuticas. De modo geral, percebe-se uma tendência significativa na busca por sensores eletroquímicos cada vez mais sensíveis, seletivos, reprodutíveis e economicamente viáveis, capazes de operar com mínima ou nenhuma preparação da amostra. A utilização de modificações nos eletrodos, como o emprego de nanotubos de carbono, ftalocianinas, polímeros condutores, nanopartículas

metálicas e estruturas baseadas em grafeno, tem sido fundamental para aprimorar a resposta analítica, possibilitando limites de detecção em concentrações baixas, compatíveis com as concentrações de hormônios encontradas em ambientes aquáticos contaminados. Além disso, observa-se a preocupação crescente em validar os sensores por meio de amostras reais, o que fortalece a aplicabilidade prática desses dispositivos no monitoramento ambiental e em análises farmacêuticas.

Embora alguns métodos apresentam limitações, tais como a necessidade de etapas adicionais de preparo, interferência de compostos eletroativos não testados ou restrição a tipos específicos de matriz, os resultados demonstram que os sensores eletroquímicos representam alternativas promissoras, sustentáveis e eficazes para a vigilância de contaminantes hormonais, contribuindo para a proteção da saúde pública e dos ecossistemas aquáticos.

5.2 Impactos dos hormônios a saúde humana e ambiental

Nas últimas décadas, a presença de contaminantes emergentes em ambientes aquáticos tem despertado crescente atenção por parte da comunidade científica, especialmente os hormônios naturais e sintéticos com atividade estrogênica. Dentre os mais relevantes destacam-se a estrona (E1), o 17β -estradiol (E2), o estriol (E3) e o 17α -etinilestradiol (EE2). Esses compostos, mesmo em concentrações muito baixas (nanogramas por litro), apresentam potencial significativo de interferência endócrina, afetando organismos aquáticos e, por extensão, podendo representar riscos à saúde humana (Monteiro et al, 2020).

Para evidenciar isso os trabalhos foram nomeados de A10 à A13 a fim de melhor organizar a análise de dados. segue abaixo a tabela dos trabalhos selecionados.

Tabela 2 - Identificação da amostra dos estudos segundo Estudo, ano, autor(es), título e

Estudo	Ano	Autor(es)	Título
A10	2020	Torres et al	Aspectos ambientais dos hormônios estriol, 17 β -estradiol e 17 α -etinilestradiol: processos eletroquímicos como tecnologias de próxima geração para sua remoção em matrizes aquosas
A11	2020	Silva e Silva	Estrógenos sintéticos, sua presença em ecossistemas aquáticos e efeitos na biota
A12	2023	Herrmann et al	Efeitos na Saúde Humana Causados Pela Exposição a 17 Beta-Estradiol e 17 Alfa-Etinilestradiol

Fonte: Autoria própria, 2025

Os hormônios esteroides estriol (E3), 17 β -estradiol (E2) e 17 α -etinilestradiol (EE2) constituem um grupo significativo de contaminantes emergentes classificados como desreguladores endócrinos (edcs), cuja presença no ambiente tem sido amplamente relatada em virtude de seu uso crescente em terapias hormonais e anticoncepcionais. O estudo proposto por Torres et al. (2020) evidencia que tais compostos têm sido detectados em diversas matrizes ambientais, incluindo águas superficiais, subterrâneas, solos e sedimentos, em concentrações que variam entre nanogramas por litro (ng l⁻¹) a microgramas por litro (μ g l⁻¹), níveis suficientes para desencadear efeitos adversos em organismos aquáticos e, potencialmente, em humanos.

Esses hormônios, devido à sua elevada atividade biológica mesmo em baixíssimas concentrações, provocam impactos substanciais sobre o equilíbrio fisiológico dos organismos, principalmente por mimetizarem ou interferirem nos hormônios naturais. Entre os efeitos ecotoxicológicos mais preocupantes destacam-se a feminilização de peixes machos, redução da fertilidade, alterações no comportamento sexual e desenvolvimento anômalo de órgãos reprodutivos. Em ambientes aquáticos, esses distúrbios podem comprometer seriamente a dinâmica populacional e o equilíbrio ecológico. No que se refere à saúde humana, embora a exposição direta seja menos estudada, há evidências crescentes de que a ingestão crônica de traços hormonais presentes na água potável pode contribuir para alterações endócrinas, distúrbios reprodutivos, puberdade precoce, e até mesmo aumentar o risco de desenvolvimento de certos tipos de câncer hormônio-dependentes, como os de mama e próstata.

