UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS- MESTRADO

JÉSSICA TAMYRIS DE FREITAS CAVALCANTI

DETECÇÃO SELETIVA DE DICLOFENACO (DCF) E PARACETAMOL (APAP) POR VOLTAMETRIA DIFERENCIAL DE PULSO (DPV) USANDO ELETRODO DE GRAFITE MODIFICADO COM BIOCHAR MAGNÉTICO DE SEMENTE DE AÇAÍ E FILME MOLECULARMENTE IMPRESSO DE POLIDOPAMINA

Recife, Junho de 2026

JÉSSICA TAMYRIS DE FREITAS CAVALCANTI

DETECÇÃO SELETIVA DE DICLOFENACO (DCF) E PARACETAMOL (APAP) SUPERFICIAIS POR VOLTAMETRIA DIFERENCIAL DE PULSO (DPV) USANDO ELETRODO DE GRAFITE MODIFICADO COM BIOCHAR MAGNÉTICO DE SEMENTE DE AÇAÍ E FILME MOLECULARMENTE IMPRESSO DE POLIDOPAMINA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fonseca do Nascimento

Recife, Junho de 2026

C377d Cavalcanti, Jéssica Tamyris de Freitas.
Detecção seletiva de diclofenaco (DCF) e paracetamol (APAP) por voltametria diferencial de pulso (DPV) usando eletrodo de grafite modificado com biochar magnético de semente de açaí e filme molecularmente impresso de polidopamina / Jéssica Tamyris de Freitas Cavalcanti, 2026.
59 f. : il.

Orientador: Raphael Fonseca do Nascimento.
Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2026.

1. Biotecnologia. 2. Sustentabilidade. 3. Poluentes. 4. Monitorização ambiental. 5. Detectores. 6. Recursos hídricos - Medidas de segurança. I. Título.

CDU 574.6

Luciana Vidal - CRB-4/1338

FOLHA DE APROVAÇÃO

JÉSSICA TAMYRIS DE FREITAS CAVALCANTI

DETECÇÃO SELETIVA DE DICLOFENACO (DCF) E PARACETAMOL (APAP) SUPERFICIAIS POR VOLTAMETRIA DIFERENCIAL DE PULSO (DPV) USANDO ELETRODO DE GRAFITE MODIFICADO COM BIOCHAR MAGNÉTICO DE SEMENTE DE AÇAÍ E FILME MOLECULARMENTE IMPRESSO DE POLIDOPAMINA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Desenvolvimento de Processos Ambientais – Mestrado Acadêmico da Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito parcial para a obtenção do titulo de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Data de aprovação : 12/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Mufilo Marciel Fernandes

Profa. Dra. Nathália Lopes Queiroz

Prof. Dr. Raphael Fonseca do Nascimento
Presidente da Banca Examinadora

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS iii
LISTA DE TABELAS iv
LISTA DE ABREVIAÇÕES v
RESUMO vi
ABSTRACT ix

1 INTRODUÇÃO 13
2 OBJETIVOS 15
2.1 Objetivo Geral 15
2.2 Objetivos Específicos 15
3 REVISÃO DA LITERATURA 17
3.1 A automedicação e o uso irracional de medicamentos 17
3.2 O descarte de medicamentos: um alerta de preocupação ambiental 18
3.3 Impactos da presença de compostos farmacêuticos no meio ambiente 21
3.4 A Agenda do Desenvolvimento Sustentável e os impactos do resíduos de saúde no meio ambiente 24
3.5 Técnicas eletroanaliticas 26
3.6 Curvas de calibração analíticas 28
3.7 Dispositivos eletroquímicos para o sensoriamento de compostos Farmacêuticos 30
3.8 Produção de Biochar a partir de sementes de açai 32
3.8.1 Açai 32
3.8.2 Produção do biochar 34
4 MATERIAIS E MÉTODOS 36
4.1 Aquisição e tratamento das sementes de açai 36
4.2 Processo de pirolise das sementes de açai em escala de bancada 36
4.3 Padronização de granulometria 38
4.4 Processo de magnetização em soluções de sais metálicos 39
4.5 Produção do PGE/BCFE$_3$O$_4$ 40
4.6 Adaptação do eletrodo a base de grafite 40
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 41
5.1 Parâmetros analíticos: sensibilidade, LD e LQ 43
5.2 Comparação com outros métodos de obtenção de sensores eletroquímicos 51
CONSIDERAÇÕES FINAIS 54
REFERÊNCIAS 57

DEDICÁTÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, que me ofereceram o maior presente que alguém pode receber: a educação. Foi por meio dela que construí minha trajetória, ampliei meus horizontes e me tornei uma pessoa melhor.

Aos meus tios e avós, que, mesmo diante de limitações e dificuldades financeiras, nunca mediram esforços para que eu pudesse estudar com qualidade, dignidade e esperança. O apoio de vocês foi fundamental para que este sonho se tornasse possível.

À Ana Lúcia de Melo, minha querida Tia Ana, cuja generosidade, cuidado e incentivo marcaram profundamente minha caminhada. Sua presença foi essencial em momentos decisivos da minha vida, e minha gratidão por tudo o que fez por mim será eterna.

A todos vocês, que acreditaram em mim, investiram nos meus sonhos e contribuíram para cada conquista alcançada, dedico este trabalho com amor, respeito e profundo reconhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me sustentar nos momentos de dificuldade, fortalecer minha fé e me conceder forças para permanecer firme na busca pelos meus objetivos. Sem Sua presença em minha vida, esta conquista não seria possível.

Aos meus pais, por todo amor, dedicação e pelos ensinamentos que me conduziram pelos melhores caminhos. Com sabedoria, valores e incentivo constante, vocês me proporcionaram as bases necessárias para que eu pudesse construir minha trajetória acadêmica e realizar meus sonhos.

À minha família, especialmente aos meus avós Juracy Tenório (*in memoriam*) e Maria Helena, bem como Adalberto de Freitas (*in memoriam*) e Maria de Lourdes, e aos meus tios e tias, pelo apoio, carinho, incentivo e por sempre acreditarem na importância da educação como instrumento de transformação. Cada gesto de apoio foi fundamental ao longo desta caminhada.

À Universidade Católica de Pernambuco, pela excelência acadêmica e pela grandiosa contribuição para a formação de profissionais e pesquisadores comprometidos com a sociedade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raphael Fonseca do Nascimento, pela confiança, oportunidade, orientação, paciência e pelos valiosos ensinamentos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento profissional e acadêmico.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, pela dedicação, competência e pelos conhecimentos compartilhados ao longo desta jornada.

Aos amigos que conquistei durante o mestrado, pela parceria, apoio, incentivo e pelos momentos compartilhados dentro e fora do ambiente acadêmico, tornando esta caminhada mais leve e enriquecedora.

Às laboratoristas Marcella e Mônica, cuja colaboração, disponibilidade e apoio foram fundamentais durante a etapa experimental deste projeto. Vocês foram um verdadeiro esteio nos momentos de desafios em bancada. Minha eterna gratidão por toda ajuda e generosidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a viabilização desta formação e para a concretização deste importante sonho acadêmico.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação e fizeram parte desta trajetória. Cada apoio recebido foi essencial para que este momento se tornasse realidade.

"Há um tempo certo para cada coisa; há um tempo certo para cada propósito debaixo do céu: Tempo para nascer e tempo para morrer; tempo para plantar e tempo para colher; tempo para matar e tempo para curar; tempo para destruir e tempo para construir de novo; tempo para chorar e tempo para rir; tempo para ficar triste e tempo para dançar de alegria; tempo para espalhar pedras e tempo para ajuntar pedras; tempo para abraçar e tempo para deixar de abraçar; tempo para procurar e tempo para perder; tempo para guardar e tempo para jogar fora; tempo para rasgar e tempo para costurar; tempo para calar e tempo para falar; tempo para amar e tempo para odiar; tempo para lutar e tempo para viver em paz. "

(Eclesiastes 3:1-15)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – Agenda 2030 27

Figura 2 – Curvas de calibração analíticas geradas pela Simulação de Monte Carlo (MCS)
..... 30

Figura 3 – Esquema ilustrativo sobre a sensibilidade dos sensores eletroquímicos diante da amostra a ser analisada..... 32

Figura 4 – Esquema de um dispositivo eletroquímico..... 33

Figura 5 – Árvore do Açaí, porpularmente conhecida como Acaizeiro 34

Figura 6 – Corte transversal da semente do Açaí 36

Figura 7 – Processo de limpeza e remoção dos resíduos das sementes de açaí..... 37

Figura 8 – Tâmis fabricante Bertel com abertura em 150µm e mesh de 100..... 39

Figura 9 – Voltamogramas de pulso diferencial para determinação simultânea de paracetamol (APAP) e diclofenado (DCF), usando eletrodo de grafite modificado com biochar magnético de semente de açai e filme molecularmente impresso em polidopamina. Concentrações : 0,5 ,10,25,50,75 e 100 µmol L^{-1}. 43

Figura 10 – Curvas de calibração para APAP e DCF obtidas a partir das correntes de pico dos voltamogramas de DPV 44

Figura 11 – Voltamogramas cíclicos obtidos para o processo de oxidação do paracetamol (APAP) e diclofenaco (DCF) utilizando eletrodo não modificado e eletrodo modificado em pH
7,0.....47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais impactos gerados no meio ambiente por meio do descarte de medicamentos.....25

Tabela 2– Parâmetros aplicados ao processo de pirolise das sementes de açai 37

Tabela 3 – Parâmetros analíticos para a determinação simultânea de APAP e DCF por DPV .Potenciais de picos adotados: APAP = 0,355 V; DCF = 0,690 V; faixa linear = 5-100 µmol L^{-1}..... 44

Tabela 4– Comparação entre diferentes plataformas eletroquímicas empregadas na determinação de analitos e amostras de interesse farmacêutico e ambiental 54

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABRAFARMA – Associação Brasileira de Redes de Farmácias e Drogarias

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

APAP – Paracetamol

CMC – Carboximetilcelulose

CV – Voltametria Cíclica

DCF – Diclofenaco

DPV – Voltametria Diferencial de Pulso

EMBRAPA– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EC – Eletrodo Controle

ER – Eletrodo de Referencia

ET – Eletrodo de Trabalho

FEN – Fenol

IVM – Ivermectina

LD – Limite de Detecção

LQ – Limite de Quantificação

MCS – Simulação de Monte Carlo

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

PGE – *Pencil Graphite Electrode*

POE – Poluentes Orgânicos Emergentes

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis

OMS – Organização Mundial de Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

PDA – Polidopamina

VOQ – Voltametria de Onda Quadrada

RESUMO

A presença de fármacos em ambientes aquáticos tem se tornado uma preocupação crescente em âmbito mundial devido aos potenciais impactos ambientais e à saúde pública associados à contaminação por poluentes emergentes. Entre esses compostos, destacam-se o diclofenaco (DCF) e o paracetamol (APAP), amplamente utilizados pela população e frequentemente detectados em águas superficiais em decorrência do descarte inadequado de medicamentos e da ineficiência dos sistemas convencionais de tratamento de efluentes na sua remoção. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e aplicar um sensor eletroquímico baseado em eletrodo de grafite modificado com biochar magnético obtido a partir de sementes de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e filme molecularmente impresso de polidopamina para a detecção seletiva e simultânea de DCF e APAP em amostras de águas superficiais, utilizando a técnica de voltametria diferencial de pulso (DPV). O biochar magnético foi produzido a partir da valorização de resíduos agroindustriais, contribuindo para a sustentabilidade do processo e para a economia circular. A metodologia proposta envolveu a preparação e modificação do eletrodo, a otimização dos parâmetros eletroquímicos e a avaliação do desempenho analítico do sensor por meio da construção de curvas de calibração, análise da linearidade, sensibilidade, seletividade e potencial de aplicação em amostras ambientais. Os resultados demonstraram que a combinação entre o biochar magnético e o filme molecularmente impresso favoreceu a amplificação do sinal eletroquímico e a seletividade do sistema analítico, permitindo a diferenciação dos analitos estudados. Além de apresentar potencial para aplicações em monitoramento ambiental, a tecnologia desenvolvida contribui para o aproveitamento sustentável de resíduos lignocelulósicos e para o avanço de metodologias analíticas voltadas à detecção de contaminantes emergentes. Dessa forma, o sensor proposto apresenta-se como uma alternativa promissora para o monitoramento da qualidade da água, alinhando inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e proteção dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Poluentes emergentes. Sensores eletroquímicos. Biochar magnético. Sustentabilidade. Monitoramento Ambiental

ABSTRACT

The presence of pharmaceuticals in aquatic environments has become a growing concern worldwide due to the potential environmental and public health impacts associated with contamination by emerging pollutants. Among these compounds, diclofenac (DCF) and paracetamol (APAP) stand out, widely used by the population and frequently detected in surface waters due to the improper disposal of medications and the inefficiency of conventional wastewater treatment systems in their removal. In this context, the present study aimed to develop and apply an electrochemical sensor based on a graphite electrode modified with magnetic biochar obtained from açaí seeds (*Euterpe oleracea* Mart.) and a molecularly imprinted polydopamide film for the selective and simultaneous detection of DCF and APAP in surface water samples, using the differential pulse voltammetry (DPV) technique. The magnetic biochar was produced from the valorization of agro-industrial waste, contributing to the sustainability of the process and to the circular economy. The proposed methodology involved the preparation and modification of the electrode, the optimization of electrochemical parameters, and the evaluation of the sensor's analytical performance through the construction of calibration curves, linearity analysis, sensitivity, selectivity, and potential application in environmental samples. The results demonstrated that the combination of magnetic biochar and molecularly imprinted film favored the amplification of the electrochemical signal and the selectivity of the analytical system, allowing the differentiation of the analytes studied. In addition to showing potential for applications in environmental monitoring, the developed technology contributes to the sustainable use of lignocellulosic waste and to the advancement of analytical methodologies aimed at detecting emerging contaminants. Thus, the proposed sensor presents itself as a promising alternative for water quality monitoring, aligning technological innovation, environmental sustainability, and the protection of water resources.

Keywords: Emerging pollutants. Electrochemical sensors. Magnetic biochar. Sustainability. Environmental monitoring.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados do último Censo (Brasil, 2022), apenas 62,5% da população brasileira possui acesso aos serviços de saneamento básico, e apenas 52,2% das águas residuais geradas no país são devidamente tratadas. Esse cenário evidencia que uma parcela significativa dos efluentes é descartada de forma inadequada, configurando um sério risco ambiental e à saúde pública (Cabrini *et al*., 2024).

A indústria farmacêutica possui elevado potencial poluidor, atribuível principalmente à produção em bateladas, ao elevado consumo hídrico e à significativa geração de lodo industrial (Netto et al., 2025). Os fármacos são classificados como poluentes orgânicos emergentes (POEs), e seu descarte inadequado acarreta impactos ambientais relevantes, afetando o solo, os lençóis freáticos, as águas superficiais, plantações e até a atmosfera, com implicações diretas para a saúde pública (Morretto *et al*., 2020). A contaminação ambiental por esses compostos pode ocorrer em diferentes etapas da cadeia produtiva, distribuição ou dispensação, sendo associada a falhas operacionais, erro humano, defeitos em equipamentos ou descarte intencional em locais impróprios (Ziarati *et al.,* 2018).

Os compostos químicos dos medicamentos são resistentes e bioacumuláveis (podem se acumular no meio ambiente ou em seres vivos) e ainda não há o conhecimento de quanto tempo os compostos farmacêuticos levam para se decompor no meio ambiente(Morretto *et al*., 2020). Além disso, a bioacumulação de compostos orgânicos em organismos de peixes pode causar danos à saúde humana, potencialmente causando efeitos alergênicos e mutagênicos (Oliveira *et al* .,2025). Indivíduos que são particularmente vulneráveis, como aqueles com sistema imunológico enfraquecido ou doenças crônicas, podem estar em maior risco de sofrer danos graves devido a ação desses contaminantes (Ziarati *et al.,* 2018) .

Sob a perspectiva regulatória, não há, até o momento, legislação específica que estabeleça limites máximos permitidos para essas substâncias no ambiente, tampouco métodos de tratamento amplamente eficazes para o controle de poluentes emergentes em sistemas aquáticos (Netto *et al*., 2025). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), aproximadamente 85% dos resíduos gerados pelas atividades de assistência à saúde são classificados como resíduos gerais não perigosos, com características semelhantes às dos resíduos domiciliares. Os 15% restantes são considerados resíduos perigosos, podendo incluir materiais infecciosos, químicos ou radioativos. Embora o descarte inadequado de produtos farmacêuticos represente um problema ambiental relevante, com implicações significativas, o tema ainda carece de regulamentações específicas e permanece como objeto de amplos debates em âmbito global (Ramos *et al*., 2017).