Essa situação é agravada pelo fato de que os sistemas convencionais de tratamento de esgoto não foram projetados para remover completamente esses micropoluentes, resultando em sua liberação contínua nos corpos d'água. A persistência desses compostos no ambiente, aliada à sua elevada potência biológica, reforça a urgência de se adotar tecnologias mais eficazes de remediação.

O estudo conduzido por Silva; Silva (2021) oferece uma importante revisão sistemática e narrativa da literatura internacional sobre a presença e os impactos de estrógenos sintéticos no ambiente aquático, destacando compostos dentre eles o 17 α -etinilestradiol (EE2). Hormônio, amplamente utilizado em formulações farmacêuticas, como anticoncepcionais e terapias hormonais, o mesmo tem se mostrado persistente em ecossistemas aquáticos, sendo identificados como disruptores endócrinos potentes mesmo em concentrações traço. Os dados levantados evidenciam que esses compostos são continuamente lançados no ambiente, principalmente por meio de efluentes domésticos e hospitalares, já que

os sistemas convencionais de tratamento de esgoto ainda são ineficazes na remoção completa desses micropoluentes. Um aspecto preocupante destacado no estudo é que os corpos d'água brasileiros apresentaram algumas das maiores concentrações detectadas mundialmente, o que evidencia falhas severas na gestão ambiental e na infraestrutura de saneamento básico. Os impactos ecotoxicológicos observados são similares, mas ainda mais evidentes do que os relatados para hormônios naturais, seriam: feminilização de organismos aquáticos, alterações comportamentais e reprodutivas, infertilidade, anomalias no desenvolvimento gonadal e comprometimento de populações inteiras de peixes e anfíbios.

Agora, na perspectiva da saúde humana, a exposição crônica a baixos níveis desses hormônios sintéticos na água potável ou em alimentos irrigados com água contaminada pode representar um risco significativo. Embora os dados epidemiológicos ainda sejam escassos, há fortes indícios de que esses compostos estejam associados ao aumento de casos de puberdade precoce, infertilidade e cânceres, além de possíveis efeitos sobre o desenvolvimento fetal.

O proposto por Herrmann et al. (2023) evidencia de forma clara, o potencial danoso de hormônios esteroides como o 17β -estradiol (E2) e o 17α -etinilestradiol (EE2), ambos amplamente reconhecidos como desreguladores endócrinos, tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana. A principal fonte de contaminação apontada pelos autores é a excreção constante desses compostos pelo organismo humano, tendo também uma associação à ineficiência dos sistemas convencionais de tratamento de água, o que favorece sua permanência em corpos hídricos e, conseqüentemente, sua recirculação na cadeia de abastecimento e no ambiente.

Ao considerar uma visão mais ambiental, nota-se que o impacto é preocupante, uma vez presentes nos corpos d'água, esses hormônios não apenas persistem devido à sua baixa biodegradabilidade, como também exercem atividade biológica intensa mesmo em concentrações extremamente reduzidas (ng L^{-1}). Isso contribui diretamente para alterações fisiológicas e comportamentais em organismos aquáticos, como peixes e anfíbios. Os autores assim como os supracitados apontam os mesmos problemas como feminilização de machos, infertilidade, interrupção dos ciclos reprodutivos e desenvolvimento anômalo de gônadas, afetando a sobrevivência e reprodução das espécies e comprometendo o equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos. Na perspectiva humana, o trabalho destaca que a exposição crônica a E2 e EE2, mesmo em níveis traço na água consumida, pode resultar em uma ampla gama de distúrbios hormonais. Foram relatadas alterações significativas no sistema endócrino, reprodutivo e neurológico, incluindo queda na contagem de espermatozoides, irregularidades menstruais, infertilidade, além de distúrbios comportamentais e cognitivos. Além disso, os

autores alertam para a correlação entre a presença desses hormônios e o aumento na incidência de doenças como endometriose, síndrome dos ovários policísticos, disfunções da tireoide, e diversos tipos de câncer como os de mama, próstata e testículos.

Diante dos estudos analisados, é notório que os hormônios esteroides naturais e sintéticos, representam uma ameaça emergente ao equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e à saúde humana, mesmo em pequenas concentrações. Sua persistência no ambiente atrelada a ineficiência dos tratamentos convencionais de água (ETA) e esgoto (ETE), e sua elevada atividade biológica os tornam potentes desreguladores endócrinos capazes de desencadear efeitos reprodutivos, comportamentais e até carcinogênicos em organismos expostos. A presença significativa desses compostos em corpos hídricos, especialmente em países como o Brasil, revela a urgência de aprimorar estratégias de monitoramento ambiental, investir em tecnologias de tratamento mais eficazes, como os processos eletroquímicos, e estabelecer políticas públicas que incorporem o conhecimento científico disponível.

Com base nos estudos analisados, torna-se evidente a gravidade da presença de hormônios esteroides, tanto naturais quanto sintéticos, nos ecossistemas aquáticos, revelando uma problemática ambiental e de saúde pública que demanda atenção urgente. Os resultados apontam para a alta persistência desses compostos no ambiente, mesmo após o tratamento convencional de esgoto, demonstrando a ineficácia das estações de tratamento (ETEs e ETAs) em removê-los por completo.

Essa permanência, aliada à elevada atividade biológica dos hormônios mesmo em concentrações traço (ng L^{-1}), tem provocado alterações fisiológicas, reprodutivas e comportamentais significativas em organismos aquáticos, como feminilização de machos, infertilidade, anomalias no desenvolvimento gonadal e comprometimento populacional de espécies. Além do impacto ambiental, os estudos sugerem riscos substanciais à saúde humana, especialmente decorrentes da exposição crônica à água potável contaminada, com possíveis consequências como puberdade precoce, infertilidade, disfunções hormonais e aumento na incidência de cânceres hormônio-dependentes.

A convergência dos dados reforça a necessidade de avançar na implementação de tecnologias mais eficazes de remediação, como os processos eletroquímicos, além da criação de políticas públicas e estratégias de monitoramento contínuo, especialmente em países como o Brasil, onde foram identificadas algumas das maiores concentrações desses compostos no mundo. Esses achados não apenas evidenciam um problema atual, mas também projetam um cenário futuro preocupante caso ações integradas de mitigação e prevenção não sejam adotadas com celeridade.

5.3 Legislações e regulamentações existentes a respeito de contaminantes emergentes

A presença de contaminantes farmacêuticos emergentes, como hormônios naturais e sintéticos, em corpos hídricos e sistemas de abastecimento tem gerado preocupações globais devido ao seu potencial de desregulação endócrina, mesmo em concentrações de traço. Embora evidências científicas apontem riscos à saúde humana e ao meio ambiente, a regulamentação desses compostos ainda é limitada e heterogênea entre os países. A União Europeia, por exemplo, já inclui substâncias como o 17 α -etinilestradiol (EE2) em listas de observação para possível regulação (EU, 2020). No Brasil, entretanto, a Portaria GM/MS nº 888/2021 e a Resolução CONAMA nº 357/2005 ainda não estabelecem limites para hormônios na água potável, evidenciando a necessidade de atualização normativa.

Esse cenário é agravado pelo aumento do consumo de medicamentos, impulsionado pelo crescimento populacional, hábitos de automedicação e a pandemia de COVID-19. Como resultado, resíduos farmacêuticos frequentemente alcançam corpos d'água mesmo após o tratamento convencional de esgoto, sobretudo em regiões com infraestrutura precária de saneamento. Apesar de iniciativas em países como Estados Unidos, Canadá, Nova Zelândia e membros da União Europeia, o Brasil ainda carece de parâmetros específicos para hormônios em seus marcos regulatórios. Diante disso, torna-se urgente o fortalecimento de políticas públicas, o investimento em tecnologias de tratamento avançado e a inclusão de critérios normativos voltados ao monitoramento e controle desses contaminantes. A recorrente detecção de hormônios em matrizes aquáticas, inclusive em áreas remotas como a Antártida (Medeiros et al., 2022), reforça a necessidade de ações preventivas e da incorporação de evidências científicas na gestão da qualidade da água.

Diante do exposto, torna-se evidente que a ausência de regulamentações específicas para contaminantes farmacêuticos emergentes, como os hormônios, no Brasil representa um obstáculo significativo para a proteção dos recursos hídricos e da saúde pública. Embora o país já disponha de legislações consolidadas voltadas à qualidade da água, como a Portaria GM/MS nº 888/2021 e a Resolução CONAMA nº 357/2005, essas normas ainda não incorporam parâmetros que reflitam os avanços científicos e a complexidade da poluição química por fármacos. A precariedade do saneamento básico e a insuficiência de tecnologias de tratamento de efluentes, torna urgente que os órgãos reguladores nacionais avancem na construção de um marco normativo amplo e atualizado. A inclusão de hormônios e outros fármacos em listas de monitoramento prioritário, como já ocorre em diversos países, é um

passo essencial para garantir o controle efetivo desses poluentes e assegurar a qualidade da água potável não só no presente como também no futuro.