Nesse sentido, a crescente demanda por tecnologias mais versáteis, sensíveis e aplicáveis ao monitoramento ambiental tem impulsionado o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de diferentes metodologias analíticas, visando a detecção cada vez mais eficiente de contaminantes em matrizes

ambientais complexas(Oliveira *et al*., 2015; Cabrini *et al*., 2024). Diversos resíduos agroindustriais têm sido explorados como materiais alternativos para o tratamento e a detecção de contaminantes em águas residuais, sendo a semente de açaí (*Euterpe oleracea* Mart) um exemplo promissor devido à sua composição lignocelulósica e disponibilidade abundante.

Na região Amazônica, *Euterpe oleracea* Mart (Açaí). apresenta expressiva importância socioeconômica, destacando-se como fonte de geração de renda e sustentação econômica para comunidades ribeirinhas, especialmente por meio do extrativismo e da criação de empregos. O aumento da produção tem impulsionado o mercado regional, favorecendo o desenvolvimento local. Paralelamente, observa-se uma intensificação nas pesquisas voltadas à valorização das sementes, subproduto lignocelulósico resultante do processamento do açaí, cuja aplicação ainda enfrenta limitações de ordem tecnológica (Leal *et al*.,2025).

Uma alternativa ao reaproveitamento dos resíduos da produção do açaí é a produção do biochar. O biochar é um material carbonáceo obtido pela pirólise de biomassa orgânica, como madeira ou resíduos agrícolas, em condições de baixo teor de oxigênio. Esse material tem ganhado destaque devido à sua sustentabilidade, ampla disponibilidade, elevado potencial adsorptivo e baixo impacto ambiental (Oliveira *et al.,*2025). Diante desse cenário, a produção de biochar a partir de sementes de açaí apresenta-se como uma alternativa promissora para a detecção de contaminantes emergentes, especialmente fármacos presentes em rios, ambientes marinhos e efluentes. Essa abordagem busca aliar exatidão, precisão, seletividade, sensibilidade, rapidez e baixo custo, atendendo às demandas analíticas no monitoramento ambiental e no setor farmacêutico (Gil; Melo , 2010).

Assim, com base nos avanços em técnicas analíticas, o presente estudo tem como objetivo aplicar um sensor eletroquímico desenvolvido a partir de um eletrodo de grafite modificado com biochar magnético obtido de sementes de açaí e recoberto com um filme molecularmente impresso de polidopamina, visando a detecção seletiva e sensível de diclofenaco (DCF) e paracetamol (APAP) em amostras de águas superficiais, utilizando a técnica de voltametria diferencial de pulso (DPV).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e aplicar um sensor eletroquímico baseado em eletrodo de grafite modificado com biochar magnético obtido de sementes de açaí e filme molecularmente impresso de polidopamina, visando a detecção seletiva e sensível de diclofenaco (DCF) e paracetamol (APAP) por meio da técnica de voltametria diferencial de pulso (DPV).

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir e caracterizar o biochar magnético a partir de sementes de açaí, avaliando suas propriedades físico-químicas e magnéticas relevantes para a modificação eletroquímica. Realizar impressão dos dispositivos analíticos e testes para multiamostragem;
- Fabricar e otimizar o eletrodo de grafite modificado com biochar magnético , buscando maior seletividade, sensibilidade e reprodutibilidade nas análises eletroquímicas.
- Aplicar a técnica de voltametria diferencial de pulso (DPV) para detecção individual e simultânea de DCF e APAP, avaliando parâmetros analíticos como limite de detecção (LD), limite de quantificação (LQ), linearidade e interferência de compostos comuns.

CAPÍTULO II

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 A automedicação e uso irracional de medicamentos

A utilização dos medicamentos é a principal fonte clínica para as intervenções estratégicas no âmbito da saúde. Tendo como aplicação direta nos tratamentos, curas , prevenção e diagnóstico das doenças. São também um importante fator de construção e modificação das dinâmicas sociais, caracterizando uma tecnologia de valor inestimável que tem uma grande relevância nos aspectos econômicos da saúde pública (Leite *et al*., 2022) .

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a automedicação é a seleção e o uso de medicamentos , incluindo os chás e produtos tradicionais, realizada por pessoas para tratar doenças autodiagnosticadas ou seus sintomas. É uma temática amplamente discutida na cultura médico-farmacêutica e é um grave problema de saúde pública global. Dentro de uma visão crítica , pode-se analisar que a automedicação está inserida nas práticas do autocuidado, porém com o uso inadequado e múltiplas associações, podem agravar os problemas de saúde e trazendo um aumento dos custos para o sistema de saúde (Melo *et al*. ,2021).

O Brasil é considerado um dos países no mundo que consomem medicamentos para diversos problemas de saúde, onde muitas vezes são utilizados de forma indiscriminada e sem orientação ou prescrição médica (Silva; Takasusuki; 2020) .Cerca de 65% dos brasileiros têm o hábito da automedicação, sendo os analgésicos a classe de medicamentos consumida por 30% da população, além de indiretamente existir incentivo a automedicação no Brasil, pois a maioria dos medicamentos geralmente são vendidos sem receita médica (Rausch; Agostinetto; Siegloch, 2023). Os variados motivos que levam o individuo a se automedicar podem ser apontados como o conhecimento ou a experiência prévia com os sintomas de determinada doença; acreditar que conhece sobre a origem da doença; limitação sobre os recursos financeiros para o cuidado com a saúde; indisponibilidade de tempo para a procura do tratamento de forma adequada e segura em unidades de atendimento a saúde (Gama ;Secoli, 2017).

O elevado percentual de pessoas que usam diariamente medicamentos pode contribuir para a geração de resíduos, que associada a falta de um sistema de logística reversa efetivo para os medicamentos domiciliares tem como desfecho o descarte inadequado desses resíduos perigosos. Tais resultados vem ao encontro de uma pesquisa nacional que investigou o consumo e descarte de medicamentos e mostrou que 57% dos brasileiros usam medicamentos atualmente, sendo que 41,7% dos participantes tomam de um a dois medicamentos por dia e 66% dos participantes descartam os medicamentos fora de uso ou vencidos no resíduo domiciliar (Rausch; Agostinetto; Siegloch, 2023).

Há diversos fatores que contribuem para o descarte de medicamentos, dentre eles, a não adesão ao tratamento devido à posologia alastrada, reações adversas e forma farmacêutica adotada, além disso, a automedicação, interrupção ou término do tratamento e a validade vencida do medicamento. Geralmente, comprimidos, drágea,

cápsula, cremes, pomadas, soluções orais, géis, e aerossóis são as formas farmacêuticas mais comumente descartadas(Morretto *et al*., 2020).

A população precisa compreender com urgência, não só sobre o uso racional de medicamentos, mas também a grande importância do descarte correto dos medicamentos, de forma consciente, e entender os principais efeitos que podem ser gerados E para que isso seja executado da melhor forma, é necessário conscientização ambiental dos individuos, sobre a perspectivada e compreensão dos principais efeitos e impactos no meio ambiente, devido a presença de substâncias indesejadas (Silva; Takasusuki; 2020).

3.2 O descarte de medicamentos: Um alerta de preocupação ambiental

O desenvolvimento do cenário científico trouxe grandes avanços para as ciências da saúde, trazendo incontestáveis benefícios a saúde da população do mundo. Que de contrapartida, também houve um grande aumento na produção de novos compostos químicos utilizados como medicamentos de diversas classes terapêuticas, estando disponíveis para a aquisição em farmácias e drogarias , assim também como o seu uso pelos estabelecimentos de saúde , tais como : clínicas, centros de saúde e hospitais (Ramos *et al*., 2017).

A maior parte das intervenções em saúde, se dá, pelo uso de medicamentos, sendo uma escolha imprescindível para a manutenção dos tratamentos ou até mesmo no manejo de cura das doenças. A maneira de como se dá o processo de aquisição e consumo de medicamentos, pode ser considerada um problema não só de saúde pública, mas também de ordem ambiental. Em diversas ocasiões os medicamentos não são consumidos por completo, após a sua aquisição, dado por diversos fatores: prescrição, dispensação, forma farmacêutica adequada para administração. Tendo como impactos o acúmulo significativo de medicamentos em residências, formando subestoques, que posteriormente terão que ser descartados e muitas vezes sem a devida orientação (Maria ; Andrade, 2022).

Os resíduos produzidos por meio da cadeia farmacêutica são encontrados tanto em instituições relacionadas aos serviços de saúde, quanto em posse da população em suas residências. Sabe-se que, atualmente, os resíduos gerados pelos hospitais e postos de saúde estão sujeitos a um sistema de gerenciamento, assim, há grande importância em informar e conseguir bons resultados para que a população saiba descartar os medicamentos vencidos ou sem utilidade em ambiente próprio, ou seja, nas farmácias que participam do processo de coleta desses produtos químicos (Marquezotti;Bittencourt , 2016).

Em um estudo realizado por Morrette et al.2020, com 490 indívudos que eram residentes na cidade de São Paulo e Grande São Paulo, atestaram que 55% dos entrevistados não possuiam conhecimento a respeito de como realizar corretamente o descarte dos medicamentos. Cerca de 54% desse grupo de pessoas relataram que realizam o descarte nos lixos domésticos. Uma abordagem bem significativa desse estudo é que 95% dos entrevistados

consideraram que se houvesse uma correta orientação sobre o descarte seguro e correto de medicamentos, eles o assim realizariam.

Com a constante expansão do mercado farmacêutico, a poluição por medicamentos emerge como uma preocupação latente das pautas da saúde pública em esfera global. As discussões sobre o descarte inadequado de medicamento, foram tomadas desde o inicio da década de 1990 , tendo por iniciativa os órgãos fiscalizadores de saúde dos Estados Unidos da América (EUA). Inicialmente, com o intuito de reduzir os riscos à saúde humana, as orientações feitas a população que ao descartarem os medicamentos vencidos ou não utilizados, estes deveriam ser feitos em vasos sanitários, evitando o uso por terceiros caso os encontrassem em lixo comum. Entretanto, naquele momento, os danos ao meio ambiente foram completamente desconsiderados, e suas consequências apareceram posteriormente com a identificação desses compostos químicos na água. A partir disso, debates e discussões sobre essa temática forma mais priorizadas (Silva *et al*., 2023) .

A maneira que os medicamentos são descartados pela população é uma grande problemática a ser discutida, tendo em vista que grande parte da população não possui o conhecimento técnico sobre os impactos gerados ao meio ambiente com o descarte incorreto dessas substâncias. Os medicamentos são produtos químicos, quando expostos a condições como umidade, temperatura e luz, podem se tornar substâncias tóxicas e afetar o equilíbrio de meio ambiente, alterando os ciclos biogeoquímicos, interferindo nas cadeias alimentares (Sousa *et al.,* 2020). Os riscos dos resíduos medicamentosos ao meio ambiente dependem, em primeiro lugar, do grau de toxidade e, em segundo, do alcance de sua concentração nos ecossistemas (persistência ambiental), que está relacionado com o tempo de permanência do resíduo no ambiente devido à sua resistência à degradação química e biológica associada aos processos naturais (Ramos *et al.,* 2017).

Essa questão não é um problema enfrentado unicamente no Brasil e pode ser discutida através de outros estudos realizados mundialmente. Em Pereira et al., 2019, uma pequisa de campo realizada no estado de Anambra, localizado na Nigéria, visava avaliar as práticas realizadas por farmacêuticos sobre os medicamentos vencidos e sem utilização. O estudo foi realizado por meio de formulários eletrônicos, e os autores tiveram 77 questionários completamente respondidos . Os vários métodos de disposição desses medicamentos foram realizados da seguinte forma: Cerca de 31,8% eram direcionados a Agência Nacional de Administração e Controle de Alimentos e Medicamentos (NAFDAC) ; 31,8 % distribuidores de medicamentos , 23, 9% e em lixeiras cerca de 9,1%, considerando principalmente as formas farmacêuticas sólidas. No entanto, 7,1% relataram que usavam a pia para descartar suas formas farmacêuticas líquidas e 29,6% (formas farmacêuticas generalizadas). Alguns desses entrevistados, cerca 22,1% relataram que o NAFDAC usa incineração ou outras formas de calor para descartar medicamentos vencidos, mas 24,7% relataram que não sabem ou desconhecem como o NAFDAC faz com os medicamentos descartados.

Em uma análise internacional, é possível trazer alguns exemplos de programas destinados as coletas e descartes de medicamentos , o *"Take-back Program"* -Programa de Retomada, desenvolvido e implementado em

países como a Nova Zelândia, Gana, Estados Unidos, Irlanda e Suécia. Esse programa tem como objetivo, sensibilizar a comunidade sobre a importância de escolher opções ecologicamente corretas para o descarte de medicamentos domésticos, assim como a devolução desses produtos quando vencidos ou não utilizados. Somente a Austrália adotou uma política pública a nível nacional para o descarte de medicamentos, o chamado *National Return and Disposal of Unwanted Medicines (NATURUM),* implementado em 1998, e que está operando desde então em todas as farmácias australianas (Constantino *et al*.,2020).

É quase que unânime que em todos os estudos realizados a cerca dessa temática, a maioria da população desconhece os meios corretos de descarte de medicamentos e os impactos negativos causados ao meio ambiente. O armazenamento de medicamentos em residências é quase que um hábito cultural das pessoas (Sousa *et al.,*2020). É indiscutível que os destinos dos resíduos das indústrias farmacêuticas tenham grande influência na saúde pública, pois os efeitos no meio ambiente afetarão a todos em algum momento, direta ou indiretamente. (Marquezotti;Bittencourt , 2016).

A Organização Mundial de Saúde (OMS), ao longo dos anos vem discutindo também sobre as pautas ambientais. Passaram a produzir pesquisas cientificas demonstrando a prevalência de medicamentos em águas subterrâneas e potáveis, bem como os potenciais riscos a saúde humana e ecológica. É um consenso que os efluentes hospitalares são a principal fonte dos compostos farmacêuticos no ambiente aquático, apesar destes apresentarem uma grande dispersão em vários ambientes naturais (Areche *et al.,* 2023) .

Muitas farmácias e instalações de saúde têm programas para o recebimento de medicamentos não utilizados para descarte seguro. Além disso, alguns municípios possuem programas de recolhimento de medicamentos que permitem que as pessoas descartem utilizando uma maneira segura e responsável. Além da supervisão regulatória, existem várias outras medidas que podem ser tomadas para prevenir a contaminação de medicamentos (Alencar *et al,* 2014).

Uma alternativa que poderia partir por parte da indústria farmacêutica, seria dos fabricantes poderem implementar tecnologias de teste mais avançadas para detectar contaminantes, enquanto os distribuidores e dispensadores podem melhorar seus procedimentos de manuseio e armazenamento para reduzir o risco de contaminação. Em geral, a contaminação de medicamentos é um problema sério que requer atenção e ação contínuas de todos os as partes interessadas no ecossistema de saúde. Trabalhando juntos para implementar as melhores práticas e ficar vigilantes contra riscos potenciais, podemos ajudar a garantir que a população em geral recebam água segura e eficazes (Ortúzar, 2022).

3.3 Impactos da presença de compostos farmacêuticos no meio ambiente

Os resíduos de serviços de saúde podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, devido suas características de inflamabilidade, corrosividade, toxicidade e reatividade A descoberta de compostos farmacêuticos

no meio aquático tem desencadeado, na última década, o desenvolvimento de vários estudos em torno dos impactos que eles estão gerando ou podem gerar ambiente e à saúde pública (Marquezotti;Bittencourt , 2016).

Para a determinação da relevância dos impactos ambientais associados aos resíduos de medicamentos, é necessário quantificar o consumo, analisar mecanismo de ação, potencial de biodegradabilidade e avaliar o risco ecotoxicológico (Liporage *et al*., 2023). No Brasil, alguns estudos têm detectado moléculas de medicamentos ou de seus metabólitos no meio ambiente, tais como antibióticos, anti -hipertensivo, anti-inflamatórios, antidepressivos, antimicrobianos, benzodiazepínicos, hormônios, entre outros (Rausch; Agostinetto; Siegloch, 2023) . O descarte dos medicamentos no meio ambiente já é considerado um problema ambiental e também da ordem de saúde pública, pois muitos medicamentos que são despejados no meio ambiente podem gerar problemas socioeconômicos, ambientais e principalmente toxicológicos, uma vez que ao entrar em contato com espécies marinhas podem provocar contaminação do meio em que vivem, provocando desastres ambientais por conta do seu descarte incorreto (Silva, Takasusuki ;2021)

O descarte inadequado de medicamentos constitui uma das principais fontes de contaminação ambiental por fármacos, especialmente devido à prática ainda recorrente de descarte em resíduos sólidos urbanos ou diretamente na rede de esgotamento sanitário. Embora as Estações de Tratamento de Água e Esgoto desempenhem papel fundamental na proteção dos recursos hídricos, diversos estudos demonstram que os tratamentos convencionais apresentam eficiência limitada na remoção de muitos desses compostos. Como resultado, resíduos farmacêuticos podem persistir no ambiente e atingir diferentes ecossistemas, causando efeitos adversos sobre a biota. Entre os impactos observados, destacam-se alterações em funções fisiológicas de plantas e a capacidade de bioacumulação de fármacos em estruturas vegetais, evidenciando os riscos associados à presença contínua desses contaminantes no meio ambiente (Silva *et al.,* 2023)

Se não há uma remoção eficiente nas Estações de Tratamentos de Águas Residuais é esperado que parte dos fármacos cheguem até os rios e outros recursos hídricos. Uma vez detectada a contaminação ambiental, a presença de fármacos em águas residuais, sedimentos e em água para uso humano podem chegar até o homem e causar efeitos indesejáveis, pois são capazes de atravessar as membranas biológicas e atingir células e tecidos (Silva *et a*l.,2023).