6 CONCLUSÃO

Diante do exposto neste trabalho, observou-se que resíduos de hormônios foram identificados em diversas matrizes hídricas, tais como lagos, águas residuais, águas subterrâneas e, inclusive, em água potável. Esses contaminantes emergentes, ainda que presentes em concentrações de traço, representam sérios riscos ao meio ambiente e à saúde humana, sobretudo em virtude de sua capacidade de atuar como desreguladores endócrinos.

Além disso, os estudos analisados evidenciaram que a exposição prolongada a esses compostos está associada a uma variedade de efeitos adversos, que vão desde alterações fisiológicas em organismos aquáticos até o desenvolvimento de distúrbios hormonais em humanos. Tais impactos reforçam a relevância do monitoramento contínuo desses contaminantes em ambientes aquáticos.

No tocante às estratégias de detecção e quantificação desses poluentes, destacaram-se, ao longo deste trabalho, as técnicas eletroquímicas, com ênfase nos sistemas que utilizam eletrodos modificados. Esses dispositivos demonstraram ser ferramentas promissoras em razão de sua elevada sensibilidade, seletividade e baixo custo operacional, especialmente quando associados a métodos como a voltametria cíclica e as técnicas de pulso diferencial.

No entanto, também foi possível constatar lacunas significativas na legislação brasileira, que ainda carece de diretrizes específicas e rigorosas quanto à presença de hormônios em corpos hídricos. Essa deficiência compromete a efetividade das ações de monitoramento e controle, tornando urgente a atualização das normativas vigentes e o fortalecimento das políticas públicas voltadas à segurança hídrica.

Dessa forma, este estudo reforça a necessidade de ações integradas entre a pesquisa científica, o desenvolvimento tecnológico e a regulamentação legal, de modo a enfrentar os desafios impostos pelos contaminantes emergentes de origem farmacêutica e garantir a proteção ambiental e a saúde das populações expostas. Para tanto, recomenda-se a formulação de políticas públicas específicas para o controle de hormônios em águas residuais e potáveis, bem como a ampliação de programas de incentivo à pesquisa científica voltada ao desenvolvimento de sensores eletroquímicos de baixo custo e alta eficiência.

Sugere-se, ainda, a promoção de campanhas de educação ambiental que conscientizem a população sobre o descarte correto de medicamentos e o impacto dos fármacos nos ecossistemas aquáticos. Em termos de perspectivas futuras, é fundamental que as pesquisas

avancem no aprimoramento de materiais nanoestruturados para sensores, na avaliação dos efeitos sinérgicos entre diferentes contaminantes emergentes e na implementação de metodologias analíticas portáteis, que viabilizem o monitoramento em campo de forma rápida e acessível.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2020.

ANVISA (2018). Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 274, de 22 de setembro de 2018. Dispõe sobre o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

Azeredo, Nathália Florência Barros. **Desenvolvimento de (bio)sensores (nano)estruturados visando a determinação de analitos em amostras farmacêuticas e fluidos biológicos**. 2021. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, University of São Paulo, São Paulo, 2021. doi:10.11606/T.46.2021.tde-11112021-144538. Acesso em: 27 janeiro 2025.

Barreto, F. C.; Silva, M. K. L.; Cesarino, I. **Um sensor eletroquímico baseado em óxido de grafeno reduzido e nanopartículas de cobre para monitorar os níveis de estriol em amostras de água após biorremediação**. *Chemosensors*, Basel, v. 10, n. 10, p. 395, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors10100395>. Acesso em: 27 maio 2025.

Bila, D.; Dezotti, M. (2003) **Fármacos no meio ambiente**. *Química Nova*, v. 26, n. 4, p. 523-530. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015>. Acesso em: 2 janeiro 2025

Birch, G.F.; Drage, D.S.; Thompson, K.; Eaglesham, G.; Mueller, J.F. (2015) **Emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, a food additive and pesticides) in waters of Sydney estuary, Australia**. *Marine Pollution Bulletin*, v. 97, n. 1-2, p. 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.038>. Acesso em: 4 janeiro 2025

Bounegru, A. V. et al. **Electrochemical sensors and biosensors for the detection of pharmaceutical contaminants in natural waters—A comprehensive review**. *Chemosensors*, Basel, v. 13, n. 2, p. 65, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors13020065>. Acesso em: 15 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacaocorposaguas.pdf. Acesso em: 7 janeiro. 2025.

Cais, Thayná Aparecida. **Determinação de hormônios estrogênicos em águas superficiais do Lago de Furnas no município de Alfenas-MG**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, jul. 2016. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/578/1/dissertacao_cais_2016.pdf. Acesso em: 2 janeiro. 2025.

Carneiro, Liliane Almeida; Pettan-brewer, Christina. **One Health: conceito, história e questões relacionadas** – revisão e reflexão. In: Miranda, Ana Maria Mendonça (Org.). *Pesquisa em Saúde & Ambiente na Amazônia: perspectivas para sustentabilidade humana e ambiental na região*. Guarujá: Científica Digital, 2021. p. 219–240. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/210504857.pdf>. Acesso em: 7 Janeiro. 2025.

Chýlková, J.; Bartáček, J.; Měchová, N.; Sedlák, M.; Váňa, J. **Voltammetric Determination of the Total Content of the Most Commonly Occurring Estrogens in Water Media**. *Molecules*, v. 30, n. 3, p. 751, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30030751>. Acesso em: 2 fevereiro 2025.

Coelho, M. K. L.; Silva, D. N.; Pereira, A. C. **Development of Electrochemical Sensor Based on Carbonaceal and Metal Phthalocyanines Materials for Determination of Ethinyl Estradiol**. *Chemosensors*, Basel, v. 7, n. 3, p. 32, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors7030032>. Acesso em: 2 fevereiro de 2025.

Conceição, G. W. N.; Silva, R. A.; Freret, R. A. C.; Lobo, A. J.s. **Reflexão sobre o conceito “One Health” e compreensão do seu papel perante à saúde preventiva: revisão integrativa**. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 3, p. e9312340514, 2023. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/40514>. Acesso em: 7 janeiro. 2025

Elgrishi, N. et al. A Practical Beginner's Guide to **Cyclic Voltammetry**. *Journal of Chemical Education*, v. 95, n. 2, p. 197-206, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>. Acesso em: 19 fev 2025.

EU. European Commission. *Watch List under the Water Framework Directive*. 2020.

Flores, D.; Vargas, R.; Scharifker, B. R.; Ruiz, L. M. M. **Electroanalytical determination of chemical oxygen demand on PbO₂ – Bi electrode** (Determinación electroanalítica de la demanda química de oxígeno sobre electrodos de PbO₂ - Bi). *Afinidad - Barcelona*, v. 78, n. 594, 1 abr. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349989379_Electroanalytical_determination_of_chemical_oxygen_demand_on_PbO2_-_Bi_electrode_Determinacion_electroanalitica_de_la_demanda_quimica_de_oxigeno_sobre_electrodos_de_PbO2_-_Bi. Acesso em: 7 janero. 2025.

Fuentes, N.; Silveyra, P. Estrogen receptor signaling mechanisms. **Advances in Protein Chemistry and structural Biology**, v. 116, p. 135-170, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.apcsb.2019.01.00>. Acesso em: 19 fev 2025

Guardian, M. G. E.; Aga, D. S. Mineralization and biotransformation of estrone in simulated poultry litter and cow manure runoff water. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 4, p. 1120-1125, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0023>. Acesso em: 19 janeiro 2025

Garza, A. Z.; Park, S. B.; Kocz, R. **Drug Elimination**. *StatPearls Publishing*, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547662/>. Acesso em: 2 maio 2025.

Galvão, J. C. R; Araujo, M. S; Prete, M. C; Neto, V. L.; Dall’antonia, L. H.; Matos, R; Tarley, C. R. T.; Medeiros, R. A. **Electrochemical determination of 17-β-estradiol using a glassy**

carbon electrode modified with α -Fe₂O₃ nanoparticles supported on carbon nanotubes.

Molecules, Basel, v. 28, n. 17, p. 6372, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/molecules28176372>. Acesso em: 15 maio 2025

Gomes, E. S.; Leite, F. O.; Ferraz, B., B. R. L.; Mourão, H. A. J. L.; Malagutti, A. R.

Voltammetric sensor based on cobalt-poly(methionine)-modified glassy carbon electrode for determination of estriol hormone in pharmaceuticals and urine. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, Xi'an, v. 9, n. 5, p. 347–357, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.04.001>. Acesso em: 2 maio 2025.

Gonsioroski, A.; Mourikes, V. E.; Flaws, J. A. **Endocrine disruptors in water and their effects on the reproductive system.** *International Journal of Molecular Sciences*, [S.l.], v. 21, n. 6, p. 1929, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms21061929>. Acesso em: 7

fevereiro. 2025.