Os fármacos quando sintetizados são planejados para serem compostos biologicamente ativos, e portanto, podem apresentar efeitos em organismos terrestres e aquáticos mesmo que estejam em sua concentração mínima. Os efeitos ao meio ambiente diante dessa exposição vem sendo observados em laboratórios sob os ensaios toxicologicos. E esses testes vem apontando que concentrações mínimas da quantidade de um determinado fármaco encontradas no ambiente, ja são suficientes riscos para a presença da biota aquática (Marquezotti; Bittencourt , 2016).

Um fato recente, e importante de ser levado em consideração, que durante a pandemina da COVID -19, alguns medicamentos estiveram em evidência, mesmo sem comprovação de sua eficiência ao combate ao novo coronavírus, um exemplo em destaque foi o uso inadequado da Ivermectina (IVM). A presença deste fármaco no

meio ambiente, tem em seu potencial tóxico, consequências em médio e longo prazo estão sendo estudadas desde os anos 80. Entretanto, as concentrações de IVM no ambiente têm sido pouco avaliadas, principalmente nas regiões produtoras de alimentos, como na África e na América Latina, assim como em países que usam a IVM de modo preventivo em animais de companhia . Como descrito inicialmente, o fármaco ativo é eliminado praticamente integro nas fezes e por isto não se observa claramente os danos causados em curto prazo, porém, como sua liberação é lenta e cumulativa por mais de 200 dias, os danos ambientais são definitivamente muito preocupantes (Molenta, 2021) .

A presença de antibióticos em ambientes aquáticos representa uma preocupação significativa para a saúde pública e ambiental, uma vez que pode favorecer a seleção e disseminação de microrganismos resistentes, comprometendo a eficácia dos tratamentos antimicrobianos. Além disso, resíduos de hormônios estrogênicos provenientes de anticoncepcionais, frequentemente introduzidos nos corpos hídricos por meio da excreção urinária e do lançamento de esgotos, têm sido associados a alterações endócrinas na fauna aquática. Entre os efeitos observados, destaca-se a feminilização de peixes machos, evidenciando o potencial impacto desses contaminantes sobre o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (Moretto et al., 2020).

Em estudo realizado por Silva et al. 2022, nas águas da Estação de Tratamento de Águas Flamengo, localizada na cidade do Rio de Janeiro, no Brasil. Foram encontrados em seus nascentes resíduos de algumas classes de antimicrobianos : sulfametoxazol-trimetoprim, ampicilina, levofloxacino e ciprofloxacino — correspondendo à classe antagonista da via folato, penicilina e fluoroquinolonas, respectivamente. Foi observada susceptibilidade à amoxicilina-clavulanato, ampicilina-sulbactam, piperacilina-tazobactam, cefazolina, cefoxitina, cefotaxima, ceftazidima, aztreonam, ertapenem, meropenem, imipenem, amicacina e gentamicina. Estudos apontam a contribuição dos efluentes hospitalares para a disseminação de microrganismos com perfil de resistência aos β-lactâmicos de espectro estendido, carbapanemases e quinolonas .

Os antibióticos representados pelas classes das quinolonas e macrolídeos são relatados como os antibióticos com maior potencial contaminante, pois são removidos com menor eficiência e apresentam risco para a biota aquática e a saúde humana por promoverem a resistência bacteriana, assim como os demais antimicrobianos. Além disso, outros efeitos importantes foram levantados em plantas, sendo observados devido à presença de medicamentos em matrizes ambien tais, sobretudo relacionados às funções vitais e à capacidade de armazenamento de fármacos em partes vegetais (Silva *et al.,* 2014).

Trazendo como exemplo os medicamentos que compõem a classe dos antidepressivos (fluoxetina, paroxetina, venlafaxina, carbamazepina) e antibióticos como: sulfametoxazol e eritromicina, também podem ser encontrados em ambientes aquáticos, sendo encontrados como fontes de poluição urbana, e que ao entrar em contato com o mexilhão Perna perna ou o *mexilhão azul M. edulis*, causam danos irreversíveis em sua estrutura e condição biológica. E esse ponto é altamente complexo, pois o ambiente aquático é compreendido por vários tipos de

ecossistemas diferentes como rios, lagos, estuários, mares e oceanos, onde pode haver uma grande quantidade de fármacos em vários pontos específicos, podendo haver um prejuízo econômico, social e
Ambiental (Silva; Takasusuki , 2021) .

Uma outra classe de medicamentos que traz também essa preocupação são os antineoplásicos de uso orais. Diversas vantagens ao tratamento dos pacientes essa opção de fármaco se sobressaem a terapaia antineoplásica convecional realizada em hospitais. Apesar de sua toxicidade celular, os medicamentos antineoplásicos administrados por via oral têm sido encontrados no meio ambiente representando impactos ambientais em potencial, conforme indicado em diversas publicações científicas ao redor do mundo. Os frascos e embalagens de antineoplásicos orais vazios podem ainda conter resíduos desses medicamentos e devem ser descartados de maneira correta pela unidade de saúde. (Liporage *et al*.,2023)

A Tabela 1 apresenta os principais focos de contaminação ambiental associados às diferentes classes farmacológicas, destacando suas rotas de entrada nos ecossistemas aquáticos e terrestres, bem como os potenciais impactos ambientais decorrentes de sua presença. Entre os efeitos observados estão alterações fisiológicas em organismos aquáticos, desenvolvimento de resistência microbiana, bioacumulação e desequilíbrios ecológicos, evidenciando a relevância do monitoramento e da gestão adequada desses contaminantes emergentes.

Tabela 1. Principais focos de contaminação ambiental associados às diferentes classes farmacológicas

Classe do Medicamento	**Impactos gerados no meio ambiente**
Antibióticos	Aumento da resistência bacteriana
Estrógenos e repositores hormonais	**Animais :** Feminilização e comportamento atípicos dos peixes; aumento da mortalidade e deformidade de pequenos crustáceos. **Humanos** : Cânceres, disfunções tireoidianas, alterações no sistema nervoso e no aparelho reprodutor.
Antineoplásicos e imunossupressores	Potencial mutagênico
Antifúngicos	Aumento a resistência de cepas
Complexos vitaminicos	Acúmulo de metais pesados em águas e solos
Antidepressivos	Reprodução prematura de alguns moluscos
Cardiotônicos	Impede a reparação das barbatanas dos peixes

Fonte: Silva *et al.,* 2022

Como alternativas de medidas de mitigação, a Comissão Europeia estabeleceu normas de regulamentação, com níveis de toxicidade para vários medicamentos, após a avaliação do impacto de produtos e que deverão ser atingidos até 2030 .Para que esses padrões pudessem se definidos ,realizaram modelos matemáticos para determinar cenários

de risco, incluindo o impacto em humanos, com a eliminação de fármacos nos efluentes e o consumo de água não tratada. No Brasil, é imperativo que se discutam estas possibilidades, visando um melhor monitoramento destes resíduos. Somente assim, será possível o estabelecimento de medidas de uso consciente de frequência e concentração, reduzindo os efeitos adversos, previstos nos protocolos de farmacovigilância, para se trabalhar em consonância com as iniciativas de Saúde Única (Molenta, 2021).

3.4 A Agenda de Desenvolvimento Sustentável e os impactos dos resíduos de saúde

A Agenda 2030 é uma iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU) que propõe um pacto global em prol do desenvolvimento sustentável. Seu principal intuito é garantir o desenvolvimento humano e o atendimento às necessidades básicas do cidadão por meio de um processo econômico, político e social que respeite o ambiente e a sustentabilidade (Moreira *et al.*, 2019). Em sintonia com essa perspectiva, a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) definiu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), também denominados objetivos globais, os quais são compostos por 169 metas, além dos 232 indicadores que trazem consigo as suas declarações, tratando sobre visão, principios e compromissos compartilhado (Ramos *et al.* , 2024)

A Figura 1 apresenta os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Agenda 2030 das Nações Unidas, um plano de ação global voltado à promoção do desenvolvimento econômico, social e ambiental de forma integrada. Esses objetivos buscam enfrentar desafios contemporâneos relacionados à erradicação da pobreza, proteção ambiental, saúde, educação, inovação, consumo responsável e preservação dos recursos naturais, constituindo uma referência para a formulação de políticas públicas e iniciativas voltadas à sustentabilidade em escala mundial.

Figura 1. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030



Fonte: Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030 do Desenvolvimento Sustentável (2024).

Se faz importante lembrar que os ODS são globais por natureza e universalmente aplicáveis, ou seja, as suas ações e práticas para a sua implantação devem ser adaptadas às realidades nacionais e subnacionais, em que cidades e comunidades sustentáveis, possam se alinhar integralmente à Agenda 2030. É importante que mediante ao compromisso firmado , essas ações possam promover modificações nas formas de consumo e de produção e eficiência no sistema de energia de baixo carbono, competência no gerenciamento da água, preservação dos recursos naturais e proteção ao ecos sistema e à biodiversidade, desenvolvimento de tecnologias limpas para a gestão de resíduos locais, monitoramento e controle dos efeitos das mudanças climáticas, melhorias nas condições habitacionais e acesso universal às áreas verdes (Portella *et al*.,2024).

É importante ressaltar , que entre os 17 ODS, os de números 3,6, 9,12 e 14 possuem uma relação direta atrelada a produção, distribuição e consumo consciente de medicamentos e produtos para a saúde. Assim como também , o quanto o resíduo final desses produtos, quando não realizados corretamente, podem impactar no desenvolvimento sustentavel do meio ambiente, levando em um maior destaque os rios, mares e oceanos.

As análises para a implementação da Logística Reversa de Medicamentos, além de auxiliar na mitigação das consequências da fármaco-contaminação, contribuem assertivamente para o alcance dos principais ODS relacionados aos resíduos medicamentosos, através de ações relacionadas: à mobilização dos elos da cadeia da logística reversa para implementação das políticas municipais, estaduais e federal; educação ambiental sobre o consumo e descarte de fármacos; ao Controle, monitoramento e fiscalização da prestação dos serviços de saneamento e da qualidade ambiental; à atenção básica às condições de vida e de trabalho (investimento nas infraestruturas para disposição final adequada desses resíduos sólidos; Incentivo às cooperativas de catadores; e estimulo à criação de consórcios municipais); à promoção de saúde; ao desenvolvimento de tecnologias limpas; à conservação dos serviços ecossistêmicos; e ao controle da poluição. Com isso, cria-se uma agenda intersetorial comprometida com o desenvolvimento de políticas públicas promotoras da sustentabilidade (Lima *et al.,*2023).

Os custos para a disposição final de resíduos da saúde, levando em consideração os fármacos, se tornaram cada vez mais elevados. Tal fato poderia mobilizar esforços dos estabele cimentos de saúde para reduzir a quantidade de resíduos na fonte (Ventura *et al*., 2010). A desinfecção de esgotos é uma barreira sanitária indispensável quando se pretende aproveitar o potencial de multiplicidade de uso das águas sem causar danos ou riscos à saúde da população, especialmente quando se faz o uso expressivo dos recursos hídricos para a diluição de despejos e levando-se em consideração o contexto atual de urgente consolidação das práticas de reúso de esgotos sanitários (Pedroso *et al*., 2018).

As concepções que essas metas são elaboradas de maneira integrada e indivisível, levando em consideração que as ODS tem uma consideravel importância na implementação de políticas públicas (Ramos *et al.* , 2024). Pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos materiais com potencial para remediação e identificação de contaminantes em ambientes aquáticos e terrestres é fundamental na contribuição direta para o cumprimento dos Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente as metas 6 (Água limpa e saneamento) e 14 (Vida abaixo da água), além de apoiarem, de forma indireta, a meta 13 (Ação contra a mudança global do clima) (Nobre *et al*.,2023).

3.5 Técnicas Eletroanalíticas

Na ciência analítica contemporânea, a Eletroanalítica desempenha um papel fundamental no aprimoramento e na inovação de métodos de análise, bem como no desenvolvimento de sensores químicos, dispositivos e sistemas avançados. Esses instrumentos apresentam elevada capacidade para detectar, monitorar e quantificar uma ampla variedade de analitos em diferentes tipos de matrizes, incluindo fluidos biológicos, amostras ambientais, microssistemas e outros contextos que demandam soluções tecnológicas de alta complexidade para a resolução de desafios analíticos emergentes (Zanoni *et al*., 2017).

Os métodos eletroanalíticos apresentam diversas vantagens relevantes, dentre as quais se pode destacar: alta seletividade e especificidade das determinações, decorrentes dos processos de oxirredução das espécies analíticas de interesse sob um potencial aplicado específico. Seletividade adicional, associada à utilização de eletrodos de trabalho confeccionados com materiais específicos, que conferem maior controle sobre as reações eletroquímicas envolvidas. E elevada sensibilidade e baixos limites de detecção, atribuídos tanto ao emprego de técnicas de pré-concentração quanto a modos de aquisição de sinal que minimizam o ruído de fundo. Essas características tornam os métodos eletroanalíticos ferramentas extremamente eficazes e versáteis na investigação e quantificação de analitos em diferentes contextos experimentais (*Pacheco et al.,* 2013).

A transdução de sinal e o desempenho geral de sensores eletroquímicos são frequentemente determinados pelas arquiteturas de superfície que conectam o elemento sensor à amostra biológica em escala nanométrica. As técnicas de modificação de superfície mais comuns, os diversos mecanismos de transdução eletroquímica e a escolha das moléculas receptoras de reconhecimento influenciam a sensibilidade final do sensor. (Grieshaber *et al.* 2008)

As principais técnicas voltamétricas empregadas em eletroanálise incluem a Voltametria Cíclica (CV), a Voltametria de Pulso Diferencial (DPV) e a Voltametria de Onda Quadrada (VOQ). Dentre essas, a CV é amplamente utilizada em estudos preliminares, por se tratar de uma técnica eletroquímica que consiste na variação contínua e cíclica do potencial aplicado a uma célula eletroquímica. Essa metodologia permite a obtenção de informações acerca dos processos redox, como correntes de pico, potenciais padrão, reversibilidade das reações e comportamento eletrocatalítico do sistema, possibilitando análises tanto qualitativas quanto quantitativa (Climent ; Feliu ; 2015).

Por sua vez, as técnicas DPV e VOQ caracterizam-se por serem modos de varredura mais sensíveis, baseados na aplicação de pulsos de potencial de amplitude progressiva, o que resulta em maior resolução e menor ruído de fundo. As técnicas eletroanalíticas, que abrangem um conjunto de métodos voltamétricos, configuram-se como alternativas eficientes para a detecção e quantificação de poluentes ambientais. Sua aplicação é justificada por diversas

vantagens, entre as quais se destacam o baixo custo de operação, a agilidade do processo analítico e, sobretudo, a capacidade de realizar análises diretas das amostras, dispensando etapas preliminares de separação ou pré-tratamento. Essas características conferem a essas técnicas grandes potenciais para o monitoramento ambiental e para a obtenção de resultados rápidos e confiáveis em diferentes contextos analíticos (Dos Santos *et al*., 2014) .