Guellard, T., Kalamarz, K, H.; Arciszewski, B. **Efeito da exposição intermitente de curto prazo ao estradiol aquático na fisiologia reprodutiva do gobião-redondo (*Neogobius melanostomus*).** *Environ Sci Pollut Res* 27 , 36799–36815 (2020). Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09702-3>. Acesso em: 2 maio 2025

Hernández, M. P. G.; Cabas, I.; Rodenas, M.C.; Arizcun, M.; Chaves-pozo, E.; Power, D. M.; Ayala, A. G. **17 α -ethinylestradiol prevents the natural male-to-female sex change in gilthead seabream (*sparus aurata* L.).** *Scientific Reports*, v. 10, 10067, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-76902-9>. Acesso em: 2 fevereiro 2025

Hernandez, V., G.; Sosa, H. J. E.; Saldarriaga, H. S.; Villalba, R., A. M.; Parra, S. R.; Iqbal, H. M. N. **Electrochemical biosensors: a solution to pollution detection with reference to environmental contaminants.** *Biosensors*, Basel, v. 8, n. 2, p. 29, 2018. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2079-6374/8/2/29>. Acesso em: 12 fev 2025.

Herrmann, A. .; Costa, A. De B. Da; Martinhuk, N. G.; Armas, . R. D. **Efeitos na Saúde Humana Causados Pela Exposição a 17 Beta-Estradiol e 17 Alfa-Etinilestradiol.** Epitaya

E-books, [S. l.], v. 1, n. 27, p. 150-162, 2023. DOI: 10.47879/ed.ep.2023670p150. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/634>. Acesso em: 8 maio.

2025.

Jackson, L.; Klerks, P. Effects of the synthetic estrogen 17 α -ethinylestradiol on *Heterandria formosa* population: Does matrotrophy circumvent population collapse? *Aquatic Toxicology*, v. 229, 105659, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105659>. Acesso em: 25 maio.

2025.

Kasonga, T. k.; Coetzee, M. a. a.; Kamika, I.; Ngole-jeme, V. m.; Momba, M. N. B.

Endocrine-disruptive chemicals as contaminants of emerging concern in wastewater and surface water: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 277, p. 111485, 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111485>. Acesso em: 25 maio. 2025.

Klaic, M.; Jirsa, F. **17 α -ethinylestradiol (EE2): Concentrations in the environment and**

methods for wastewater treatment – an update. *RSC Advances*, v. 12, 12794, 2022. Disponível em: <https://www.doi.org/10.1039/d2ra00915c>. Acesso em: 25 janeiro 2025.

Kong F, Luo J, Jing L, Wang Y, Shen H, Yu R, Sun S, Xing Y, Ming T, Liu M, Jin H, Cai X. **Reduced Graphene Oxide and Gold Nanoparticles-Modified Electrochemical Aptasensor for Highly Sensitive Detection of Doxorubicin.** *Nanomaterials (Basel)*. 2023 Mar 30;13(7):1223. Disponível em: doi: 10.3390/nano13071223. PMID: 37049316; PMCID: PMC10096947. Acesso em: 15 janeiro 2025

Le, J. Drug Absorption. *MSD Manual Professional Edition, 2024*. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/professional/clinical-pharmacology/pharmacokinetics/drug-absorption>. Acesso em: 3 maio 2025

Lima, J. Adriano V.; Stachiw, R.; Militão, J. S. L. T. **A problemática ambiental dos poluentes emergentes: possíveis impactos por hormônios sexuais.** *Nature and Conservation, [S. l.]*, v. 12, n. 1, p. 66–74, 2019. DOI: 10.6008/CBPC2318-2881.2019.001.0007. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/nature/article/view/CBPC2318-2881.2019.001.0007>. Acesso em: 3 maio. 2025.

Lima, M. R.; Ferreira, G. L.; Kussmaul, G. M. E.; Vieira, T. D.; Brito, R. L.; Barroso, B. L.; Sanz, L. G.; Augusto, R. O. G.; Ferreira, R. M.; Gontijo, V. B.; Gil, E. S. **Remediação eletroquímica de águas residuais farmacêuticas industriais contendo hormônios em um sistema de tratamento em escala piloto.** *Eclética Química, [S. l.]*, v. 1, pág. 40–52, 2019. DOI: 10.26850/1678-4618eqj.v44.1.2019.p40-52. Disponível em: <https://revista.iq.unesp.br/index.php/eclética/article/view/959>. Acesso em: 1 fev. 2025.

Liu, T.; Zhang, L.; Cheng, B.; Yu, J. **Hollow carbon spheres and their hybrid nanomaterials in electrochemical energy storage.** *Advanced Energy Materials, Weinheim*, v. 9, n. 17, p. 1-55, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aenm.20183900>. Acesso em: 15 maio 2025.

Malode, S. J.; Alshehri, M. A.; Shetti, N. P. **Nanomaterial-based electrochemical sensors for the detection of pharmaceutical drugs.** *Chemosensors, Basel*, v. 12, n. 11, p. 234, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors12110234>. Acesso em: 15 maio 2025.

Mendes, L. B. P.; Silva, A. L.; Monteiro, E. S.; Pontual, L. V. **Determinação eletroquímica de metronidazol por voltametria cíclica.** In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 2., 2017, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: Realize Editora, 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/28392>. Acesso em: 19 fev. 2025.

Montagner, C. C.; Vidal, C.; Acayaba, R.L D. **Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios.** *Química Nova, Campinas*, v. 40, n. 9, p. 1094–1110, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422017000901094. Acesso em: 7 março. 2025.

Monteiro, N., J.; Santos, J. P. E.; Azevedo, T. S.; Resende, T. C.; Rezende, N. C.; Mounter, A. H.; Bottrel, S. E. C.; Pereira, R. O. **Remoção da atividade estrogênica por cloração. Principia: Caminhos da Iniciação Científica, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 11, 2020. DOI: 10.34019/2179-3700.2019.v19.29920. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/principia/article/view/29920>. Acesso em: 28 maio. 2025.**

Musa, A. M.; Kiely, J.; Luxton, R.; Honeychurch, K. C. **Graphene-based electrodes for monitoring of estradiol**. *Chemosensors*, Basel, v. 11, n. 6, p. 337, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11060337>. Acesso em: 27 maio 2025.

Ortúzar, M.; Esterhuizen, M.; Olicón-Hernández, D. R.; González-López, J.; Aranda, E. **Pharmaceutical pollution in aquatic environments: a concise review of environmental impacts and bioremediation systems**. *Frontiers in Microbiology*, Lausanne, v. 13, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2022.869332/full>. Acesso em: 15 maio 2025

Pacheco, W. F.; Semaan, F. S.; Almeida, V. G. K.; Ritta, A. G. S. L.; Aucélio, R. Q. **Voltametrias: uma breve revisão sobre os conceitos**. *Revista Virtual de Química*, Niterói, v. 5, n. 4, p. 516–537, 2013. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/380>. Acesso em: 10 maio 2025

Puneeth, G. R.; Mahesh, S. R.; Adithya, H.; Bhargava, S. J.; Kumari, C. H. A.; Gururaj, H. L.; Hong, L. **Analysis of Drug Classification using Mechanism of Action**. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1914, n. 1, p. 012034, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1914/1/012034/meta>. Acesso em: 19 fev 2025.

Quresh, R.; Picon-Ruiz, M.; Aurrekoetxea-Rodriguez, I.; Paiva, V. N.; D'Amico, M.; Yoon, H.; Radhakrishnan, R.; Morata-Tarifa, C.; Ince, T.; Lippmann, M. E.; Thaller, S. R.; Rodgers, S. E.; Kesmodel, S.; Vivanco, M. >. Slingerland, J. M. The mejor pre- and postmenopausal estrogens play opposing roles in obesity-driven mammary inflammation and breast cancer development. **Cell metabolism**, v. 31, n. 6, p. 1154-1172, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2020.05.008>. Acesso em: 17 fev 2025.

Rodrigues, S. V.; Silva, A. V. .; Medrado, C. L. Quintanilha, K. C. S. .; Otavio, C. N. **IMPACTOS DO USO DE AGROTÓXICOS NA SAÚDE HUMANA E AMBIENTAL**. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, [S. l.]*, v. 9, n. 1, 2024. DOI: 10.61164/rmm.v9i1.2908. Disponível em: <https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/2908>. Acesso em: 30 maio. 2025.

Santana, E. R.; Spinelli A. **Electrode modified with graphene quantum dots supported in chitosan for electrochemical methods and non-linear deconvolution of spectra for spectrometric methods: approaches for simultaneous determination of triclosan and methylparaben**. *Mikrochim Acta*. 2020 Mar 28;187(4):250. Disponível em: doi: 10.1007/s00604-020-04225-7. PMID: 32222835. Acesso em: 15 maio. 2025

Silva, J. G.; Mangas, M. B. P.; Chagas, F. W. M. **Determinação de contaminantes emergentes em amostras de água no Brasil por técnicas voltamétricas: revisão da literatura**. *Revista Virtual de Química*, v. 15, n. 1, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20220100>. Acesso em: 20 fev. 2025.