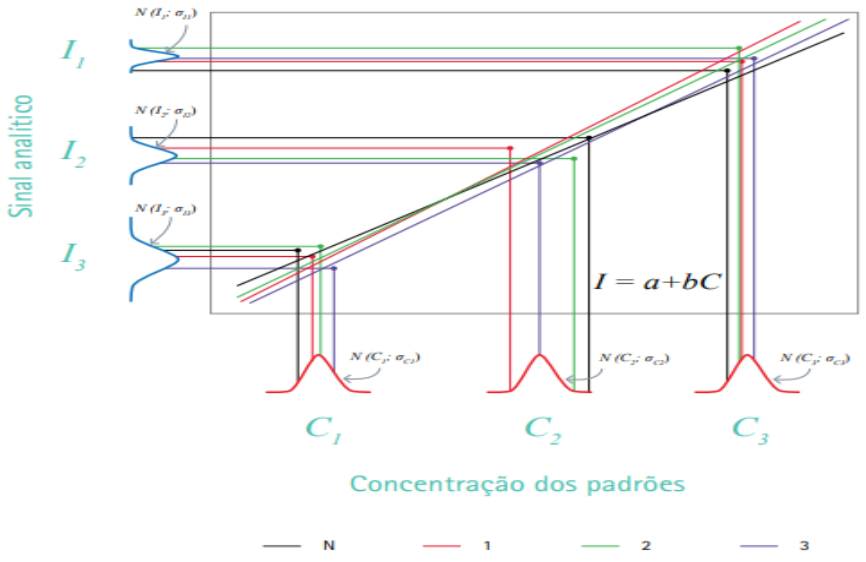
3.6 Curvas de calibração analíticas

As curvas de calibração analíticas consistem em modelos matemáticos que são empregados para transformar sinais analíticos em concentrações correspondentes. Tais curvas são usualmente obtidas por meio de procedimentos de regressão numérica, com destaque para o método dos mínimos quadrados (MMQ), o qual permite o ajuste de modelos tanto lineares quanto não lineares. Na prática analítica, é comum a estimativa da incerteza associada à curva de calibração desconsiderar as incertezas oriundas dos padrões utilizados na sua construção — denominados pontos da curva. Essa abordagem se fundamenta na suposição de que a variabilidade do sinal analítico é, em geral, significativamente superior à incerteza associada às concentrações dos padrões (Zucchini,2018).

A incerteza de medição é um parâmetro fundamental que expressa a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, levando em consideração as informações disponíveis durante o processo de medição. Ela representa uma faixa de valores possíveis para o resultado estimado, indicando que nenhuma medição é completamente isenta de erros. Dessa forma, a consideração da incerteza é essencial na avaliação da conformidade de produtos e processos, pois permite uma análise mais precisa e confiável dos resultados obtidos, contribuindo para a tomada de decisões fundamentadas e rigorosas na área analítica (Sousa ; Soares Jr, 2016).

A Figura 2 apresenta as curvas de calibração analíticas geradas por meio da Simulação de Monte Carlo (MCS), ferramenta estatística amplamente empregada para avaliar a variabilidade e a incerteza associadas a modelos analíticos. A partir de múltiplas interações realizadas com dados simulados, foi possível obter um conjunto de curvas representativas do comportamento do método analítico, permitindo analisar sua robustez, linearidade e sensibilidade frente às variações experimentais. Essa abordagem contribui para uma avaliação mais abrangente do desempenho analítico, fornecendo informações relevantes sobre a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 2 .Curvas de calibração analíticas geradas pela Simulação de Monte Carlo (MCS)



Fonte : Zucchini, 2018

Embora essa simplificação seja frequentemente válida e traga conveniência do ponto de vista matemático e computacional, sua aplicabilidade torna-se inadequada quando a magnitude da incerteza dos padrões torna-se comparável, ou superior, à variabilidade observada nos sinais analíticos. Nesse cenário, a suposição deixa de ser válida, comprometendo a acurácia da avaliação da incerteza global da calibração.

3.7 Dispositivos eletroquímicos para o sensoriamento de compostos farmacêuticos

A presença dos fármacos em ambientes aquáticos são motivos de estudos desde o inicio da década dos anos 1970, pois a partir de novas técnicas e equipamentos analíticos que são utilizados no meio ambiente foi possível identificar a presença de medicamentos em águas marinhas incluindo a quantidade dos compostos químicos utilizados e o nível de contaminação em espécies ambientais (Silva ; Takasusuki, 2021).

Os produtos farmacêuticos são espécimes químicas com grandes potenciais contaminantes. Os poluentes farmacêuticos foram detectados em uma ampla variedade de ecossistemas, incluindo água, rios (lagoas, córregos e lagos), água do mar, estações de tratamento de esgoto (efluentes industriais), sedimentos e lamas. Como resultado, encontrá-los em toda a biosfera se tornou uma questão urgente de preocupação ambiental, e uma melhor tecnologia de águas residuais é crucial para combater a poluição (Areche *et al.*, 2023).

Com o avanço de novas técnicas para mensurar a existência de substâncias capazes de aumentar os danos ao meio ambiente. O desenvolvimento de metodologias que permitam a detecção e quantificação de substâncias em níveis de concentração cada vez menores tem sido um grande desafio (Franzoi *et al.*, 2011) . Nos últimos anos, é

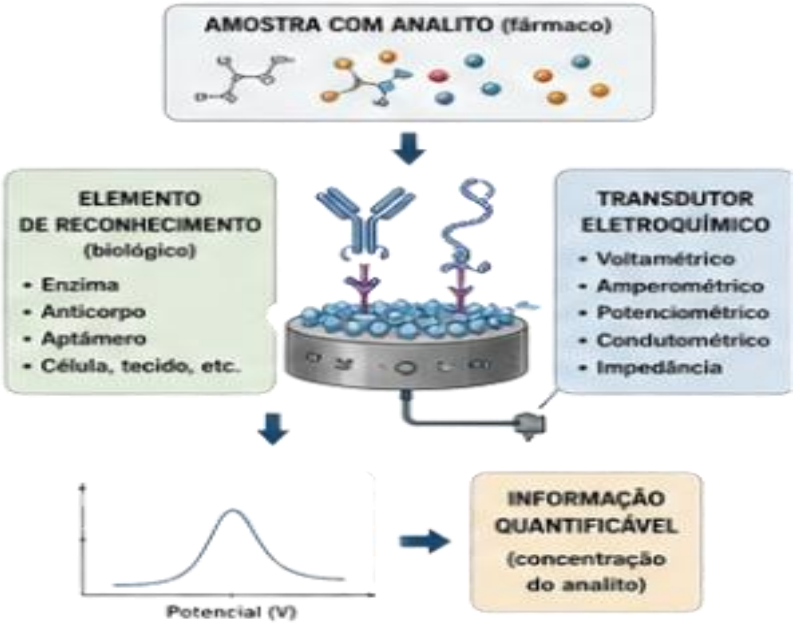
observado um aumento pelo interesse no desenvolvimento de dispositivos de detecção eletroquímica, com alvo no monitoramento ambiental, ensaios clínicos ou controles de processos estão em rápida expansão.

A pesquisa relacionada a biossensores experimentou um crescimento explosivo nas últimas duas décadas. Um biossensor é geralmente definido como um dispositivo analítico que converte uma resposta biológica em um sinal quantificável e processáveis.(Grieshaber *et al.* 2008). Os sensores eletroquímicos satisfazem muitos requisitos para tais atividades analíticas, especialmente pela sua especificidade inerente , respostas rápidas, sensibilidade e simplicidade na sua construção. Os sensores são classificados como sensores eletroquímicos, ópticos ou baseados em massa, dependendo do seu elemento transdutor (Kakimova *et al*.,2022).

Os sensores são formados de duas partes principais: um componente de reconhecimento biológico (enzima, anticorpo, célula, tecido, etc.) diretamente conectado a um transdutor físico (voltamétrico, amperométrico, condutométrico, espectrofotométrico, etc.) . A ampla variedade de sistemas biológicos que podem ser usados como sistemas de reconhecimento, permitindo assim, que os biossensores sejam específicos para um conjunto muito grande de analítos. Além disso, transdutores eletroquímicos conferem alta sensibilidade para esses dispositivos (Gil; Melo, 2010).

A Figura 3 apresenta um esquema ilustrativo da sensibilidade dos sensores eletroquímicos frente à amostra analisada. O modelo demonstra a capacidade desses dispositivos em detectar e converter interações químicas ocorridas na superfície do eletrodo em sinais elétricos mensuráveis, mesmo na presença de baixas concentrações do analito. Essa elevada sensibilidade é um dos principais atributos dos sensores eletroquímicos, permitindo a identificação de compostos de interesse em matrizes complexas e contribuindo para análises rápidas, precisas e com reduzido consumo de reagentes.

Figura 3. Esquema ilustativo sobre a sensibilidade dos sensores eletroquímicos diante da amostra a ser analisada

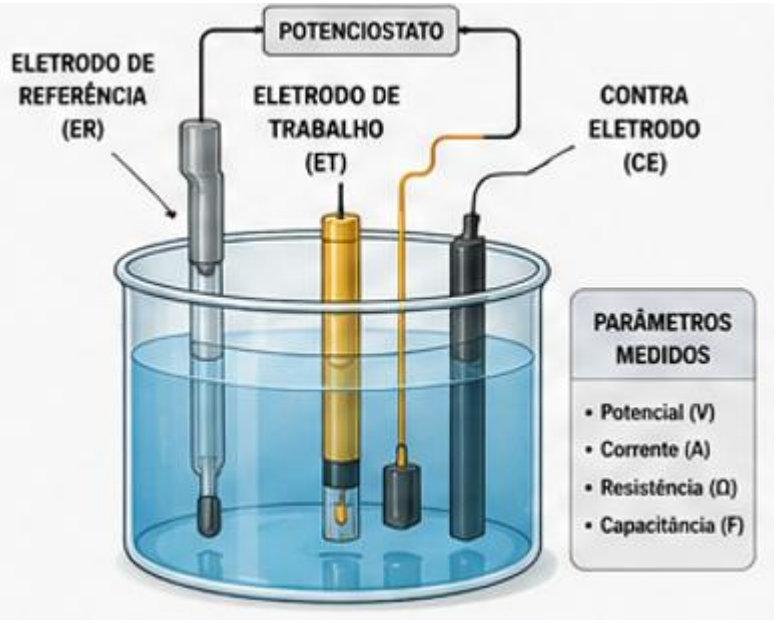


Fonte : Gerada por Inteligência Artificial ChatGPT Plus (2026)

Os procedimentos analíticos padronizados exigem o emprego de eletrodos de detecção que sejam capazes de fornecer um sinal elétrico detectável sobre a adsorção eletroquímica ou reatividade com analitos na identificação eletroquímica de contaminantes da água. Além dos pares de ânodo, cátodo e íons de cátodo, a detecção eletroquímica também faz uso de um eletrodo de referência, eletrodo de trabalho e contraeletrodo. Resistência, potencial, capacitância e corrente flutuarão como resultado da poluição, e essas variações podem ser medidas e avaliadas (Areche *et al.*, 2023).

A Figura 4 apresenta a configuração básica de uma célula eletroquímica composta por três eletrodos: eletrodo de trabalho, eletrodo de referência e contra eletrodo. Nesse sistema, o eletrodo de trabalho constitui a superfície onde ocorrem as reações eletroquímicas de interesse e onde a resposta analítica é gerada. O eletrodo de referência fornece um potencial estável e conhecido, permitindo o controle preciso das medidas eletroquímicas, enquanto o contra eletrodo atua como elemento auxiliar, completando o circuito elétrico e possibilitando a passagem de corrente durante o experimento. Essa configuração é amplamente empregada em técnicas voltamétricas devido à sua elevada precisão, reprodutibilidade e capacidade de monitorar processos redox em diferentes tipos de amostras.

Figura 4. Esquema de um dispositivo eletroquímico



Fonte : Gerada por Inteligência Artificial ChatGPT Plus (2026)

As técnicas eletroquímicas são rápidas e eficientes na detecção de farmacos existentes no meio aquoso. Diferentes tipos de sensores eletroquímicos, dependendo do mecanismo específico usado para a reação eletroquímica. Por exemplo, sensores amperométricos usam um potencial fixo para medir a corrente gerada pela reação entre o analito e o eletrodo, enquanto sensores potenciométricos medem a diferença de potencial entre os

eletrodos de trabalho e referência. Estes sensores oferecem várias vantagens sobretudo alta sensibilidade, seletividade e precisão. Eles podem detectar uma ampla gama de analitos, incluindo gases, íons e moléculas orgânicas (Grieshaber *et al.* 2008)

Em busca do desenvolvimento de sensores e biossensores com melhor desempenho analítico, pesquisadores têm utilizado diferentes materiais obtidos através de novas tecnologias para a modificação dos tradicionais.Chen e Xinangwei (2023) desenvolverem um eletrodo nanocompósito de TiO2 modificado com óxido de grafeno e pasta de carbono (TiO2-GO/CPE) como um biossensor eletroquímico para a detecção de esteroides anabolizantes na urina ,com a finalidade de identificação de possíveis *"doppings"* por parte dos atletas.

Franzoi *et al*. (2011) empregaram o LI BMI.PF6 com nanopartículas de prata ou ouro na construção de biossensores para luteolina. Nestes biossensores foi utilizada a enzima lacase de *A. oryzae* imobilizada em quitosana reticulada quimicamente com cloreto cianúrico. Estes biossensores demonstraram suficiente sensibilidade para determinação de luteolina em amostras de chá de camomila. Mais uma vez, a inerente condutividade das nanopartículas metálicas dispersas em LI aliadas à enzima lacase imobilizada em quitosana covalentemente reticulada mostraram-se um excelente elemento na composição destes novos biossensores.

Oliveira *et al*. (2015) foram responsáveis por desenvolverem um biossensor eletroquímico baseado na enzima Tir foi aplicado com sucesso para a determinação de Fenol (FEN) em amostras de efluentes. Empregando o método de ligações cruzadas, Tir foi adequadamente imobilizada sobre CV modificado com nanopartículas de ouro e nanotubos de carbono de paredes múltiplas enriquecidos com ftalocianina de cobalto, potencializando a aplicação do dispositivo para análises de compostos fenólicos. Os ensaios de estabilidade indicaram que a resposta do biossensor após 21 dias foi de 97,86% da resposta inicial. Portanto, este dispositivo eletroquímico baseado na enzima Tir apresentou desempenho analítico desejado para determinação de fenol.

De acordo com Kakimova *et al*.(2022) o desenvolvimento de biossensores baseados em aptâmeros (aptasensores) são um tipo de biossensor que traz uma promessa positiva para o mercado. Esses biossensores eletroquímicos de aptâmeros são os mais comumente empregados para detecção de antibióticos devido ao seu baixo custo, mobilidade, alta sensibilidade e simplicidade operacional. Novas abordagens baseadas em nanotecnologia, como o uso de canais iônicos projetados em bicamadas lipídicas, o encapsulamento de enzimas em vesículas, polimerossomas ou cápsulas de polieletrólitos, oferecem possibilidades adicionais para a amplificação do sinal (Grieshaber *et al.* 2008).

3.8 Produção de Biochar a partir de sementes de açaí

3.8.1.Açaí

A espécie *Euterpe oleracea* Mart., popularmente conhecida como açaí, é uma palmeira nativa da região Amazônica. Esta planta pode apresentar até 45 hastes por cacho, distribuídas em diferentes estágios de desenvolvimento. Seu porte atinge alturas de até 30 metros, com diâmetro do estipe variando entre 12 e 18 centímetros. O ciclo reprodutivo tem início entre 5 e 10 anos de idade, e sua vida útil é estimada entre 10 e 25 anos (Leal *et al*.,2025).

A Figura 5 apresenta o açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.), uma palmeira de porte elevado típica das regiões tropicais da Amazônia. A espécie caracteriza-se pela presença de estipes finos agrupados em touceiras, folhas longas e pinadas e cachos de frutos distribuídos em diferentes estágios de desenvolvimento. Sua infrutescência é composta por 3 a 8 hastes, contendo numerosos frutos de formato esférico. Cada fruto é constituído predominantemente por uma semente de coloração marrom-clara, revestida por uma fina camada de polpa arroxeada, parte destinada ao consumo. Além de sua expressiva importância ecológica e econômica, o açaizeiro desempenha papel fundamental na geração de renda para comunidades amazônicas e no abastecimento da cadeia produtiva do açaí (Barros et al., 2021).

Figura 5. Árvore do Açaí popularmente conhecida com Açaizeiro



Fonte : Embrapa (2022)

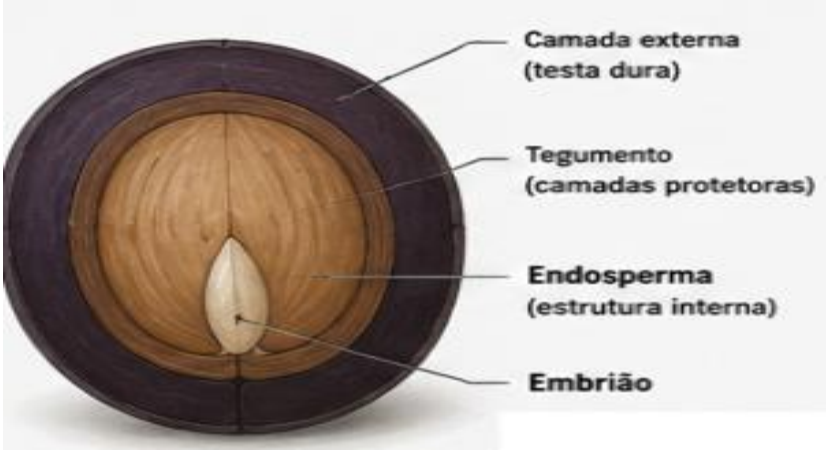
Devido ao seu elevado teor de antocianinas e aos diversos efeitos benéficos à saúde humana, o fruto tem sido classificado como uma “superfruta” na literatura científica e nutricional. A região Norte do Brasil destaca-se como a principal produtora de açaí, com ênfase para os estados do Pará e Amazonas, que juntos são responsáveis por aproximadamente 90% da produção nacional, a qual vem apresentando crescimento contínuo ao longo dos anos (Barros *et al.,*2021).