Silva, D. M. C. Da; Silva, C. D. C. da. **Estrógenos sintéticos, sua presença em ecossistemas aquáticos e efeitos na biota**. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 1, p. 84–101, 2021. Disponível em:

<https://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.001.0008>. Acesso em: 12 fev 2025

Silva, M. C. et al. **Development of a Chemically Modified Electrode with Magnetic Molecularly Imprinted Polymer (MagMIP) for 17- β -Estradiol Determination in Water Samples**. *Electrochem*, Basel, v. 3, n. 4, p. 53, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electrochem3040053>. Acesso em: 12 maio 2025.

Silva, D. N.; Pereira, A. C. **Development of a chemically modified electrode with magnetic molecularly imprinted polymer (MagMIP) for 17- β -estradiol determination in water samples**. *Electrochem*, Basel, v. 3, n. 4, p. 809–819, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electrochem3040053>. Acesso em: 15 maio 2025

SILVA, D. M. C.; SILVA, C. D. C. **Estrógenos sintéticos, sua presença em ecossistemas aquáticos e efeitos na biota**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 84–101, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0008. Disponível em: <https://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.001.0008>. Acesso em: 28 maio. 2025.

Sokwala, S. Chapter 2 - **Reproductive endocrine physiology. In: Subfertility: Recent advances for management and preventio**, p. 36-64, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-75945-8.00002-5>. Acesso em: 28 fevereiro. 2025

Spychalska, K.; Zając, D.; Cabaj, J. **Electrochemical biosensor for detection of 17 β -estradiol using semi-conducting polymer and horseradish peroxidase**. *RSC Advances*, Cambridge, v. 10, n. 15, p. 9079–9087, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C9RA09902F>. Acesso em: 2 maio 2025.

Tapper, M. A.; Kolanczyk, R. C.;Lalone, C. A.; Dennys, J. S.; Ankley, G. T. Conversion of estrone to 17 β -estradiol: a potential confounding factor in assessing risks of environmental estrogens to fish. **Environmental Toxicology**, v. 39,n. 10, p. 2028-2040, 2020.Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etc.4828>. Acesso em: 15 fevereiro. 2025

Tao, W.; Ye, M.; Liu, Y.; Lin, Z.; Wang, C.; Huang, Y.; Pan, D. **Electrochemical determination of iron(III) in river water by differential pulse voltammetry (DPV) using a poly(3,4-ethylenedioxythiophene)–polystyrene sulfonate co-polymer/gold nanoparticle modified gold microelectrode**. *Analytical Letters*, v. 57, n. 9, p. 1448–1461, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/373429160_Electrochemical_Determination_of_IronIII_in_River_Water_by_Differential_Pulse_Voltammetry_DPV_Using_a_Poly34-Ethylenedioxythiophene-Polystyrene_Sulfonate_co-PolymerGold_Nanoparticle_Modified_Gold_Microelectrode. Acesso em: 7 março. 2025.

Teixeira, R. B.; Carolina, A. M.; Natália R. C.; Luiz, E. T. G.; Flávio, T. S.; Teresa Cristina, B. P. **Determinação de hormônios estrogênicos em esgoto bruto e efluente de uma estação descentralizada de tratamento por lodos ativados**. Revista Ambiente & Água, v. 13, p. e2059, 16 abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2059>. Acesso em: 20 janeiro 2025

Torres, N. H.; Aguiar, M. M.; Ferreira, L. F. R.; Américo, J. H. P.; Machado, A. M.; Cavalcante, E. B.; Tornisielo, V. L. Detection of hormones in surface and drinking water in Brazil by LC-ESI-MS/MS and ecotoxicological assessment with *Daphnia magna*. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 187, n. 379, mai. 2015. DOI <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4626-z>. Acesso em: 20 fev 2025

Wang, Z.; Gu, Q.; Ding, Q.; Li, H.; Wu, P.; Cai, C. **Electrochemical quantification of sulfamethoxazole antibiotic in environmental water using zeolitic imidazolate framework (ZIF)-derived single-atom cobalt catalyst in nitrogen-doped carbon nanostructures.** *Sensors & Diagnostics*, v. 1, p. 1052–1062, 2022. DOI: 10.1039/D2SD00117A. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/sd/d2sd00117a>. Acesso em: 7 março. 2025.

Wang, S.; Zhang, Y.; Zhao, B.; Liu, H.; Li, H.; Wei, W. **The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations in China.** *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 21, p. 11452–11459, 2016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b02562>. Acesso em: 3 fev 2025

WHO (2017). Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization.

Yu, X. H.; Yi, J. L.; Zhang, R. L.; Wang, F. Y.; Liu, L. Hollow carbon spheres and their noble metal-free hybrids in catalysis. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, Beijing, v. 15, n. 6, p. 1380-1407, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11705-021-2097-z>. Acesso em: 15 de maio de 2022.