A composição centesimal do açaí (*Euterpe oleracea Mart*.) apresenta os seguintes teores, expressos em porcentagem em peso: lipídios variando de 1,65% a 3,56%, fibras totais entre 29,69% e 62,75%, hemiceluloses entre 9,01% e 14,19%, celulose entre 39,83% e 40,29%, e lignina na faixa de 4,00% a 8,93%. O teor de cinzas oscila entre 0,15% e 1,68%, enquanto a umidade apresenta variação de 10,15% a 39,39%. O conteúdo proteico situa-se entre 5,02% e 7,85%, o carbono fixo corresponde a aproximadamente 0,83%, e a fração de matéria volátil é estimada em torno de 7,82% (Serrão *et al*.,2021).

Do ponto de vista físico, a polpa e a casca correspondem a aproximadamente 10% da massa total do fruto do açaí, enquanto a semente representa cerca de 90%. Em razão dessa composição, o processamento industrial destinado à obtenção da polpa gera grandes quantidades de resíduos sólidos, sendo estimada a produção de 2 a 4 kg de resíduos para cada quilograma de açaí processado (Leal *et al.,* 2025). Consequentemente, a elevada proporção de sementes resulta em um expressivo volume de resíduos agroindustriais, configurando um desafio ambiental, mas também uma oportunidade para o desenvolvimento de estratégias de valorização e aproveitamento desses materiais (Barros *et al.,* 2021).

A Figura 6 apresenta o corte transversal da semente de açaí, permitindo observar sua organização estrutural interna. Nota-se o predomínio do endosperma, que ocupa grande parte do volume da semente, envolvido por camadas externas protetoras. Essa estrutura confere resistência mecânica ao material e contribui para sua elevada composição lignocelulósica, fator que desperta interesse para aplicações em processos de valorização de resíduos agroindustriais (Aguiar e Mendonça, 2003).

Figura 6. Corte Transversal da Semente do Açaí



Fonte : Gerada por Inteligência Artificial ChatGpt Plus (2026)

3.8.2 Produção do biochar

Diante dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado das sementes do açaí, diversos estudos têm sido conduzidos com o objetivo de identificar aplicações viáveis para esse resíduo, seja por meio de sua inserção em processos industriais ou na obtenção de subprodutos de valor agregado (Barros *et al.*,2021) . A utilização de resíduos como matéria-prima para a obtenção de adsorventes aplicados ao tratamento de poluentes está alinhada aos princípios da Economia Circular Industrial (Industrial Circular Economy – ICE). Tal abordagem visa agregar valor a resíduos sólidos e efluentes provenientes de processos produtivos, os quais, caso contrário, seriam descartados inadequadamente, contribuindo para impactos ambientais negativos e aumento dos custos de disposição final (Lucena *et al*.,2023).

O biochar é um material carbonáceo sólido produzido por pirólise de biomassa vegetal em atmosfera inerte, geralmente entre 300 °C e 800 °C. Durante o processo, formam-se estruturas aromáticas que aumentam a área superficial do material. Suas propriedades físicas dependem da biomassa utilizada, das condições de pirólise e do manuseio pré e pós-processamento. O biochar é caracterizado por alto teor de carbono, estabilidade térmica e química, alcalinidade e estrutura porosa composta por meso e macroporos (Cabrini *et al.*, 2024).

Atualmente o biochar vêm sendo amplamente empregados em diferentes áreas, incluindo a remediação de solos contaminados e o tratamento de águas residuais. Entre suas aplicações mais relevantes, destacam-se o uso como adsorventes no tratamento de efluentes, como suportes em processos catalíticos e como agentes redutores em reações químicas. De acordo com dados da literatura, a demanda global por carvões ativados apresentou um crescimento expressivo nos últimos anos, com um aumento médio anual de 8,1%, atingindo aproximadamente 2,1 milhões de toneladas métricas em 2018. Esse cenário evidencia a crescente importância desses materiais no contexto ambiental e industrial (Lucena *et al.,*2023).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 . Aquisição e tratamento das sementes de açaí

As sementes de *Euterpe oleracea* (Açaí) *in natura* foram adquiridas de fornecedor especializado credenciado pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuárica (EMBRAPA), localizado na cidade de Belém , capital do Estado do Pará, com procedência comprovada, garantindo qualidade genética e sanitária, além de estarem dentro dos parâmetros exigidos pelos órgãos ambientais reguladores, por intermédio de uma plataforma de comércio eletrônico (Mercado Pago). Foram enviadas acondicionadas em sacos plásticos com presença de substrato na embalagem de envio, ao todo foi adquirido 1,5kg desse material. As sementes recebidas se encontravam em estágio de pré-germinação, fase em que apresentam alterações fisiológicas e morfológicas características que indicam o início da ativação metabólica necessária para o crescimento.

A Figura 6 apresenta as etapas do processo de limpeza e remoção dos resíduos aderidos às sementes de açaí após a extração da polpa. Esse procedimento é fundamental para a eliminação de impurezas, matéria orgânica remanescente e fibras superficiais, contribuindo para a padronização do material e sua adequação às etapas subsequentes de processamento. A limpeza adequada das sementes favorece a obtenção de um material com maior qualidade e reprodutibilidade para aplicações biotecnológicas e ambientais. A partir dai, as sementes encontravam-se adequadas para o processo da pirolise.

Figura 7 .Processo de limpeza e remoção dos resíduos das sementes de açaí.



Fonte : Autoria própria (2025)

4.2 Processo de pirólise das sementes de açaí em escala de bancada

O processo de pirólise das sementes de açaí foi conduzido com o objetivo de produzir biochar (carvão vegetal com alto teor de carbono fixo), o qual pode ser empregado em diversas aplicações, como adsorventes, eletrodos modificados ou materiais catalíticos. A pirólise utilizada foi do tipo pirolítica seca, em atmosfera oxidante controlada, utilizando forno mufla em condições laboratoriais.

Inicialmente as sementes de açaí foram higienizadas com a remoção de todos os resíduos que estavam aderidos ao redor. Em seguida, foram secas em estufa de secagem (105 °C por 24 h) para eliminação de umidade residual, o que evita reações indesejadas durante o aquecimento.

As sementes secas foram colocadas em cadinhos de porcelana, preenchidos com uma camada uniforme para garantir o aquecimento homogêneo. Os cadinhos foram introduzidos no forno mufla previamente aquecido. As amostras permaneceram a temperatura constante por um período de 1 a 3 horas. Como o forno mufla comum não possui controle de atmosfera inerte, o processo foi conduzido com a porta selada, limitando a entrada de oxigênio.

Após o tempo de pirólise, os cadinhos de porcelana foram retirados da mufla com auxílio de pinças e colocados dentro de dessecadores, para resfriamento lento e evitar oxidação do material quente em contato com

o ar. O biochar obtido foi triturado em almofariz de porcelana, peneirado (como descrito na padronização granulométrica), e armazenado em frascos de vidro âmbar com tampa rosqueável, em ambiente seco e protegido da luz.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros empregados no processo de pirólise das sementes de açaí para a obtenção do biochar. Entre as condições avaliadas estão temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e atmosfera de reação, fatores que influenciam diretamente as propriedades físico-químicas do material produzido. O controle desses parâmetros é fundamental para garantir a reprodutibilidade do processo e a obtenção de um biochar com características adequadas para aplicações ambientais e eletroquímicas.

Tabela 2. Parâmetros aplicados ao processo de pirólise das sementes de açaí

Parâmetro	**Valor Usual**
Temperatura de pirólise	500–600 °C
Taxa de aquecimento	10 °C/min
Tempo de residência	1–3 horas
Atmosfera	Sem fluxo controlado (quase anaeróbico)

Fonte: Autoria própria (2025)

Esse processo resulta em um material carbonáceo altamente poroso, com estrutura rica em carbono e funcionalizado, ideal para modificações eletroquímicas ou produção de bioadsorventes. Para fins mais avançados, como produção de biochar magnético, o material pode ser tratado posteriormente com soluções de sais metálicos (ex: $FeCl_3$/$FeSO_4$) e submetido a reações de precipitação e ativação térmica.

4.3 Padronização da granulometria

As cinzas resultantes da pirólise das sementes de açaí foram submetidas a um processo de padronização granulométrica com o objetivo de garantir uniformidade de tamanho de partícula para aplicações subsequentes em modificações eletroquímicas e preparação de materiais adsorventes ou condutores. O processo foi realizado em condições controladas, conforme descrito a seguir.

Inicialmente, as cinzas foram coletadas após a conclusão da pirólise em mufla em temperaturas de 450-500 C, durante 2 horas, garantindo a decomposição térmica da biomassa sem combustão, resultando em um biochar com alta pureza e baixo teor volátil. Após resfriamento, o material pirolisado foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas para eliminar qualquer umidade residual que pudesse interferir no peneiramento.

Inicialmente as cinzas foram depositadas em um gral e maceradas com pistilo, para a obtenção de um pó inicial. A padronização da granulometria foi realizada por peneiramento seco utilizando peneira metálica (Tâmis) de 100

mesh, que possui aberturas de 150 µm, conforme apresentado na figura 8. Esse processo visa selecionar apenas partículas com tamanho inferior à malha especificada, descartando aglomerados maiores ou materiais não completamente carbonizados.

Figura 8. Tâmis fabricante Bertel com abertura em 150 µm e mesh de 100



Fonte: Autoria própria (2025)

As partículas retidas foram separadas e armazenadas para descarte ou uso secundário, enquanto a fração que passou pela peneira (≤150 µm) foi coletada como amostra padronizada para uso posterior. Essa uniformidade granulométrica é crucial para garantir homogeneidade na modificação superficial de eletrodos, melhor dispersão em matrizes poliméricas e reprodutibilidade nos experimentos analíticos, como os de voltametria diferencial de pulso (DPV). Por fim, a amostra peneirada foi armazenada em recipiente hermético e dessecado, sob atmosfera seca, a fim de preservar suas características físico-químicas até o momento de sua utilização nos ensaios experimentais.

4.4 Processo de magnetização em soluções de sais metálicos

O processo de magnetização consiste na síntese de nanopartículas magnéticas de óxidos de ferro, predominantemente magnetita (Fe_3O_4), por meio da coprecipitação de sais férrico (Fe^{3+}) e ferroso (Fe^{2+}) em meio alcalino. A seguir, descreve-se o procedimento utilizado:

Foram utilizados dois sais de ferro solúveis em água: cloreto férrico hexahidratado ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) e sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), na proporção molar de 2:1 (Fe^{3+}:Fe^{2+}), correspondente à estequiometria da magnetita (Fe_3O_4). As soluções foram preparadas separadamente e misturadas sob agitação magnética vigorosa.

Para promover a coprecipitação dos íons metálicos como óxidos/hidróxidos, foi adicionado lentamente hidróxido de sódio (NaOH) 2 M até atingir um pH entre 10 e 11. A elevação do pH causa a precipitação dos íons Fe^{2+} e Fe^{3+} na forma de hidróxidos, que se transformam posteriormente em óxidos magnéticos (principalmente Fe_3O_4).

Tipicamente, para evitar a oxidação do Fe^{2+} durante o processo, este tipo de síntese deve ser conduzido sob atmosfera inerte (nitrogênio ou argônio), uma vez que o oxigênio atmosférico pode oxidar o Fe^{2+} a Fe^{3+}, prejudicando a formação da magnetita e favorecendo a formação de outros óxidos como hematita (Fe_2O_3).

No entanto, como não se dispunha de atmosfera inerte, foi adotada uma metodologia alternativa com adição de uma solução de Ácido Ascórbico (vitamina C) 0,2 mol/l à solução reacional. O ácido ascórbico atua como agente redutor, protegendo o Fe^{2+} da oxidação ao reagir preferencialmente com o oxigênio dissolvido. Essa abordagem permite a manutenção da proporção Fe^{2+}/Fe^{3+} adequada para a formação da magnetita, mesmo em condições aeróbicas. A formação da magnetita pode ser representada de forma simplificada pela reação:

$$\mathbf{2Fe^{3+}+Fe^{2+}+8OH^{-}\rightarrow Fe_3O_4(s)+4H_2O_2}$$

Com o ácido ascórbico agindo como redutor auxiliar para manter o Fe^{2+} estável na solução:

$$\mathbf{O_2+C_6H_8O_6\rightarrow C_6H_6O_6+H_2O_2}$$ (Reação Simplificada)

Após o ajuste do pH e adição do ácido ascórbico, a reação foi mantida sob agitação a temperatura controlada (geralmente entre 60–80 °C) por um período de 30–60 minutos. A formação das nanopartículas magnéticas é evidenciada pela mudança de cor da solução (normalmente para preto ou marrom escuro) e pela resposta magnética do precipitado ao se aproximar de um ímã.

4.5 Produção do PGE/BCFE_3O_4

A produção do compósito PGE/BC-Fe_3O_4 foi realizada por meio da incorporação de nanopartículas magnéticas (Fe_3O_4) ao biochar (BC) obtido da pirólise de sementes de açaí, utilizando carboximetilcelulose (CMC) como matriz dispersante e estabilizante. O processo foi conduzido com auxílio de sonicação para garantir homogeneização e formação de um gel funcionalizado.

Uma solução aquosa de **carboximetilcelulose (CMC) a 1–2% (m/v)** foi preparada sob aquecimento (~60 °C) e agitação até completa dissolução. O material magnético seco foi adicionado à solução de CMC na proporção desejada (geralmente 1:10 ou 1:20 massa/volume). A mistura foi submetida a sonicação com **sonicador de ponteira** (ultrassom de alta intensidade), com ciclos de 5 a 15 minutos, em modo pulsado, para garantir boa dispersão e quebra de aglomerados.

Após a etapa da sonicação, observou-se a formação de um gel espesso, homogêneo e estável, indicando a dispersão eficiente do compósito no meio polimérico. Esse gel, rico em grupos funcionais da CMC e com propriedades magnéticas, pode ser diretamente aplicado em eletrodos, filmes ou sistemas de adsorção. Assim, essa

dispersão gelificada fica pronta para ser depositada sobre a superfície de um eletrodo de grafite de ponta (PGE) limpo e seco.

4.6 Adaptação do eletrodo a base de grafite

O processo de adaptação do eletrodo de grafite para a modificação com biochar de semente de açaí envolve, inicialmente, a preparação da superfície condutora, seguida pela aplicação seletiva do material adsorvente. Foi padronizado no processo o uso do Grafite preto Hb 2 mm da marca Cis® , sendo isolado lateralmente com uma fina camada de esmalte, a fim de restringir a área eletroativa à superfície desejada e evitar interferências durante as medições eletroquímicas.

Após a secagem completa do isolante, o biochar produzido é depositado diretamente sobre a extremidade exposta do eletrodo. A modificação pode ser realizada por gota (drop-casting), seguida de secagem à temperatura ambiente ou em estufa, assegurando a adesão adequada do biochar à superfície do eletrodo. Esse procedimento resulta em uma plataforma eletroquímica modificada com propriedades superficiais adequadas à detecção de analitos de interesse em amostras ambientais.

4.7 Preparação do filme molecularmente impresso de polidopamina

Após a modificação do eletrodo de grafite com biochar magnético obtido a partir de sementes de açaí, procedeu-se à preparação do filme molecularmente impresso de polidopamina, denominado MIP-PDA. A metodologia foi adaptada de Seguro, Pacheco e Delerue-Matos (2021), que desenvolveram um sensor eletroquímico molecularmente impresso para diclofenaco por meio da eletropolimerização de dopamina, e de Tlili et al. (2025), que empregaram a polidopamina como material de reconhecimento molecular para a detecção de paracetamol.

A polidopamina foi selecionada devido à capacidade da dopamina de formar filmes aderentes sobre superfícies carbonáceas mediante oxidação eletroquímica. Durante a eletropolimerização, a presença das moléculas-molde permite a formação de interações não covalentes entre os analitos e os grupos funcionais do polímero. Após a remoção dos moldes, são produzidas cavidades de reconhecimento molecular com características químicas e espaciais favoráveis à retenção seletiva dos compostos de interesse.

Para a formação do filme duplamente impresso, foi preparada uma solução contendo cloridrato de dopamina na concentração de 20 mmol L^{-1}, diclofenaco na concentração de 5,0 mmol L^{-1} e paracetamol na concentração de 1,65 mmol L^{-1}, utilizando-se solução de KCl 0,1 mol L^{-1} como eletrólito suporte. A solução foi mantida em repouso durante 10 minutos antes da eletropolimerização, com a finalidade de favorecer as interações entre o monômero funcional e as moléculas-molde.

A eletropolimerização foi realizada por voltametria cíclica, aplicando-se 10 ciclos sucessivos de potencial no intervalo de −0,5 a +1,0 V, com velocidade de varredura de 100 mV s^{-1}. Nessas condições, a oxidação

eletroquímica da dopamina promoveu a formação progressiva do filme de polidopamina sobre a superfície do eletrodo de grafite modificado com biochar magnético. O eletrodo obtido foi denominado PGE/BC-Fe_3O_4/MIP-PDA.

As concentrações das moléculas-molde e os parâmetros de eletropolimerização foram adotados como condições iniciais com base na literatura. Considerando que a impressão simultânea de diclofenaco e paracetamol em um único filme de polidopamina constitui uma adaptação metodológica, esses parâmetros devem ser posteriormente avaliados e otimizados experimentalmente.

4.8 Remoção das moléculas-molde

Após a eletropolimerização, o eletrodo PGE/BC-Fe_3O_4/MIP-PDA foi submetido à remoção das moléculas-molde incorporadas ao filme polimérico. Para essa finalidade, empregou-se uma solução extratora composta por metanol e NaOH 0,1 mol L^{-1} na proporção 1:1 v/v.

O eletrodo foi mantido em contato com a solução extratora durante 2 horas, com renovação da solução a cada 20 minutos. Posteriormente, o dispositivo foi lavado com água ultrapura e seco em temperatura ambiente.

A remoção de DCF e APAP promoveu a formação de cavidades moleculares complementares aos analitos no filme de polidopamina. Essas cavidades constituem os sítios de reconhecimento responsáveis pela retenção preferencial dos fármacos durante os ensaios analíticos.

A eficiência da extração deverá ser confirmada experimentalmente por meio do monitoramento progressivo da resposta eletroquímica ou por análise da solução extratora. A ausência de variação significativa após lavagens sucessivas poderá ser adotada como critério para o encerramento da etapa de remoção.

4.9 Preparação do eletrodo não impresso

Para avaliar a contribuição efetiva da impressão molecular para a seletividade do sensor, foi preparado um eletrodo não impresso, denominado PGE/BC-Fe_3O_4/NIP-PDA.

O eletrodo NIP-PDA foi produzido nas mesmas condições empregadas na fabricação do MIP-PDA, utilizando-se dopamina a 20 mmol L^{-1} em solução de KCl 0,1 mol L^{-1}. A eletropolimerização foi realizada por voltametria cíclica, com 10 ciclos entre −0,5 e +1,0 V e velocidade de varredura de 100 mV s^{-1}. A única diferença consistiu na ausência das moléculas-molde de diclofenaco e paracetamol na solução de polimerização.

Após a formação do filme, o eletrodo NIP-PDA foi submetido às mesmas etapas de lavagem e condicionamento aplicadas ao eletrodo MIP-PDA. A produção desse controle é indispensável para diferenciar o reconhecimento molecular específico das interações inespecíficas relacionadas à adsorção dos fármacos sobre a superfície do material carbonáceo.

4.10 Ensaios de rebinding e avaliação do fator de impressão

Os ensaios de rebinding foram realizados mediante a exposição dos eletrodos MIP-PDA e NIP-PDA às soluções contendo DCF e APAP em concentrações conhecidas. Inicialmente, os eletrodos foram mantidos em contato com as soluções dos analitos durante 30 minutos, tempo adotado com base no procedimento descrito por Seguro, Pacheco e Delerue-Matos (2021).

Após a etapa de interação, os dispositivos foram lavados com água ultrapura para remover as espécies fracamente adsorvidas e submetidos à análise por voltametria diferencial de pulso. As medidas foram realizadas em tampão fosfato salino, PBS 0,1 mol L^{-1}, pH 7,0.

A eficiência da impressão molecular foi avaliada por meio da comparação entre as correntes de pico obtidas com os eletrodos MIP-PDA e NIP-PDA. O fator de impressão foi calculado conforme a Equação 1:

$$\mathbf{FI = \Delta I_p,MIP \,/\, \Delta I_p,NIP}$$

em que **FI** corresponde ao fator de impressão, $\mathbf{\Delta I_p,MIP}$ representa a variação da corrente de pico obtida com o eletrodo molecularmente impresso e $\mathbf{\Delta I_p,NIP}$ representa a variação correspondente registrada com o eletrodo não impresso.

Valores de FI superiores à unidade indicam que o filme molecularmente impresso apresenta maior afinidade pelos analitos quando comparado ao filme não impresso. Entretanto, a confirmação da seletividade requer a realização de ensaios adicionais com espécies interferentes e a avaliação separada das respostas voltamétricas do DCF e do APAP.

4.11 Otimização experimental do filme duplamente impresso

Considerando que a determinação simultânea de DCF e APAP utilizando um filme duplamente impresso de polidopamina sobre eletrodo de grafite modificado com biochar magnético constitui uma adaptação da literatura, foram previstos estudos de otimização dos parâmetros de preparação do sensor.

Os ensaios deverão avaliar a influência da concentração de dopamina, das concentrações relativas das moléculas-molde, do número de ciclos de eletropolimerização, da velocidade de varredura, do tempo de extração e do tempo de rebinding. Recomenda-se investigar concentrações de dopamina de 5, 10 e 20 mmol L^{-1}, bem como diferentes números de ciclos de eletropolimerização, incluindo 10, 20 e 28 ciclos.

A seleção das condições otimizadas deverá considerar simultaneamente a intensidade dos sinais voltamétricos, a separação entre os picos de oxidação de DCF e APAP, o fator de impressão, a repetibilidade, a reprodutibilidade e a resposta obtida na presença de interferentes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A crescente exigência imposta pelas legislações ambientais tem compelido o setor industrial a implementar e otimizar sistemas de tratamento de efluentes aquosos. Contudo, a elevada complexidade e os custos associados a esses processos tornam essencial o desenvolvimento de alternativas tecnológicas que aliem alta eficiência ao baixo custo operacional, promovendo soluções ambientalmente e economicamente sustentáveis (Lima *et al.*,2020)

As técnicas instrumentais convencionais, como a cromatografia líquida (CL), cromatografia gasosa (CG), eletroforese capilar (EC) e os métodos acoplados à espectrometria de massas (CL-EM), estão entre as abordagens mais utilizadas para a identificação e quantificação analitos. Embora apresentem elevada sensibilidade e confiabilidade analítica, essas metodologias frequentemente requerem equipamentos de alto custo, infraestrutura laboratorial especializada, profissionais qualificados e etapas complexas de preparo e processamento das amostras. Em contrapartida, os biossensores têm emergido como alternativas promissoras para a detecção de antibióticos, em virtude de características como rapidez analítica, elevada seletividade, sensibilidade e potencial para aplicações *in situ.* Como consequência, o crescente interesse no desenvolvimento de biossensores e de novas estratégias de transdução de sinais tem impulsionado avanços significativos na área do monitoramento de contaminantes em matrizes ambientais e biológicas (Kakimova *et al.*,2022).

Os resultados apresentados neste tópico foram organizados como seção-modelo para a determinação simultânea de paracetamol (APAP) e diclofenaco (DCF) por voltametria diferencial de pulso (DPV), utilizando como plataforma o eletrodo de grafite modificado com biochar magnético de semente de açaí e filme molecularmente impresso de polidopamina.

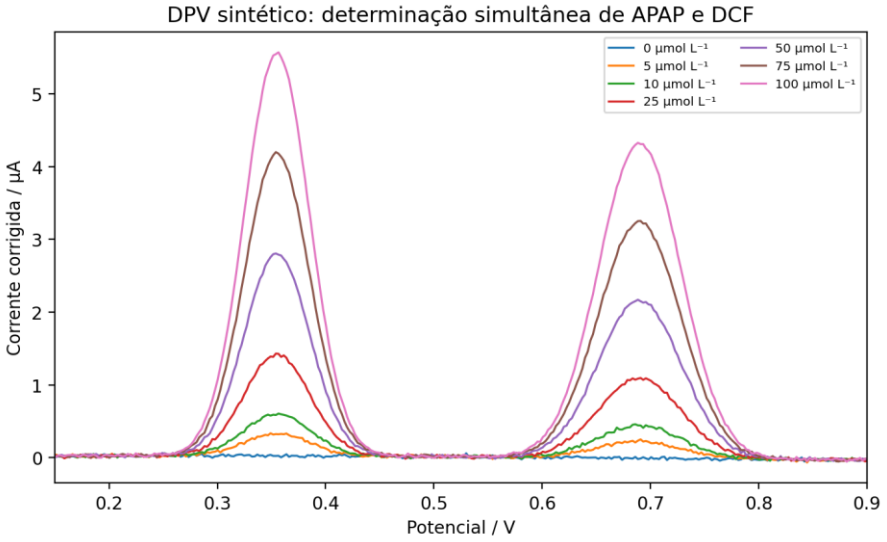
A proposta analítica se fundamenta no aumento da área eletroativa e da capacidade de transferência eletrônica promovidos pela fase carbonácea do biochar, bem como na contribuição seletiva do filme molecularmente impresso de polidopamina. Nessa configuração, espera-se que o biochar magnético forneça sítios condutores e adsorptivos adicionais, enquanto a camada de polidopamina impressa atue como fase de reconhecimento, favorecendo a pré-concentração dos analitos e reduzindo a interferência de espécies coexistentes em matrizes aquosas.

Na determinação simultânea, a separação entre os sinais anódicos é condição essencial para a quantificação independente dos analitos. Na simulação construída, o APAP apresentou pico de oxidação em aproximadamente 0,355 V, enquanto o DCF apresentou pico em aproximadamente 0,690 V, resultando em separação de cerca de 0,335 V entre os máximos de corrente. Essa separação é compatível com a proposta de quantificação simultânea por DPV, pois permite a integração individual das correntes de pico e reduz a sobreposição dos sinais voltamétricos.

A Figura 9 apresenta os voltamogramas de pulso diferencial obtidos para a determinação simultânea de paracetamol (APAP) e diclofenaco (DCF) utilizando um eletrodo de grafite modificado com biochar magnético de

semente de açaí e filme molecularmente impresso de polidopamina. Os registros foram obtidos em concentrações crescentes dos analitos (0, 5, 10, 25, 50, 75 e 100 µmol L^{-1}), evidenciando o aumento progressivo da intensidade dos sinais de oxidação em função da concentração. A separação dos picos voltamétricos associados ao APAP e ao DCF demonstra a capacidade do sensor em detectar simultaneamente ambos os compostos, indicando boa sensibilidade analítica e potencial aplicação no monitoramento de contaminantes farmacêuticos em amostras ambientais.

Figura 9. Voltamogramas de pulso diferencial para determinação simultânea de paracetamol (APAP) e diclofenaco (DCF), usando eletrodo de grafite modificado com biochar magnético de semente de açaí e filme molecularmente impresso de polidopamina. Concentrações: 0, 5, 10, 25, 50, 75 e 100 µmol L^{-1}.

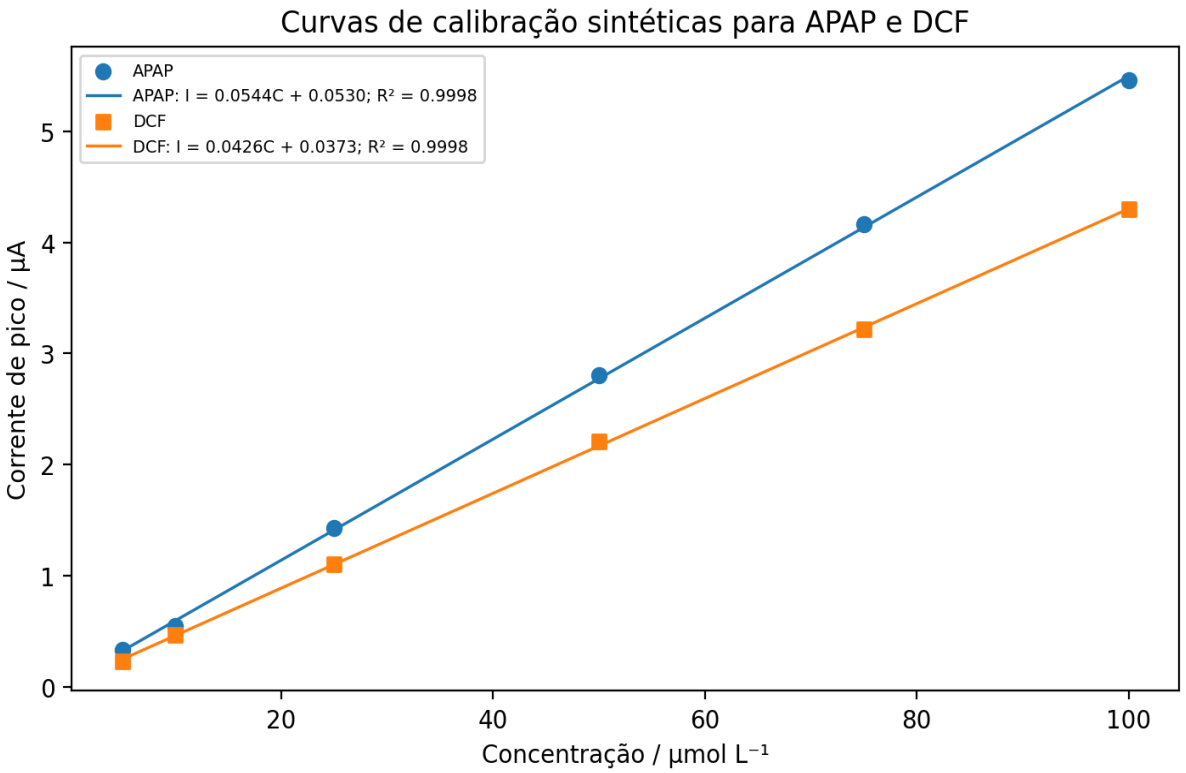


Fonte : Autoria (2026)

Observa-se, na Figura 9 , aumento progressivo das correntes de pico com o incremento da concentração dos analitos, mantendo-se praticamente constantes os potenciais de pico. Esse comportamento é característico de uma resposta analítica controlada por concentração, indicando que, no intervalo avaliado, o incremento de corrente pode ser utilizado como variável quantitativa para a construção das curvas de calibração.

A Figura 10 apresenta as curvas de calibração obtidas para paracetamol (APAP) e diclofenaco (DCF) a partir das correntes de pico registradas nos voltamogramas de pulso diferencial (DPV). Observa-se uma relação entre a resposta eletroquímica e a concentração dos analitos, evidenciando o comportamento analítico do sensor desenvolvido. As curvas de calibração permitem avaliar parâmetros como sensibilidade, faixa linear de trabalho e desempenho analítico do método para a determinação simultânea desses fármacos.

Figura 10. Curvas de calibração para APAP e DCF obtidas a partir das correntes de pico dos voltamogramas de DPV.



Fonte: Autoria (2026)

As curvas analíticas apresentadas na Figura 10 foram ajustadas por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. Para o APAP, obteve-se a equação Ipa = 0.0544 C + 0.0530, com R^2 = 0.9998. Para o DCF, a equação obtida foi Ipa = 0.0426 C + 0.0373, com R^2 = 0.9998, em que Ipa representa a corrente de pico em µA e C a concentração em µmol L^{-1}. Os coeficientes de determinação próximos da unidade indicam linearidade adequada no intervalo de 5 a 100 µmol L^{-1}.

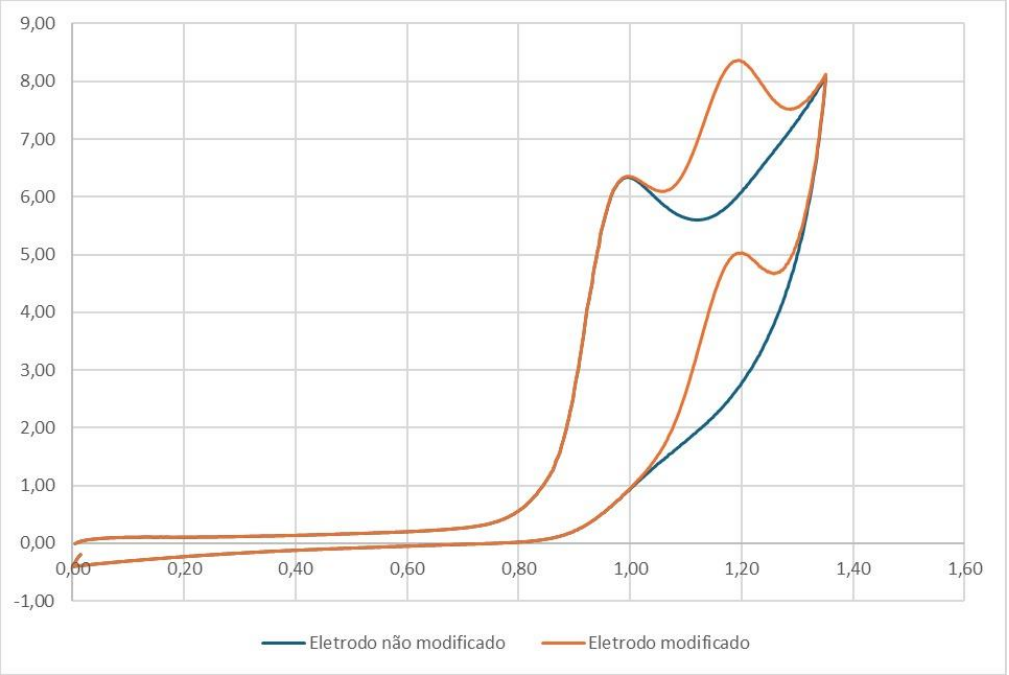
Além do pico de oxidação, o diclofenaco apresentou uma resposta eletroquímica no sentido inverso da varredura, evidenciada por um pico de redução observado em aproximadamente +1,18 a +1,20 V. A presença desse sinal catódico sugere que o processo eletroquímico do diclofenaco pode apresentar certo grau de reversibilidade, ou comportamento quase reversível, nas condições experimentais avaliadas. Contudo, a confirmação dessa característica requer uma análise mais detalhada dos parâmetros eletroquímicos, incluindo a separação entre os potenciais de pico anódico e catódico (ΔEp), a razão entre as correntes de pico (Ipa/Ipc) e a influência da velocidade de varredura sobre a resposta voltamétrica.

Em comparação, o eletrodo não modificado apresentou menor definição dos processos redox e menores intensidades de corrente, evidenciando uma cinética de transferência eletrônica menos favorável. Por outro lado, a modificação da superfície eletródica promoveu um aumento significativo da resposta voltamétrica, resultando em sinais mais intensos e melhor resolução dos processos eletroquímicos. Esses resultados indicam que a modificação proposta favorece a transferência de carga na interface eletrodo/solução, contribuindo para o aprimoramento da

sensibilidade analítica e demonstrando potencial para aplicações na determinação simultânea de paracetamol e diclofenaco a em meio tamponado a pH 7,0.

A Figura 11 apresenta os voltamogramas obtidos para o paracetamol (APAP) e o diclofenaco (DCF). A curva em azul corresponde à resposta eletroquímica do eletrodo não modificado, enquanto a curva em vermelho representa a resposta do eletrodo que foi modificado. Observa-se que os analitos apresentam comportamentos eletroquímicos distintos, com potenciais de oxidação característicos que permitem sua diferenciação e determinação simultânea.

Figura 11 Voltamogramas cíclicos obtidos para o processo de oxidação do paracetamol (APAP) e diclofenaco (DCF) utilizando eletrodo não modificado e eletrodo modificado em pH 7,0.



Fonte: Autoria (2026)

O paracetamol apresenta um pico de oxidação em potenciais menos positivos, enquanto o diclofenaco exibe processo oxidativo em potencial mais elevado, evidenciando a separação entre os sinais eletroquímicos. Essa diferença de potencial é fundamental para a seletividade do método, pois possibilita a identificação individual de cada composto mesmo quando presentes simultaneamente na solução analisada.

5.1 Parâmetros analíticos: sensibilidade, LD e LQ

O limite de detecção (LD) é definido como a menor concentração do analito que pode ser distinguida do sinal de fundo do método analítico, permitindo sua detecção, mas não sua quantificação confiável. Em contrapartida, o limite de quantificação (LQ) corresponde à menor concentração do analito que pode ser determinada quantitativamente com precisão e exatidão adequadas, considerando as condições experimentais empregadas (Monteiro, Santos e Sussuchi, 2020).

Os limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) foram calculados a partir das relações LD = 3σ/m e LQ = 10σ/m, em que σ corresponde ao desvio-padrão do sinal do branco e m à inclinação da curva analítica. Esse critério é empregado em métodos voltamétricos para estimar a menor concentração detectável e a menor concentração quantificável com confiabilidade analítica.

A Tabela 3 reúne os principais parâmetros analíticos referentes à determinação simultânea de APAP e DCF por DPV. Os resultados incluem os potenciais de oxidação característicos de cada composto e a faixa linear de resposta obtida para o método desenvolvido. A análise desses parâmetros permite avaliar a qualidade analítica do sensor eletroquímico, fornecendo informações importantes sobre sua capacidade de detecção e quantificação dos analitos de interesse.

Tabela 3. Parâmetros analíticos para a determinação simultânea de APAP e DCF por DPV. Potenciais de pico adotados: APAP = 0,355 V; DCF = 0,690 V; faixa linear = 5–100 μmol L^{-1}.

Analito	Equação analítica	R^2	LD (μmol L^{-1})	LQ (μmol L^{-1})
APAP	Ipa = 0.0544C + 0.0530	0.9998	1.04	3.46
DCF	Ipa = 0.0426C + 0.0373	0.9998	1.83	6.11

Fonte: Autoria (2026)

Com base nos parâmetros, o APAP apresentou LD de 1.04 μmol L^{-1} e LQ de 3.46 μmol L^{-1}. Para o DCF, foram estimados LD de 1.83 μmol L^{-1} e LQ de 6.11 μmol L^{-1}. A maior sensibilidade observada para o APAP decorre da maior inclinação da curva analítica, enquanto o DCF apresentou limite de detecção superior em razão da menor inclinação e do maior desvio-padrão do branco.

Do ponto de vista analítico, os resultados simulados indicam que o eletrodo proposto pode ser apresentado como uma plataforma promissora para triagem voltamétrica de fármacos em águas superficiais, desde que os valores sejam confirmados experimentalmente. Para validação real do método, recomenda-se realizar: estudo de repetibilidade intraeletrodo; reprodutibilidade entre eletrodos; estabilidade de armazenamento; avaliação de interferentes como cafeína, ácido ascórbico, ibuprofeno, naproxeno, íons inorgânicos e matéria orgânica dissolvida;

ensaios de recuperação em amostras reais; e comparação com método cromatográfico de referência, como HPLC-DAD ou LC-MS/MS.

A presença do filme molecularmente impresso de polidopamina deve ser comprovada por comparação direta entre eletrodos impressos (MIP) e não impressos (NIP). O ganho de seletividade só poderá ser atribuído ao reconhecimento molecular se o eletrodo MIP apresentar maior razão sinal/interferente e melhor recuperação dos analitos quando comparado ao NIP, mantendo resposta linear e baixa variação relativa entre medidas independentes.

5.2 Comparação com outros métodos de obtenção de sensores eletroquímicos

A comparação de métodos analíticos é uma etapa importante na validação de novas metodologias, permitindo avaliar parâmetros de desempenho, como sensibilidade, seletividade, precisão, exatidão e limites analíticos, bem como verificar sua aplicabilidade em relação às técnicas já consolidadas na literatura. Embora técnicas como a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) e a espectrofotometria UV apresentem elevada confiabilidade analítica, sua aplicação frequentemente requer etapas de preparo de amostra mais elaboradas e maior tempo de execução. Nesse cenário, os métodos eletroanalíticos e os biossensores destacam-se como alternativas atrativas, devido à sua alta sensibilidade, baixo custo, rapidez analítica e possibilidade de miniaturização para aplicações em monitoramento ambiental e controle de qualidade farmacêutico (Gil e Melo , 2010).

Vieira, Lupetti e Fatibello- Fillho (2003) foram responsáveis pelo desenvolvimento de um eletrodo de pasta de carbono modificado com extrato bruto de abobrinha (*Cucurbita pepo*), fonte da enzima peroxidase (POD: EC 1.11.1.7) e determinou-se o paracetamol em produtos farmacêuticos. Neste trabalho, as medidas ciclovoltamétricas usando o eletrodo de pasta de carbono foram feitas no potencial de + 0,5 a - 0,5 V com uma velocidade de varredura de 100 mV/s, A curva analítica (Ipc=3,115 + 15086 [paracetamol], r=0,9965) foi construída a partir das correntes de pico catódicas (Ipc), medidas no potencial de -0,10 V, em função da concentração de paracetamol. Obteve-se uma relação linear entre as correntes de pico catódicas (μA) e as concentrações de paracetamol no intervalo de $1{,}2x10^{-4}$ a $2{,}5x\ 10^{-3}$ mol L^{-1} e um limite de detecção (LD) de $6{,}9x10^{-5}$ mol $L^{-1.}$

Messina, De-Vito e Raba (2006) desenvolveram biossensores baseados na enzima peroxidase de raiz-forte (HRP) para a detecção de paracetamol (APAP) em sistemas miniaturizados voltados ao monitoramento em tempo real. Os dispositivos propostos permitiram a determinação do fármaco em formulações farmacêuticas, apresentando faixa linear de resposta entre 0,35 e 100×10^{-6} mol L^{-1}. Além disso, os biossensores demonstraram elevada precisão e exatidão analítica, alcançando LD de $0{,}3 \times 10^{-}6$ mol L^{-1}, evidenciando seu potencial para aplicações analíticas no monitoramento de compostos farmacêutico.

É importante ressaltar que a obtenção da peroxidase de raiz-forte (HRP) representa um fator limitante em diversas aplicações laboratoriais, diagnósticas e biotecnológicas, devido ao seu elevado custo de aquisição. Por se tratar de uma proteína biologicamente ativa e altamente purificada, extraída da raiz da espécie *Armoracia rusticana*,

seu valor comercial varia de acordo com o grau de pureza, atividade enzimática e finalidade de aplicação. Dessa forma, o emprego da HRP em pesquisas e no desenvolvimento de biossensores pode impactar significativamente os custos experimentais, especialmente em estudos que demandam grandes quantidades da enzima ou protocolos de imobilização enzimática (Queiroz *et al*.,2018).

Perone *et al*. (2007) desenvolveram um método analítico amperométrico utilizando um biossensor de Polifenol oxidase , obtida a partir de extrato bruto de Banana Nanica (*Musa acuminata*) para a determinação de paracetamol em medicamentos, visando o controle de qualidade de formulações existentes no mercado. O procedimento espectrofotométrico oficial, proposto pela Farmacopéia Americana , foi utilizado para a determinação dos teores de paracetamol nas amostras comerciais estudadas (USP, 1995).

Oliveira *et al.* (2015) desenvolveram um biossensor eletroquímico baseado na enzima tirosinase (Tir), aplicado com sucesso na determinação de fenol (FEN) em amostras de efluentes. A enzima foi imobilizada por meio da técnica de ligações cruzadas sobre um eletrodo de carbono vítreo (CV) modificado com nanopartículas de ouro e nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados com ftalocianina de cobalto, o que contribuiu para o aumento da sensibilidade e do desempenho analítico do dispositivo. As melhores condições experimentais foram obtidas utilizando 60 U mL^{-1} de enzima, tempo de incubação de 3 minutos, tampão fosfato 0,1 mol L^{-1} em pH 7,0 e parâmetros otimizados de voltametria de onda quadrada (VOQ) (f = 10 s^{-1}, a = 30 mV e ΔEs = 1 mV). Nessas condições, os limites de detecção (LD) e de quantificação (LQ) foram estimados em $4{,}81 \times 10^{-6}$ mol L^{-1} (0,45 mg L^{-1}) e $1{,}60 \times 10^{-5}$ mol L^{-1} (1,50 mg L^{-1}), respectivamente, atendendo aos requisitos estabelecidos pela legislação vigente. Além disso, a aplicação do biossensor em amostras reais de efluentes apresentou percentuais de recuperação entre 86,40% e 105,04%, demonstrando a eficiência, a confiabilidade e o potencial do procedimento eletroanalítico desenvolvido para o monitoramento de compostos fenólicos em matrizes ambientais.

Chen e Xiangwei (2023) desenvolveram nanocompósitos híbridos de óxido de grafeno e dióxido de titânio (GO-TiO_2) aplicados à modificação de eletrodos de carbono vítreo (GCE) para a construção de um biossensor destinado à detecção de nandrolona (ND), um esteroide anabolizante, em amostras biológicas de sangue e urina. As análises cristalográficas e morfológicas evidenciaram a formação de uma estrutura altamente cristalina, com superfície rugosa e porosa, elevada área superficial efetiva e múltiplos sítios ativos, características que favorecem o desempenho eletroquímico do dispositivo.

O biossensor GO-TiO_2/GCE apresentou elevada estabilidade, precisão e sensibilidade para a determinação de ND, demonstrando desempenho superior ao de sensores previamente descritos na literatura. Esse comportamento foi atribuído à elevada condutividade elétrica do óxido de grafeno associada à excelente atividade catalítica das nanopartículas de TiO_2 presentes no nanocompósito. O dispositivo apresentou faixa linear de 1 a 60 μmol L^{-1}, sensibilidade de 0,3547 μA μmol^{-1} L e limite de detecção (LD) de 3 nmol L^{-1}. Além disso, sua aplicação foi validada em amostras reais de soro e urina de atletas jovens, demonstrando potencial para utilização em análises clínicas e no monitoramento antidoping.

A Tabela 4 apresenta um resumo comparativo de estudos que empregaram diferentes enzimas, biomateriais e plataformas eletroquímicas para a determinação de compostos de interesse analítico. São descritas as características dos sistemas desenvolvidos, incluindo o analito investigado, a técnica eletroanalítica utilizada, a faixa linear de resposta e os limites de detecção (LD) reportados. A comparação entre os trabalhos evidencia a versatilidade dos biossensores e sensores eletroquímicos na detecção de fármacos e contaminantes ambientais, além de destacar a influência do material biológico empregado sobre o desempenho analítico dos dispositivos. Essas informações permitem contextualizar o desenvolvimento da presente pesquisa e avaliar o potencial das estratégias baseadas em materiais de origem natural para aplicações em monitoramento ambiental e análises farmacêuticas.

Tabela 4 . Comparação entre diferentes plataformas eletroquímicas empregadas na determinação de analitos de interesse farmacêutico e ambiental .

Estudo (Ano)	**Enzima/ Biomaterial**	**Amostra/ Analito**	**Técnica / Eletrodo**	**Faixa Linear**	**Limite de Detecção (LD)**
Vieira, Lupetti e Fatibello-Fillho (2003)	Peroxidade de casca de Abobrinha (*Cucurbita pepo)*	Paracetamol (Fármaco-Produto Acabado)	Eletrodo modificado de pasta de carbono (CV)	$1,2x10^{-4}$ a $2,5x\ 10^{-3}$ mol L^{-1}	$6,9x10^{-5}$ mol $L^{-1.}$
Messina, De-Vito e Raba (2006)	Peroxidade de Raiz Forte (HPR)	Paracetamol (Fármaco-Produto Acabado)	Biossensor Amperometrico	0,35 e 100 × 10^{-6} mol L^{-1}.	$0,3x10^{-4}$ mol $L^{-1.}$
Perone *et al*. (2007)	Polifenol oxidase do extrato bruto da Banana Nanica (*Musa acuminata*	Paracetamol (Fármaco-Produto Acabado)	Biossensor Amperometrico	Não informado	Não informado
Oliveira *et al.* (2015)	Tirosinase (Tir)	Fenol (Efluentes)	Eletrodo de Carbobo Vitreo	Não informado	$4,81x10^{-6}$ mol L^{-1}
Chen e Xiangwei (2023)	Nanocomposito ($GO\text{-}TiO_2$)	Nandrolona (Sangue e Urina)	GCE/ Voltametria	1 a 60 µmol L^{-1}	3 nmol L^{-1}.

Sob a perspectiva analítica, o aspecto mais relevante não se restringe aos valores individuais de cada parâmetro, mas à consistência e à concordância entre os resultados obtidos. Os parâmetros avaliados, incluindo linearidade, sensibilidade, ensaios de adição e recuperação, apresentaram comportamento convergente, indicando que a plataforma proposta responde de forma adequada ao aumento da concentração dos analitos e apresenta potencial para sua determinação simultânea. A obtenção futura dos parâmetros experimentais de limite de detecção (LD), limite de quantificação (LQ), repetibilidade, precisão intermediária e exatidão permitirá complementar o

processo de validação analítica, possibilitando uma comparação mais robusta com métodos consolidados descritos na literatura.

A análise comparativa dos métodos descritos na literatura demonstra que os sensores e biossensores eletroquímicos constituem alternativas promissoras às técnicas analíticas convencionais, combinando sensibilidade, seletividade e rapidez de resposta com menor complexidade operacional. Adicionalmente, a utilização de materiais obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos e agroindustriais contribui para a otimização dos custos de produção e para o desenvolvimento de plataformas analíticas ambientalmente sustentáveis.

Considerando a ampla biodiversidade brasileira e a elevada disponibilidade de biomassa residual oriunda de cadeias produtivas agrícolas e extrativistas, o aproveitamento desses materiais para a obtenção de biochar, adsorventes e modificadores de eletrodos representa uma estratégia de elevado potencial tecnológico e ambiental. Dessa forma, além de promover a agregação de valor a resíduos que seriam descartados, essa abordagem fortalece os princípios da economia circular, da inovação sustentável e do uso racional dos recursos naturais, ampliando as perspectivas para o desenvolvimento de sensores de baixo custo voltados ao monitoramento de contaminantes emergentes em matrizes ambientais.

6. Considerações finais

A presença de resíduos farmacêuticos em ambientes aquáticos representa um desafio relevante para a proteção dos recursos hídricos, especialmente diante do elevado consumo de medicamentos, do descarte inadequado e das limitações dos processos convencionais de tratamento de efluentes. Nesse contexto, o desenvolvimento de estratégias analíticas de baixo custo, sensíveis e potencialmente seletivas pode contribuir para o monitoramento de contaminantes emergentes em matrizes ambientais.

O presente trabalho propôs a utilização de um eletrodo de grafite modificado com biochar magnético obtido a partir de sementes de açaí e associado a um filme molecularmente impresso de Polidopamina como plataforma para a determinação simultânea de diclofenaco (DCF) e paracetamol (APAP) por voltametria diferencial de pulso. A proposta integra o aproveitamento de um resíduo agroindustrial abundante, a produção de um material carbonáceo funcionalizado e o desenvolvimento de uma arquitetura eletroquímica voltada à detecção de fármacos em águas superficiais.

O modelo elaborado para a avaliação preliminar da resposta voltamétrica apresentou sinais de oxidação separados para APAP e DCF, com potenciais de pico estimados em aproximadamente 0,355 V e 0,690 V, respectivamente. A separação de cerca de 0,335 V entre os máximos de corrente indica, em termos preliminares, a possibilidade de discriminação dos analitos em uma determinação simultânea por DPV. As curvas analíticas apresentaram comportamento linear no intervalo de 5 a 100 μmol L^{-1}, com coeficientes de determinação de 0,9998 para ambos os compostos.

Com base nos parâmetros empregados na simulação, foram estimados limites de detecção de 1,04 μmol L^{-1} para o APAP e 1,83 μmol L^{-1} para o DCF. Os limites de quantificação estimados foram de 3,46 μmol L^{-1} e 6,11 μmol L^{-1}, respectivamente. Esses valores devem ser interpretados como referências preliminares para o planejamento experimental, não constituindo parâmetros validados do método analítico.

A confirmação do desempenho do sensor requer a realização de estudos experimentais complementares, incluindo a caracterização físico-química e magnética do biochar modificado, a comprovação da formação da magnetita, a descrição detalhada da produção do filme de polidopamina, a comparação entre eletrodos molecularmente impressos e não impressos, a avaliação de interferentes, os ensaios de repetibilidade e reprodutibilidade, os testes de estabilidade e os estudos de recuperação em amostras reais de águas superficiais. A comparação com uma técnica analítica de referência também será necessária para demonstrar a exatidão do método.

Sob a perspectiva ambiental, a proposta contribui para a valorização de resíduos lignocelulósicos e dialoga com os princípios da economia circular. A utilização de sementes de açaí como matéria-prima para a obtenção de materiais funcionais pode favorecer o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e de menor custo para aplicações ambientais. A pesquisa também se relaciona aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, especialmente ao ODS 6, referente à água potável e ao saneamento; ao ODS 12, relacionado ao consumo e à produção responsáveis; e ao ODS 14, voltado à conservação da vida na água.

Conclui-se que a arquitetura proposta apresenta potencial para o desenvolvimento de um sensor eletroquímico destinado ao monitoramento simultâneo de diclofenaco e paracetamol. Entretanto, a comprovação de sua seletividade, sensibilidade e aplicabilidade em condições reais depende da execução e da validação dos ensaios experimentais previstos. Os resultados preliminares obtidos por simulação devem, portanto, orientar as próximas etapas do estudo e subsidiar o aperfeiçoamento da plataforma analítica.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M.O; MENDONÇA, M.S. Morfo-anatomia da semente de *Euterpe precatoria Mart*. Revista Brasileira de Sementes, Londrina, v. 25, n. 1, p. 37-42, 2003.

ALENCAR, T.O.S *et al*. Descarte de medicamentos: uma análise da prática no Programa Saúde da Família. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 19, n. 7, p. 2157-2166, jul. 2014. DOI: 10.1590/1413-81232014197.09142013.

ARECHE, F. O. et al. A comprehensive review on monitoring and purification of water through tunable 2D nanomaterials. *Brazilian Journal of Biology*, São Carlos, v. 83, e273843, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/1519-6984.273843

BARROS, S. F. et al. Waste açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) seeds as a new alternative source of cellulose: extraction and characterization. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, e31110716661, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16661

CABRINI, M. P.; et al. Biochar from orange waste as a filter medium for domestic effluent treatment aimed at agricultural reuse. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, v. 20, e3024, 2025. DOI: 10.4136/ambi-agua.3024.
CHEN, Changxiang; CHEN, Xiangwei. Electrochemical sensor for anti-doping in athletes. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, São Paulo, v. 29, e2022_0392, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202329012022_0392

CLIMENT, V.; FELIU, J. M. Cyclic voltammetry. In: *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.10764-4

CONSTANTINO, V. M.; et al. Storage and disposal of pharmaceuticals at home: a systematic review. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 585-594, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-81232020252.10882018

DOS SANTOS, S. C. et al. Desenvolvimento de metodologia eletroanalítica para a determinação do pesticida glifosato em amostras ambientais. *Revista Virtual de Química*, v. 6, n. 4, p. 866-883, 2014. DOI: https://doi.org/10.5935/1984-6835.2014005

FRANZOI, A. C. et al. *Incorporação de líquidos iônicos e nanopartículas metálicas na construção de sensores eletroquímicos*. Química Nova, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 1042-1050, 2011

GAMA, A. S. M.; SECOLI, S. R. Automedicação em estudantes de enfermagem do Estado do Amazonas – Brasil. *Revista Gaúcha de Enfermagem*, Porto Alegre, v. 38, n. 1, e65111, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1983-1447.2017.01.65111

GIL, E. S.; MELO, G. R. de. Electrochemical biosensors in pharmaceutical analysis. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, São Paulo, v. 46, n. 3, p. 375–391, jul./set. 2010.
GRIESHABER, D. et al. Electrochemical biosensors – sensor principles and architectures. *Sensors*, Basel, v. 8, n. 3, p. 1400-1458, 2008. DOI: https://doi.org/10.3390/s8031400

KAKIMOVA, Z. et al. Study on the detection of antibiotics in food based on enzyme-free labelless aptamer sensor. *Food Science and Technology*, Campinas, v. 42, e70421, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/fst.70421

LEAL, J. E. C.; et al. Thinking about alternatives to açaí waste in Amazonia communities. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 36, n. 1, e-20240098, 2025. DOI: https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20240098

LEITE, B. O.; RÊGO, M. A. S.; ALMEIDA, P. R. O. de; MEDEIROS, D. S. Uso de medicamentos entre adolescentes rurais quilombolas e não quilombolas no interior da Bahia, Brasil. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, p. 1073-1086, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-81232022273.02942020

LIMA, S. R. L. B. et al. Logística reversa de medicamentos no Brasil: uma análise socioambiental. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 37, n. 109, p. 159-178, 2023. DOI: 10.1590/s0103-4014.2023.37109.011.

LIPORAGE, A. N. et al. Manejo e descarte dos medicamentos antineoplásicos orais e seus impactos ambientais: revisão de escopo. *Revista Pró-UniverSUS*, v. 15, n. 1, p. 96-106, jan./abr. 2024. DOI: https://doi.org/10.21727/rpu.15i1.4205

LUCENA, W. M; et al. Estudo do processo de produção de biochar via pirólise da semente de açaí visando à remediação do solo. *Revista DAE*, São Paulo, v. 72, n. 245, p. 1-17, 2024. DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2024.042

MARIA, R. B.; ANDRADE, L. G. de. Atuação do farmacêutico na orientação de descarte de medicamentos e seus impactos socioambientais. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação – REASE*, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 307-315, abr. 2022. DOI: https://doi.org/10.51891/rease.v8i4.5055.

MARQUEZOTI, Nerly; BITENCOURT, Rafael Mariano de. Descarte de medicamentos, responsabilidade de todos. *Unoesc & Ciência – ACBS*, Joaçaba, v. 7, n. 1, p. 47-54, jan./jun. 2016.

MELO, J. R. R.; et al.. Automedicação e uso indiscriminado de medicamentos durante a pandemia da COVID-19. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 37, n. 4, e00053221, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-311X00053221

MESSINA, G.A.; DE VITO, I.E.; RABA, J. On-line microfluidic sensor integrated with an enzyme-modified pre-cell for the monitoring of paracetamol in pharmaceutical samples. Anal. Chim. Acta, v.559, n.2, p.152-158, 2006.

MOLENTO, M. B. Ivermectina e saúde única: reposicionamento e a preocupação com o meio ambiente. *Revista de Educação Continuada em Medicina Veterinária e Zootecnia do CRMV-SP*, São Paulo, v. 19, n. 1, e38175, 2021. DOI: https://doi.org/10.36440/recmvz.v19i1.38175

MONTEIRO, M. D. S.; SANTOS JÚNIOR, J. C.; SUSSUCHI, E. M. Eletroquímica: Eletrodos Modificados e suas Potencialidades. *Revista Virtual de Química*, v. 12, n. 5, p. 1145-1160, 2020.

MOREIRA, M. R. et al. O Brasil rumo a 2030? Percepções de especialistas brasileiros(as) em saúde sobre o potencial de o País cumprir os ODS. *Saúde em Debate*, Rio de Janeiro, v. 43, n. especial 7, p. 22-35, dez. 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-11042019S702

MORRETTO, A. C.; et al. Descarte de medicamentos: como a falta de conhecimento da população pode afetar o meio ambiente. *Brazilian Journal of Natural Sciences*, v. 3, n. 3, nov. 2020.

NETTO, A. M.; et al. Optimization of biochar synthesis from cosmetic industry sludge for enhanced removal of enrofloxacin. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 36, n. 10, e-20250097, 2025. DOI: 10.21577/0103-5053.20250097.

NOBRE, J. R. C. et al. Potential of agro-industrial residues from the Amazon region to produce activated carbon. *Heliyon*, v. 9, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17189

OLIVEIRA, D. P. C.; et al. Biossensor eletroquímico baseado na enzima tirosinase para a determinação de fenol em efluentes. *Química Nova*, São Paulo, v. 38, n. 7, p. 924-931, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20150086

OLIVEIRA, M. A. et al.. Biochar derived from sugarcane bagasse for adsorption of anionic and cationic dyes. *Materials Research*, v. 28, supl. 1, e20250179, 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0179

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agend

ORTÚZAR, M. et al. Pharmaceutical pollution in aquatic environments: a concise review of environmental impacts and technologies for mitigation. *Toxics*, v. 10, n. 5, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics10050222

PACHECO, W. F. et al. Voltametrias: uma breve revisão sobre os conceitos. *Revista Virtual de Química*, Rio de Janeiro, v. 5, n. 4, p. 516-537, 2013. DOI: https://doi.org/10.5935/1984-6835.20130040

PEDROSO, C. R. et al. Inativação de microrganismos indicadores de contaminação fecal por radiação ultravioleta e avaliação dos fenômenos de fotorreativação e recuperação no escuro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 5, p. 987-994, set./out. 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522018164557

PEREIRA, M. B. L; et al.(2018). Medicamentos: descarte de vencidos e utilização de sobras. *Saúde (Santa Maria)*, *3*(44). https://doi.org/10.5902/2236583425355

PERONE, C.A.S; QUEIROZ, A.S; DALOSSO, V.M . Determinação de paracetamol (acetaminofenol) em produtos farmacêuticos usando um biossensor de polifenol oxidase, obtida de extrato bruto de banana nanica (Musa acuminata). Revista do Instituto de Ciências da Saúde, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 133-139, 2007.

PORTELLA, A. A. et al. Tributação ecológica municipal: análise dos incentivos fiscais do imposto sobre serviços (ISS) nos municípios brasileiros. *Veredas do Direito*, Belo Horizonte, v. 21, e212589, 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.18623/rvd.v21.2589

QUEIROZ, M.L.B; et al. Imobilização de peroxidase de raiz forte em bagaço de cana-de-açúcar. Química Nova, São Paulo, v. 41, n. 9, p. 1019-1024, 2018. DOI: 10.21577/0100-4042.20170279.

RAMOS, E. M. B. et al. Agenda 2030 da ONU e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. In: *Direitos sociais e políticas públicas I*. 2024. Disponível em: https://site.conpedi.org.br/publicacoes/v38r977z/bhlmgf00/h9funxieBsfMZg9w.pd

RAMOS, et al. Descarte de medicamentos: uma reflexão sobre os possíveis riscos sanitários e ambientais. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 149-174, out./dez. 2017

RAUSCH, P. C.; AGOSTINETTO, L.; SIEGLOCH, A. E. Descarte de resíduos de medicamentos pela população rural. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 26, e20220044, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20220044r1vu2023L1AO

SEGURO, Isabel; PACHECO, João G.; DELERUE-MATOS, Cristina. Low cost, easy to prepare and disposable electrochemical molecularly imprinted sensor for diclofenac detection. *Sensors*, v. 21, n. 6, artigo 1975, 2021. DOI: 10.3390/s21061975.

SERRÃO, Alisson Caio Magalhães et al. Análise do processo de pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart): influência da temperatura no rendimento dos produtos de reação e nas propriedades físico-químicas do bio-óleo. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 18200-18220, 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-453

SILVA, D. F.; et al. Avaliação do gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde em municípios da região metropolitana de Belo Horizonte (Brasil). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 251-262, jul./set. 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000452

SILVA, E. G. da; TAKASUSUKI, M. C. C. R. Invertebrados marinhos como biomarcadores de fármacos. *Scientific Electronic Archives*, v. 13, n. 5, p. 79-84, maio 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.36560/14520211278

SILVA, T. S. M. et al. Perfil de sensibilidade aos antimicrobianos das cepas de *Escherichia coli* isoladas de amostras de águas superficiais do Rio Carioca-RJ, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 27, n. 4, p. 673-682, jul./ago. 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-415220200405.

SILVA, V. W. P. da; FIGUEIRA, K. L.; SILVA, F. G. da; ZAGUI, G. S.; MESCHEDE, M. S. C. Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, p. 1113-1123, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-81232023284.05752022

SOUSA, G. G. P. de; SOARES JR., L. Aplicação da simulação de Monte Carlo no cálculo da incerteza de medição. *Extensão em Ação*, Fortaleza, v. 1, n. 10, p. 43-56, jan./jun. 2016.

SOUSA, P. V. A. et al. Efeitos do descarte de medicamentos no meio ambiente. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, e198973868, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3868

TLILI, Amal et al. Molecularly imprinted polydopamine-based sensor for accurate paracetamol monitoring in environmental samples. *Emergent Materials*, v. 8, p. 2805–2814, 2025. DOI: 10.1007/s42247-025-01039-2.

UNITED STATES. PHARMACOPEIAL CONVENTION. Committee of Revision. The United States Pharmacopeia. USP23. The National Formulary NF18; National formulary supplements 1-9. Rockville, MD; 1995. p. 16.

VENTURA, K. S.; REIS, L. F. R.; TAKAYANAGUI, A. M. M. Avaliação do gerenciamento de resíduos de serviços de saúde por meio de indicadores de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 167-176, abr./jun. 2010

VIEIRA, I.C; LUPETTI, K.O; FATIBELLO-FILHO, O. Determinação de paracetamol em produtos farmacêuticos usando um biossensor de pasta de carbono modificado com extrato bruto de abobrinha (Cucurbita pepo). Química Nova, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 39–43, 2003

ZANONI, M. V. B. et al. Panorama da eletroquímica e eletroanalítica no Brasil. *Química Nova*, São Paulo, v. 40, n. 6, p. 663-669, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170072

ZIARATI, P. et al. Levels of pharmaceutical residues in environment: a review. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, v. 147, p. 123-134, 2018

ZUCCHINI, R. R. Uma estimativa do efeito das incertezas dos padrões na incerteza das curvas de calibração em química analítica. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, São Paulo, v. 2, n. 7, p. 85-98, abr. 2018.